

1-1-2005

## **Alternativa de manejo de lodos de clarificación de agua potable mediante la técnica de deshidratación en filtro banda en una industria cervecera**

Yemny Cristina Moreno Franco  
*Universidad de La Salle, Bogotá*

Follow this and additional works at: [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_ambiental\\_sanitaria](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria)

---

### **Citación recomendada**

Moreno Franco, Y. C. (2005). Alternativa de manejo de lodos de clarificación de agua potable mediante la técnica de deshidratación en filtro banda en una industria cervecera. Retrieved from [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_ambiental\\_sanitaria/1780](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1780)

This Trabajo de grado - Pregrado is brought to you for free and open access by the Facultad de Ingeniería at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Ingeniería Ambiental y Sanitaria by an authorized administrator of Ciencia Unisalle. For more information, please contact [ciencia@lasalle.edu.co](mailto:ciencia@lasalle.edu.co).

ALTERNATIVA DE MANEJO DE LODOS DE CLARIFICACIÓN DE AGUA  
POTABLE MEDIANTE LA TÉCNICA DE DESHIDRATACIÓN EN FILTRO  
BANDA EN UNA INDUSTRIA CERVECERA

YEMNY CRISTINA MORENO FRANCO

UNIVERSIDAD DE LA SALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
SANTA FE DE BOGOTÁ, D.C.  
2005

ALTERNATIVA DE MANEJO DE LODOS DE CLARIFICACIÓN DE AGUA  
POTABLE MEDIANTE LA TÉCNICA DE DESHIDRATACIÓN EN FILTRO  
BANDA EN UNA INDUSTRIA CERVECERA

YEMNY CRISTINA MORENO FRANCO

Pasantía para optar al título de  
Ingeniera Ambiental y Sanitaria

Directora  
ROSALINA GONZALEZ  
Ingeniera Química

UNIVERSIDAD DE LA SALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
SANTA FE DE BOGOTÁ, D.C.  
2005

Nota de aceptación

---

---

---

---

Jurado 1

---

Jurado 2

Bogotá, 18 de abril de 2005

UNIVERSIDAD DE LA SALLE

ADVERTENCIA

Ni la Universidad, ni el Asesor, ni el jurado son responsables de las ideas expuestas por el Autor en este trabajo de grado.

Reglamento Estudiantil. Capítulo 12 - Artículo 97.

Bogotá, Abril de 2005

*A DIOS, LUZ QUE ILUMINA Y GUÍA MI CAMINO.  
A mis padres, por su amor, fortaleza, confianza  
y apoyo en todos los momentos de mi vida.  
A mis hermanos, por su cariño y la alegría de  
estar unidos; en especial a Sandra, por sus  
enseñanzas y apoyo incondicional.  
A mis familiares por su interés y valiosa  
colaboración. A mis amigos (especialmente Mafe,  
Diego y Andrea) por su paciencia, compañía y por la  
buena amistad que compartimos.*

## AGRADECIMIENTOS

La Autora expresa sus agradecimientos a:

JAVIER IGNACIO TORRES CORREA, Director Gestión de Manufactura Cervecería Leona S.A., por su valiosa colaboración y respaldo.

JAIME AUGUSTO TOQUICA WILCHES, Ingeniero Químico, Coordinador de Gestión Ambiental Cervecería Leona S.A. y Asesor de éste Proyecto, por sus valiosos aportes, su interés, confianza, experiencia y gran apoyo en el desarrollo del proyecto.

GERMAN FULDO CHAPARRO, Gerente de Servicios de la División de Ingeniería de Cervecería Bavaria S.A., por su interés, respaldo y valiosa colaboración en ésta etapa tan importante de mi carrera.

WILLIAM PEREIRA, Ingeniero Planta de Aguas, por sus aportes, colaboración e interés en el desarrollo de éste proyecto.

ANA MARIA ROA, Analista Química, División de Calidad, Cervecería Bavaria S.A., por su asesoría, calidez y respaldo en el desarrollo de algunas de las actividades del proyecto.

FERNANDO VEGA SÁNCHEZ, Analista de Laboratorio, Cervecería Leona S.A., por sus enseñanzas y aportes; por su compañía, respaldo, amistad y confianza durante todo este tiempo.

ALEJANDRO SILVA, Ingeniero Químico Bioquímica, por su experiencia, amistad y apoyo durante todo éste tiempo.

ROSALINA GONZALEZ, Ingeniera Química, Docente de la Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Universidad de la Salle, por su asesoría, colaboración y respaldo en la elaboración del documento.

Todo el personal de PLANTA DE AGUAS DE CERVECERÍA LEONA S.A., por su colaboración, experiencia, compañía y en general por todos los aportes que me brindaron durante mi estadía en la Planta.

LA CERVECERÍA LEONA S.A., sus directivas y demás personal por abrirme las puertas y dejarme llevar a cabo éste proyecto, brindándome toda la asesoría y el respaldo necesarios.

LA CERVECERÍA BAVARIA S.A. en especial al personal del Laboratorio de la División de Calidad, por permitirme llevar a cabo algunas actividades allí, contando siempre con el apoyo y la confianza del personal a cargo.

LA UNIVERSIDAD DE LA SALLE, por todas las enseñanzas y aportes en mi desarrollo profesional.

Y en general a todos aquellos que de una u otra forma contribuyeron con la realización de este trabajo.



## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
JUSTIFICACIÓN	2
OBJETIVOS	3
1. TRATAMIENTO DE POTABILIZACIÓN DEL AGUA	4
1.1 PRETRATAMIENTO	4
1.2 COAGULACIÓN	6
1.2.1 Principales Coagulantes.	7
1.2.1.1 Coagulación con Sales de Aluminio.	8
1.2.2 Introducción del Coagulante.	9
1.2.3 Dispersión del Coagulante.	9
1.3 FLOCULACIÓN	10
1.3.1 Floculantes.	11
1.3.1.1 Sílice Activada.	11
1.3.1.2 Floculantes Minerales.	11
1.3.1.3 Floculantes Orgánicos.	11
1.4 SEDIMENTACIÓN	11
1.4.1 Sedimentación de Flujo Vertical.	13
1.4.2 Conceptos Básicos sobre el Manto de Lodos.	13
1.4.3 Manejo de Lodos.	14
1.4.3.1 Evacuación Periódica.	15
1.4.3.2 Evacuación Continua.	15
1.5 FILTRACIÓN	16

1.5.1 Tipos de Filtros.	16
1.5.1.1 Filtros Rápidos Convencionales.	17
1.5.2 Lavado del Filtro.	18
1.5.3 Sistemas de Filtración.	18
1.5.3.1 Filtración Lenta.	18
1.5.3.2 Filtración Rápida.	19
1.6 DESINFECCIÓN	19
1.6.1 Modos de Desinfección del Agua.	20
1.6.2 Estimación de la Dosis de Cloro.	23
2. LODOS PROVENIENTES DE LA POTABILIZACIÓN DEL AGUA	24
2.1 TRATAMIENTO DE LODOS	26
2.1.1 Espesamiento.	27
2.1.1.1 Espesamiento por sedimentación.	27
2.1.2 Deshidratación.	28
2.2 DISPOSICIÓN FINAL DEL LODO	32
2.2.1 Métodos de aplicación y disposición de lodos.	33
2.2.1.1 Disposición de lodos en el ambiente acuático.	34
2.2.1.2 Relleno y monorrelleno.	34
2.2.1.3 Aplicación de lodos al suelo.	35
3. EL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUA EN CERVECERÍA LEONA	38
3.1 COAGULACIÓN	41
3.2 FLOCULACIÓN	41
3.3 SEDIMENTACIÓN	42
3.4 FILTRACIÓN	44

3.5 DESINFECCIÓN	45
3.6 ALMACENAMIENTO Y DISTRIBUCIÓN DE AGUA TRATADA	45
3.7 ADICIÓN DE OTROS PRODUCTOS QUÍMICOS	45
3.7.1 Adición de Inhibidor de Corrosión.	45
3.7.2 Adición de Soda.	46
4. MARCO LEGAL	48
4.1 LEGISLACIÓN COLOMBIANA	48
4.1.1 Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS - 2000	48
4.2 LEGISLACIÓN DE LOS ESTADOS UNIDOS (EUA)	50
5. METODOLOGÍA DE TRABAJO	51
5.1 DISEÑO EXPERIMENTAL	52
5.1.1 Análisis Físicoquímicos.	52
5.1.1.1 Recolección de Muestras.	52
5.1.1.2 Métodos y técnicas.	55
5.1.1.3 Resultados de los Análisis.	56
5.1.1.4 Comparación Resultados Agua Filtrada con Decreto 475/98.	59
5.1.2 Análisis Microbiológicos.	60
5.1.2.1 Procedimiento.	61
5.1.2.2 Resultados.	61
5.1.3 Ensayos de Espesamiento de Lodos.	63
5.1.3.1 Procedimiento.	63
5.1.4 Pruebas de Deshidratación de Lodos.	66
5.1.4.1 Procedimiento.	67

5.1.4.2 Resultados.	69
5.2 INGENIERÍA BÁSICA	70
5.2.1 Propuesta sistema de tratamiento.	70
5.2.2 Propuesta para la disposición final del lodo.	76
6. VALORACIÓN ECONÓMICA DEL SISTEMA DE ESPESAMIENTO DE LODOS	78
7. CONCLUSIONES	85
8. RECOMENDACIONES	87
BIBLIOGRAFÍA	88
ANEXOS	

## LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Principales características de algunos pretratamientos del agua cruda	5
Cuadro 2. Diferentes modelos del proceso de clarificación por sedimentación	12
Cuadro 3. Tipos de sedimentación según el sentido del flujo en unidades de plantas de potabilización de agua	13
Cuadro 4. Tipos de filtros	17
Cuadro 5. Ventajas y desventajas de algunos agentes químicos usados en desinfección	21
Cuadro 6. Características de lodos de sales de aluminio	25
Cuadro 7. Características de lodos de purificación de agua	25
Cuadro 8. Sistemas de secado natural	29
Cuadro 9. Sistemas de deshidratación mecánica	30
Cuadro 10. Ventajas y desventajas de los sistemas de deshidratación mecánica	32
Cuadro 11. Consideraciones ambientales de la descarga de lodos a los Cuerpos de agua	34
Cuadro 12. Concentración de lodos en el tratamiento de aguas	49
Cuadro 13. Ensayos de laboratorio	55
Cuadro 14. Resultados análisis fisicoquímicos de agua cruda de río, agua a la salida del filtro y lodo	56
Cuadro 15. Comparación valores del lodo con la Res. 2309/86	59
Cuadro 16. Comparación resultados de agua filtrada con Dec. 475/98	60
Cuadro 17. Resultados análisis microbiológicos de agua cruda de río, agua filtrada y lodo	62

Cuadro 18. Volúmenes de sedimentación en un periodo de tiempo determinado	65
Cuadro 19. Índice de floculación de Willcomb	65
Cuadro 20. Criterio de selección de la dosis óptima de polímero	66
Cuadro 21. Sólidos suspendidos en el sobrenadante	66
Cuadro 22. Polímeros usados en los ensayos de deshidratación	67
Cuadro 23. Criterios de calificación para la deshidratación del lodo	68
Cuadro 24. Calificación para la deshidratación del lodo	69
Cuadro 25. Tren de tratamiento para los lodos de clarificación de Agua potable	74
Cuadro 26. Comparación datos de caracterización lodo PTAP y lodo PTAR Cervecería Leona S.A.	76
Cuadro 27. Costos de implementación del prediseño del cono espesador	78
Cuadro 28. EVA OPTIMISTA	82
Cuadro 29. EVA PESIMISTA	84

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Modos de desinfección del agua	20
Figura 2. Etapas involucradas en el tratamiento de los residuos de Plantas de Tratamiento	27
Figura 3. Procedimiento simplificado para la aplicación de lodos de Plantas de tratamiento en el suelo	36
Figura 4. Esquema de la planta de tratamiento de agua potable de la Cervecería Leona S.A.	38
Figura 5. Esquema del punto de aplicación del coagulante en la PTAP de la Cervecería Leona	41
Figura 6. Diagrama de flujo de la metodología del proyecto	51
Figura 7. Muestras acidificadas para determinación de análisis fisicoquímicos	54
Figura 8. Muestras sin acidificar para determinación de análisis fisicoquímicos	54
Figura 9. Periodo de incubación y medios utilizados para cada análisis de microbiología	61
Figura 10. Diagrama tanque de homogenización PTAP	72
Figura 11. Esquema general del sistema de tratamiento propuesto	75

## LISTA DE FOTOS

	Pág.
Foto 1. Clarificador con Torre de Aireación para Tratar Agua de Pozo	40
Foto 2. Clarificador para tratar Agua de Río - Vista Lateral	40
Foto 3. Reglilla interna de los clarificadores para controlar nivel del Manto de lodos	43
Foto 4. Entrada de Agua Clarificada al Tanque Pulmón	43
Foto 5. <b>1.</b> Batería de Filtración para Clarificadores de 50 L – <b>2.</b> Batería de filtración para Clarificadores de 75 L	45
Foto 6. Serpentín Homogenizador de Agua Clorada – Tanques de almacenamiento	47
Foto 7. Equipo para Pruebas de Jarras	64
Foto 8. Conos imhoff con muestra de lodo de clarificación de agua potable	64
Foto 9. Filtro banda para deshidratación de lodos en la planta de tratamiento de agua residual	71



## LISTA DE ANEXOS

- Anexo A. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico Ras – 2000. Sección II. Título C. Sistemas De Potabilización
- Anexo B. Procedimiento de cada técnica usada para la caracterización de las muestras
- Anexo C. Equipos usados en los análisis
- Anexo D. Soporte estadístico de datos análisis fisicoquímicos
- Anexo E. Soporte estadístico resultados análisis microbiológicos
- Anexo F. Ficha Técnica del Polímero 9901 de Nalco
- Anexo G. Datos de producción de agua potable (Enero – Mayo de 2004)
- Anexo H. Cálculo de la bomba
- Anexo I. Criterios de diseño del cono espesador
- Anexo J. Metodología EVA (Valor Económico Agregado)
- Anexo K. Soporte cálculos EVA
- Anexo L. Metodología para digestión del lodo

## GLOSARIO

**AGUA CRUDA:** Agua que no ha sido sometida a proceso de tratamiento.

**AGUA POTABLE:** Es aquella que por reunir los requisitos organolépticos, físicos, químicos y microbiológicos, en las condiciones señaladas en el presente decreto, puede ser consumida por la población humana sin producir efectos adversos a su salud. (Dec. 475/98)

**ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DE AGUA:** Son aquellas pruebas de laboratorio que se efectúan a una muestra para determinar sus características físicas, químicas o ambas.

**BARREDOR DE LODOS:** Dispositivo mecánico para recoger el lodo del fondo de los tanques.

**CLARIFICACIÓN:** Proceso de separación de los sólidos del agua por acción de la gravedad.

**CLORACIÓN:** Aplicación de cloro al agua, generalmente para desinfectar o para oxidar compuestos indeseables.

**COAGULACIÓN:** Aglutinación de las partículas suspendidas y coloidales presentes en el agua mediante la adición de coagulantes. (RAS 2000)

**COAGULANTES:** Coagulantes Sustancias químicas que inducen el aglutinamiento de las partículas muy finas, ocasionando la formación de partículas más grandes y pesadas.

**COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN:** Proceso por el cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas con peso específico superior al del agua llamadas floc.

**DESINFECCIÓN:** Proceso físico o químico que permite la eliminación o destrucción de los organismos patógenos presentes en el agua.

**FILTRACIÓN:** Separación de sólidos y líquidos usando una sustancia porosa que solo permite pasar al líquido a través de él.

**FLOCULACIÓN:** Aglutinación de partículas inducida por una agitación lenta de la suspensión coagulada. (RAS 2000).

**FLOCULO:** Masa floculada que es formada por la acumulación de partículas suspendidas.

**FUENTE DE ABASTECIMIENTO DE AGUA:** Depósito o curso de agua superficial o subterráneo, natural o artificial, utilizado en un sistema de suministro de agua.

**GRANATE:** nombre genérico de un grupo de minerales relacionados, usados con frecuencia como gemas y abrasivos. Los granates cristalizan en el sistema cúbico, de ordinario en rombododecaedros, hexaoctaedros o combinaciones de ambos.<sup>1</sup>

**HIDRÓFILO:** Que absorbe el agua.

**IGNICIÓN:** Estado de los cuerpos en combustión.

**ILMENITA:** mineral de titanato de hierro,  $\text{FeTiO}_3$ , masivo, esto es, sin forma ordenada. Puede encontrarse en distintas formas: como cristales romboédricos tabulares envueltos por rocas cristalinas metamórficas, como mineral accesorio en rocas ígneas o en partículas de arena. La ilmenita es un mineral opaco, de color entre negro y rojo castaño, y tiene un lustre metálico o submetálico.<sup>2</sup>

**LODO:** Contenido de sólidos en suspensión o disolución que contiene el agua y que se remueve durante los procesos de tratamiento.

**MEZCLA RÁPIDA:** Agitación violenta para producir dispersión instantánea de un producto químico en la masa de agua.

**MEZCLA LENTA:** Agitación suave del agua con los coagulantes, con el fin de favorecer la formación de los flóculos.

**PLANTA DE POTABILIZACIÓN:** Conjunto de obras, equipos y materiales necesarios para efectuar los procesos que permitan cumplir con las normas de calidad del agua potable.

**PLANTA DE TRATAMIENTO:** Una estructura construida para tratar el agua residual antes de ser descargada al medio ambiente.

**PRUEBA DE JARRAS:** Ensayo de laboratorio que simula las condiciones en que se realizan los procesos de oxidación química, coagulación, floculación y sedimentación en la planta.

**RESIDUO:** Los residuos secos restantes después de la evaporación de una muestra de agua o de lodo.

**SALMUERA:** Mezcla de agua y sal.

---

<sup>1</sup>"Granate." *Enciclopedia® Microsoft® Encarta 2001*. © 1993-2000 Microsoft Corporation. Reservados todos los derechos.

<sup>2</sup>"Ilmenita." *Enciclopedia® Microsoft® Encarta 2001*. © 1993-2000 Microsoft Corporation. Reservados todos los derechos.

**SEDIMENTACIÓN:** Proceso en el cual los sólidos suspendidos en el agua se decantan por gravedad, previa adición de químicos coagulantes.

**SEDIMENTOS:** Suelo, arena, y minerales lavados desde el suelo hacia la tierra generalmente después de la lluvia.

**SILVICULTURA:** Cuidado de los bosques orientado a obtener el máximo rendimiento sostenido de sus recursos y beneficios. Aunque en principio la silvicultura se centraba en la producción maderera, ahora comprende también el mantenimiento de pastos para ganado local, la conservación de hábitats naturales, la protección de cuencas hidrográficas y el desarrollo de zonas recreativas. Por tanto, la explotación de los bosques ayuda a utilizar las zonas arboladas con el fin de obtener de ellas el máximo beneficio acorde con su naturaleza.<sup>3</sup>

**SISTEMA DE CONDUCCIÓN:** Conjunto de tuberías, ductos o canales que sirven para conducir un fluido.

**SISTEMA DE POTABILIZACIÓN:** Conjunto de procesos unitarios para purificar el agua y que tienen por objeto hacerla apta para el consumo humano.

**SISTEMA DE SUMINISTRO DE AGUA POTABLE:** Conjunto de obras, equipos y materiales utilizados para la captación, aducción, conducción, tratamiento y distribución del agua potable para consumo humano.

**SUBPRODUCTOS DE LA DESINFECCIÓN (SPD):** Compuestos formados por la reacción del desinfectante con la materia orgánica o sustancia química preexistente en el agua.

**TRATAMIENTO:** Es el conjunto de operaciones y procesos que se realizan sobre el agua cruda, con el fin de modificar sus características organolépticas, físicas, químicas y microbiológicas, para hacerla potable de acuerdo a las normas establecidas en el decreto 475 de 1998.

---

<sup>3</sup>"Silvicultura." *Enciclopedia® Microsoft® Encarta 2001*. © 1993-2000 Microsoft Corporation. Reservados todos los derechos.

## RESUMEN

En La Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) de la Cervecería Leona, se realiza un tratamiento de potabilización que consta de: recepción y almacenamiento de agua cruda; coagulación-floculación y sedimentación en una misma unidad (clarificadores); filtración (en filtros de medio mixto: arena-antracita); desinfección (cloración); estabilización del pH y por último, almacenamiento y distribución del agua tratada.

Aquí se cuenta con una concesión de agua cruda del Río Bogotá de 150 L/s, de los cuales, aproximadamente el 4%, gracias a la acción del coagulante, se convierte en lodos de purgas, que son expulsados de los clarificadores, luego de que ocurre la sedimentación.

Los lodos que son expulsados en las purgas contienen aproximadamente 99.6% de humedad y actualmente son enviados directamente al alcantarillado que se comunica con la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), perdiendo la posibilidad de recuperar el agua que está ligada al lodo y que podría, luego de la separación adecuada, ser enviada al tanque de almacenamiento de agua cruda.

Es así que Cervecería Leona, en la búsqueda de un mejoramiento continuo de sus procesos, quiso implementar la búsqueda de un sistema de tratamiento del lodo que permitiese lograr, en primer lugar, un ahorro del caudal del consumo de agua cruda, lo que en un futuro se traduciría en un ahorro para la empresa en el momento en que la Autoridad Ambiental implemente el cobro de la tasa de uso; y en segundo lugar, un ahorro a futuro en el tratamiento de las aguas residuales (ya que se dejaría de verter este lodo a la PTAR) en el momento en que se implemente el pago de la tasa retributiva.

Por lo tanto se propuso un sistema de tratamiento que consiste, en primer lugar, en el *espesamiento* por gravedad con la ayuda de un polímero, para lo cual fue necesario realizar ensayos de espesamiento a nivel de laboratorio y el prediseño del cono espesador; y en segundo lugar, en la *deshidratación* en filtro banda, teniendo en cuenta los recursos propios de la empresa, en la que ya existe este sistema de deshidratación para los lodos de la PTAR. En este caso, se realizaron ensayos de deshidratación utilizando diferentes polímeros comerciales que se encuentran a disposición de la Cervecería.

En resumen, el orden de tratamiento propuesto para los lodos generados específicamente en la PTAP de Cervecería Leona es el siguiente: recepción de purgas de lodos, transporte de purgas de lodos hacia cono espesador; espesamiento; deshidratación en filtro banda y disposición final.

## ABSTRACT

In the potable water treatment plant (PTAP) (for their initials in Spanish) of CERVECERIA LEONA potability is accomplished by a treatment that consists of: reception and storage of crude water; coagulation - flocculating and sedimentation in the same unit (clarification); filtration in filters of half mix (sand - anthracite); disinfection (chlorination); stabilization of pH and last, storage and distribution of drinkable water.

The plant counts with the concession of crude water from the Bogotá river of 150 L/s with approximate 4% converts to purge mud due to the coagulation action then transferred to the chlorinators right after sedimentation takes place the mud that has been expelled from the purges contains approximate 99.6% of humidity and are transferred directly to the sewers that connects to the residual waters treatment plant (PTAR) (for their initials in Spanish) losing the possibility to recover the water that is attached to the mud that could be sent to the crude water tank (after proper separation).

That is how CERVECERIA LEONA in the search of a continuous improvement of their process is implementing in the search of a system on the mud treatment that will allow in first place a saving in the consumption of crude water, that in the future will translate in savings for the company in the moment the ambient authorities charge them for the crude water use, and second place a saving in the future in the treatment of residual water (due that no longer will be sending this mud to the PTAR) in the moment to implement the payment of the retributive charge.

Therefore a proposal of a system of treatment that counts with: in first place in the thickness due to gravity with the help of polymer, which was necessary testing of thickness up to laboratory levels and the pre design of the thickness cone; in second place in the dehydration in the band filter, considering the own resources of the company, which it counts with this system for the dehydration of the mud in the PTAR. in this case dehydration testing was done using different commercial polymers that can be available to the disposition of the company.

In summary, the order of treatment proposed for purge muds generated specifically in the PTAP for CERVECERIA LEONA is as follows: Reception of purge muds. Transportation of purge muds to the thickness cone; dehydration in the filter band and final disposition.

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo es una herramienta de ingeniería básica que sirve como fuente inicial para su implementación dentro de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) de la Cervecería Leona S.A.

Teniendo como punto de partida la producción de lodos inherente a la potabilización de agua, se estudió la posibilidad de realizarles un tratamiento de deshidratación en filtro banda, teniendo en cuenta los requerimientos propios de la Cervecería en la que ya existen estos recursos y con los que sería posible contar.

Para comprobar lo anterior se realizaron ensayos de deshidratación en los mismos filtros banda de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de la Cervecería; y ensayos de espesamiento a nivel de laboratorio, como tratamiento precedente a la deshidratación.

Este trabajo está dirigido a tratar un problema específico de la (PTAP) de Cervecería Leona y por lo tanto los datos que aparecen aquí son exclusivos de la misma y las soluciones aquí propuestas no pueden ser generalizadas a otras Plantas de Tratamiento de Agua Potable.

Sin embargo, aunque la información recopilada y obtenida en el desarrollo del proyecto sea de uso exclusivo de la compañía, también está dirigida a las empresas o personal capacitado que quieran implementar un sistema de tratamiento para los lodos similar al que se propone aquí y deseen tener una base teórica para su desarrollo.

## JUSTIFICACIÓN

La situación socioeconómica actual del país conlleva a que las empresas colombianas generen alternativas de desarrollo empresarial que las ayude a permanecer en un medio cada vez más competitivo en donde no solo es imperativo desarrollar técnicas para mantener un producto en el mercado, sino que es necesario que toda la organización haga parte de un sistema en el que se ubique en el orden correspondiente, un tema tan importante como es la protección ambiental.

Cervecería Leona, en su propósito de ubicarse como una de las mejores del sector, fomenta la búsqueda de un sistema de tratamiento que permita darle solución a un problema constante e inherente a la potabilización del agua como es la producción de lodos.

En este trabajo se ofrece una solución de tratamiento viable desde el punto de vista técnico y económico para los residuos (lodos) procedentes del tratamiento del agua cruda y con la que se pretende además, fomentar el desarrollo de nuevas investigaciones en la búsqueda de alternativas de solución a otros problemas ambientales.

Aunque existen diversos sistemas de tratamiento para estos residuos (lodos), la selección de uno u otro método depende de factores como los objetivos, los recursos con los que se cuenta, la viabilidad técnica y económica, entre otros; también se debe evaluar que la solución no afecte de manera drástica el ambiente, sino que por el contrario, permita disminuir los riesgos de contaminación.

Con este trabajo se pretende dar solución a un problema específico de la PTAP de una Industria Colombiana, involucrando así los procesos productivos que integran una organización y cuyo desarrollo hacia la búsqueda de nuevas formas de tratamiento hacen parte del mejoramiento continuo de la misma.



## OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL

Comprobar, a través de ensayos de laboratorio y en planta, que el sistema de deshidratación en filtro banda existente para tratar los lodos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, puede ser usado también para los lodos provenientes de la clarificación de agua potable.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Describir el proceso de producción de los lodos provenientes de la clarificación del agua potable a través de la observación directa y recopilando datos históricos de la producción total de los lodos.
2. Realizar la caracterización del agua cruda de río, del agua filtrada y del lodo a través de ensayos de laboratorio establecidos en la cervecería, con el fin de contar con una base de comparación entre estos tres puntos.
3. Realizar ensayos de laboratorio con el fin de establecer la dosis de polímero necesaria para llevar a cabo el espesamiento de los lodos como tratamiento que antecede a la deshidratación.
4. Realizar el prediseño de un espesador de lodos para la futura implementación de la técnica de espesamiento seleccionada para el tratamiento inicial del lodo.
5. Establecer la relación beneficio / costo del sistema de tratamiento seleccionado para la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Cervecería Leona.
6. Recomendar una alternativa de disposición final de acuerdo con los resultados obtenidos en la caracterización de los lodos.

## 1. TRATAMIENTO DE POTABILIZACIÓN DEL AGUA

El tratamiento del agua es el proceso de naturaleza físico-química y biológica, mediante el cual se eliminan una serie de sustancias y microorganismos que implican riesgo para el consumo o le comunican un aspecto o calidad organoléptica no deseables, y la transforma en un agua apta para consumir.

El recurso o agua natural que puede pasar a ser un agua para abastecimiento, puede contener determinados contaminantes químicos o biológicos, que tras el tratamiento correspondiente deben quedar reducidas hasta lograr obtener un agua apta para el consumo humano (de acuerdo con los parámetros establecidos en el Decreto 475 de 1998).

El tratamiento del agua y en especial la desinfección (hasta ahora generalmente con cloro) ha sido responsable en gran medida del 50 % de aumento de las expectativas de vida en los países desarrollados a lo largo del siglo XX. La eficacia del tratamiento del agua en la reducción de las enfermedades que por medio de ésta se transmiten, depende de la calidad del agua en origen y del proceso seguido en el sistema de tratamiento.

### 1.1 PRETRATAMIENTO

Antes de su tratamiento, propiamente dicho, las aguas crudas se someten, generalmente, a un pretratamiento que comprende un cierto número de operaciones físicas o mecánicas. Tiene por objeto separar del agua la mayor cantidad posible de las materias que, por su naturaleza o tamaño, crearían problemas en los tratamientos posteriores.

Las operaciones de pretratamiento son las siguientes (una estación de tratamiento puede incluir una o varias de estas operaciones, según su importancia y la calidad del agua cruda): desbaste; desarenado; pre-decantación; desaceitado, desengrase (de aguas de superficie)<sup>1</sup>.

En el cuadro 1, se presentan las principales características de cada uno de los pretratamientos mencionados.

---

<sup>1</sup> DEGRÉMONT. Manual Técnico del Agua. Cuarta edición. España, 1979. p. 111.

Cuadro 1. Principales Características de algunos Pretratamientos del Agua Cruda

PRETRATAMIENTO	OBJETIVOS	EQUIPOS	ESPECIFICACIONES
<b>DESBASTE</b>	Proteger a la estación de la posible llegada intempestiva de grandes objetos capaces de provocar obstrucciones en las distintas unidades de la instalación Separar y evacuar fácilmente las materias voluminosas arrastradas por el agua cruda	Desbaste fino: Rejas con una separación de 3 a 10 mm Desbaste medio: Rejas con una separación de 10 a 25 mm Predesbaste: con una separación de 50 a 100 mm.	Limpieza manual o limpieza automática
<b>DESARENADO</b>	extraer del agua cruda la grava, arena y partículas minerales más o menos finas, con el fin de evitar que se produzcan sedimentos en los canales y conducciones, para proteger las bombas y otros aparatos contra la abrasión, y para evitar sobrecargas en las fases de tratamiento siguientes.	Desarenador	Generalmente rectangulares del tipo canal
<b>PRE-DECANTACIÓN</b>	Se efectúa antes de la clarificación con aguas muy cargadas y tiene por objeto eliminar la totalidad de la arena fina y la mayor cantidad posible de barro.	Predecantador	Son de forma rectangular o circular
<b>DESACEITADO</b>	Separar los aceites libres, con el fin de evitar que sean arrastrados hasta la estación de tratamiento.	Se favorece la flotación natural en algunas de las obras de llegada, en la toma de agua o en el canal de llegada. Un tabique en sifón hace de presa.	La evacuación del aceite se realiza por una toma de superficie, por vertedero fijo o móvil (tubo giratorio)

Fuente: Extraído de DEGRÉMONT. *Manual Técnico del Agua*. Cuarta edición. España, 1979.

Además de las operaciones de pretratamiento ya mencionadas, algunas veces es necesario recurrir a la aireación del agua cruda dependiendo de las siguientes situaciones:

- Si el agua contiene gases en exceso:

- Sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), que da un sabor muy desagradable y se elimina fácilmente por una simple aireación atmosférica;
- oxígeno, cuando el agua se encuentra sobresaturada y su desprendimiento puede crear problemas en el funcionamiento de los sedimentadores (tendencia de los flóculos a elevarse a la superficie) y de los filtros, que sufren un falso atascamiento por desgasificación en el seno de la masa filtrante;
- dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que hace agresiva al agua; su eliminación por aireación se efectúa a la presión atmosférica<sup>2</sup>.

- Si el agua presenta un defecto de oxígeno, con la aireación se consigue entonces:

- la oxidación de los iones ferrosos y manganesos;
- la nitrificación del amoníaco, en ciertas condiciones;
- el aumento del contenido en oxígeno a un agua rica en amoníaco o en sulfatos, se consigue, en ciertos casos, combatir la anaerobiosis y evitar la corrosión de tuberías metálicas<sup>3</sup>.

## 1.2 COAGULACIÓN

Las aguas naturales contienen sustancias tanto disueltas como en suspensión; ambas pueden ser orgánicas e inorgánicas. Las materias en suspensión pueden tener un tamaño y densidad tal que pueden eliminarse del agua por simple sedimentación, pero algunas partículas son de un tamaño tan pequeño y tienen una carga eléctrica superficial que las hace repelerse continuamente, impidiendo su aglomeración y formación de una partícula más pesada que pueda sedimentar. Estas partículas, con una dimensión que suele estar comprendida entre 1µm y 0,2µ, son verdaderas partículas coloidales.

La *coagulación* en el proceso de tratamiento del agua tiene por objeto agrupar estas partículas coloidales dispersas en el agua en otras más voluminosas y pesadas que puedan ser separadas más fácilmente del agua.

Es así que la coagulación es la adecuación química de los sólidos en suspensión para su posterior remoción; este proceso juega un papel importante en el tratamiento con químicos para potabilización de aguas y se usa para remover turbiedad, color, bacterias, virus, algas, entre otros. En el proceso se presenta la desestabilización de las partículas, por adición de sustancias químicas (coagulantes) requiriéndose una unidad para dosificación y mezcla rápida<sup>4</sup>.

---

<sup>2</sup> DEGRÉMONT, Op. cit., p. 615.

<sup>3</sup> Ibid., p. 616.

<sup>4</sup> ACODAL. Curso de Operación y Mantenimiento de Plantas de Potabilización Bavaria S.A. Práctica No. 2: Dosis Óptima de Coagulante. Santafé de Bogotá, agosto de 2004. p. 9.

Los principales factores que influyen en el proceso de coagulación son :

Características de las aguas (pH, temperatura, alcalinidad, contenido de turbiedad y color); características del coagulante ( tipo, dosis, concentración de la solución); características de las unidades de mezcla (intensidad de mezcla y tiempo de retención).

La coagulación química se obtiene mediante la adición de compuestos químicos, con iones trivalentes de preferencia, para que se forme un floc fácil de sedimentar. Las principales sustancias químicas utilizadas en el proceso son las sales de hierro ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ) y sales de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  y  $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{O}_4$ ), utilizados como coagulantes inorgánicos primarios.

La mayoría de las sales de hierro y aluminio tienen la tendencia a bajar el pH del agua tratada por ser estas sales, hidrolizables del tipo ácido fuerte y base débil; por ello dependiendo de la alcalinidad del agua cruda y su valor de pH se puede adicionar o no álcalis como el bicarbonato (sodio o calcio) para compensar la depresión de la alcalinidad y el pH.

El pH es de suma importancia en el proceso de coagulación por desestabilización de cargas de las partículas y la precipitación del floc. En el caso del hierro y el aluminio en forma de hidróxidos se logra una mejor precipitación a niveles de pH que no solubilicen los precipitados. En el caso de las sales de aluminio se logra la máxima eficiencia de coagulación a valores de pH de 6.0-7.0, y en el caso del hierro se cuenta con rango más amplio de pH de 5.0-11, tomando como pH óptimo un valor de 5.5-6.0.

La dosis óptima de coagulante depende de la turbiedad y del color del agua cruda, además del pH y la alcalinidad. En general la dosis requerida depende del mecanismo de desestabilización de las partículas en suspensión<sup>5</sup>.

1.2.1 Principales Coagulantes. En términos generales, la coagulación consiste en introducir al agua un producto capaz:

- De neutralizar la carga de los coloides, generalmente electronegativos, presentes en el agua.
- De formar un precipitado.

Este producto se conoce con el nombre de coagulante. Los coagulantes se pueden clasificar en dos grupos: Los polielectrolitos (o ayudantes de coagulación) y los coagulantes metálicos. Ambos grupos básicamente actúan como polímeros además de la carga eléctrica que poseen<sup>6</sup>.

---

<sup>5</sup> ACODAL, Op. cit., p. 10.

<sup>6</sup> DEGRÉMONT. Op. cit., p. 136.

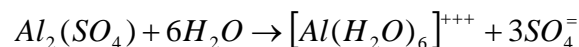
Es importante anotar que la velocidad de sedimentación de las partículas coaguladas no depende en forma exclusiva de los coagulantes usados sino del peso de las partículas que se trata de sedimentar<sup>7</sup>.

De acuerdo con Arboleda (1991), de la investigación realizada sobre este tipo de sustancias en el Centro de Ingeniería Sanitaria, Robert B. Taft, de Cincinnati, Estados Unidos, se desprenden las siguientes conclusiones prácticas, entre otras:

1. Los polielectrolitos usados en unión de coagulantes metálicos comunes, producen un floc que sedimenta rápidamente.
2. Con ciertas aguas, la dosificación de polielectrolitos en pequeñas cantidades reduce el gasto de coagulante.
3. Las algas son rápidamente coaguladas con polielectrolitos catiónicos.
4. Todos los polielectrolitos no son igualmente efectivos con todas las aguas.
5. Dosis excesivas de polielectrolitos producen dispersión en lugar de ayudar en la coagulación.
6. Deben los polielectrolitos añadirse en forma de solución para asegurar una completa mezcla<sup>8</sup>.

1.2.1.1 Coagulación con Sales de Aluminio. Las sales de aluminio forman un floc ligeramente pesado. Las más conocidas de estas son el sulfato de aluminio, el sulfato de aluminio amoniacal y el cloruro de polialuminio. El primero es el coagulante que por su bajo costo y su manejo relativamente sencillo se usa con mayor frecuencia en las plantas de tratamiento de agua potable.

El sulfato de aluminio  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$  es un polvo de color marfil, ordinariamente hidratado, que con el almacenaje suele convertirse en terrones relativamente duros. Cuando está en solución se encuentra hidrolizado, esto es, asociado con el agua, de la siguiente forma:



por otro lado, el cloruro de polialuminio (polyaluminium chloride, PAC) es un derivado polimérico del aluminio que presenta como beneficios: una mejor formación de floc, un más amplio rango de pH, menor generación de lodos y poca o ninguna necesidad de usar conjuntamente polielectrolitos. Su peor desventaja es que tiene mayor costo que el sulfato de aluminio o el cloruro férrico pero podría equilibrarse este costo si conjuntamente con los coagulantes metálicos, hay necesidad de usar polielectrolitos<sup>9</sup>.

---

<sup>7</sup> ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. Teoría y Práctica de la Purificación del Agua. Colombia: Colciencias, 1992. p.47.

<sup>8</sup> Ibid., p. 48.

<sup>9</sup> ARBOLEDA VALENCIA, Op. cit., p. 55.

1.2.2 Introducción del Coagulante. Teniendo en cuenta que la neutralización de los coloides es el principal objetivo que se pretende en el momento de la introducción del coagulante, es conveniente que el reactivo utilizado se difunda con la mayor rapidez posible.

En efecto, el tiempo de coagulación es extraordinariamente breve (inferior al segundo) y la utilización óptima del coagulante exige que la neutralización de los coloides sea total antes de que una parte del coagulante haya comenzado a precipitar (por ejemplo, en forma de hidróxido metálico)<sup>10</sup>.

Los coagulantes metálicos siempre deben aplicarse en solución verdadera. El aplicarlos en suspensión o peor en polvo, sin que las partículas del compuesto hayan tenido tiempo de disolverse, disminuye notablemente la efectividad del proceso, lo que se traduce en un desperdicio de dichas sustancias químicas<sup>11</sup>.

La solución de coagulantes puede prepararse en dos formas:

1. Dosificando el polvo en forma continua en un tanque de hidratación, desde donde la solución se lleva al punto de aplicación, lo que impropia se llama dosificación en seco.
2. Preparando la solución previamente, y dosificándola por gravedad o por bombeo en el punto de aplicación, lo que se suele llamar dosificación en húmedo. Tanto en el primero como en el segundo caso, los coagulantes están ya mezclados con el agua cuando se aplican.

1.2.3 Dispersión del Coagulante. Para garantizar una buena dispersión del coagulante es importante tener en cuenta el gradiente óptimo y el método para realizar la mezcla rápida.

Según Degrémont<sup>12</sup>, para la mezcla de los reactivos, se utiliza a veces únicamente la turbulencia creada por un vertedero, pero conviene disponer de un sistema que permita que esta mezcla rápida, sistema denominado mezclador rápido o coagulador, y que sea capaz de crear un gradiente de velocidad comprendido entre 100 y 1000 s<sup>-1</sup>.

### 1.3 FLOCULACIÓN

A continuación de la etapa de coagulación tiene lugar un segundo proceso llamado floculación, el cual tiene lugar tras someter a los microfloculos a una agitación lenta que permite la unión de estos en agregados mayores o floculos visibles ya a simple vista y con la suficiente cohesión y densidad para someterlos

---

<sup>10</sup> DEGRÉMONT, Op. cit., p. 139.

<sup>11</sup> ARBOLEDA VALENCIA, Op. cit., p. 76.

<sup>12</sup> DEGRÉMONT, Op. cit, p. 140.

a la siguiente etapa de sedimentación. La floculación requiere un menor gradiente de agitación para impedir la rotura y disgregación de los flóculos ya formados. Los flóculos rotos son difíciles de retornar a su tamaño inicial.

Según Arboleda: “una vez dispersados los coagulantes hay que producir una lenta agitación en el agua para permitir el crecimiento del floc. Este crecimiento es inducido por el contacto entre partículas de diámetro mayor de “1 micra” creado por el gradiente de velocidad de la masa líquida”<sup>13</sup>.

Tres características esenciales deben por eso estudiarse en toda floculación:

- a. La forma de producir la agitación
- b. El gradiente de velocidad
- c. El tiempo de retención.

Los dos objetivos básicos que se persiguen:

1. Reunir los microflóculos para formar partículas mayores con peso específico superior al agua.
2. Compactar el floc (disminuyendo su grado de hidratación) para producir una baja concentración volumétrica que permite una alta eficiencia en la fase de separación (sedimentación – filtración).

Tanto el gradiente de velocidad como el tiempo de retención óptimo varían según el tipo de agua y deben hallarse por experimentación.

Es muy importante tener en cuenta al respecto que la materia sólida en el floc representa entre el 2 – 11 % de su volumen, y que el grado de hidratación depende del gradiente de velocidad que se comunique a la masa líquida, lo cual influencia el peso específico de las partículas formadas y su velocidad de asentamiento<sup>14</sup>.

La floculación se ve favorecida por el empleo de ciertos productos llamados floculantes.

1.3.1 Floculantes. Llamados también *ayudantes de coagulación*, ayudantes de floculación e incluso ayudantes de filtración, son productos destinados a favorecer cada una de estas operaciones. La acción puede ejercerse al nivel de la velocidad de reacción (floculación más rápida) o al nivel de la calidad del flóculo (flóculo más pesado, más voluminoso y más coherente).

---

<sup>13</sup> ARBOLEDA VALENCIA, Op. cit., p. 111.

<sup>14</sup> Ibid., p. 112.



Los floculantes pueden clasificarse por su naturaleza (mineral u orgánica), su origen (sintético o natural) o el signo de su carga eléctrica (aniónico, catiónico o no iónico)<sup>15</sup>.

Las cargas positivas del polielectrólito neutralizan las cargas negativas de los coloides y anulan el potencial zeta, haciendolo tanto mejor cuanto que, para una masa dada de polielectrólitos, hay mayor número de macromoléculas y mayor probabilidad de encuentro con los coloides. Por el contrario, los polielectrólitos aniónicos y no iónicos no anulan el potencial  $z$ <sup>16</sup>.

1.3.1.1 Sílice Activada. Fue el primer floculante que se empleó, y sigue siendo, en la actualidad, el que mejores resultados puede dar, principalmente si se utiliza conjuntamente con sulfato de alúmina. Se introduce generalmente después del coagulante, y se prepara neutralizando parcialmente la alcalinidad de una solución de silicato sódico

1.3.1.2 Floculantes Minerales. A veces se utilizan ciertos productos para cargar un agua cruda que no contiene suficiente materia en suspensión. Entre ellos pueden citarse algunas arcillas, blanco de Meudon o carbonato cálcico precipitado, carbón activo en polvo (cuando se impone este tratamiento), arena fina y tierras diatomeas<sup>17</sup>.

1.3.1.3 Floculantes Orgánicos. El progreso de la química orgánica ha permitido el desarrollo de otros floculantes más activos. Los floculantes orgánicos se descomponen en dos clases de empleo: productos sólidos y productos líquidos. Existe gran cantidad de marcas comerciales de floculantes orgánicos, entre los cuales pueden citarse los siguientes: Cyanamic, Fluidis, Nalco, Exro, Water Clear, entre otros.

No hay ninguna regla que permita deducir a priori cuál de los floculantes dará mejores resultados, por lo que siempre deberán efectuarse ensayos de laboratorio. Así mismo, se determinará el tiempo que debe transcurrir entre la introducción del coagulante y la del floculante, factor éste que tiene gran importancia, por ejemplo, en el caso de la sílice activada<sup>18</sup>.

## 1.4 SEDIMENTACIÓN

Una vez floculada el agua, el problema radica en separar los sólidos del líquido, o sea las partículas coaguladas, del medio en el cual están suspendidas. Esto se

---

<sup>15</sup> DEGRÉMONT, Op. cit., p. 141.

<sup>16</sup> Ibid., p. 64.

<sup>17</sup> Ibid., p. 142.

<sup>18</sup> Ibid., p. 143.

puede conseguir dejando sedimentar el agua o filtrándola, o ejecutando ambos procesos consecutivamente que es lo común.

La sedimentación realiza la separación de los sólidos más densos que el agua y que tienen una velocidad de caída tal que pueden llegar al fondo del tanque sedimentador en un tiempo económicamente aceptable<sup>19</sup>.

Arboleda presenta la siguiente definición: “Se entiende por sedimentación a aquellos fenómenos mediante los cuales los sólidos en suspensión en un fluido son separados del mismo, debido al efecto de la gravedad”<sup>20</sup>.

En un sentido amplio el término sedimentación comprende un grupo de acciones diferentes según el tipo y concentración de sólidos o partículas en suspensión, los que se resumen en los modelos indicados en el cuadro 2.

*Cuadro 2. Diferentes Modelos del Proceso de Clarificación por Sedimentación*

<b>Clarificación por sedimentación tipo</b>	<b>Características de los sólidos en suspensión</b>	<b>Descripción del proceso</b>	<b>Ejemplos</b>
1	Partículas discretas y aisladas en soluciones diluidas.	No hay interacción entre las partículas y entre las partículas y el resto del fluido.	Movimiento de sedimentación de partículas en desarenadores o presedimentadores.
2	Partículas aglomerables en soluciones relativamente diluidas.	Las partículas se aglomeran agrupándose en partículas de mayor tamaño.	Sedimentación de flocs en decantadores horizontales o de placas.
3	Soluciones de concentración intermedia.	Las partículas interfieren entre sí en su descenso manteniendo posiciones estables.	Deposición de lodos en decantadores de flujo ascendente.
4	Soluciones de alta concentración.	Se forma una estructura entre las partículas que va modificándose lentamente con el tiempo.	Compactación de depósitos de lodos.

*Fuente: Arboleda Valencia Jorge. Teoría y Práctica de la Purificación del Agua. 1991. P. 185.*

<sup>19</sup> ARBOLEDA VALENCIA, Op. cit., p. 184.

<sup>20</sup> Ibid., p. 185.

Cabe destacar que para el modelo de clarificación tipo 1 los sólidos o partículas son idealizadas como discretas y aisladas, o sea, no cambian de densidad, tamaño o forma al descender en el líquido.

En cambio, en el modelo de clarificación tipo 2 los sólidos o partículas son pensadas como aglomerables y al descender se adhieren o aglutinan entre sí cambiando de tamaño, forma y peso específico durante la caída. En la clarificación tipo 3 y tipo 4 es el comportamiento conjunto de los sólidos lo que se analiza, debido a las interferencias mutuas entre partículas que hace que estas formen un manto de lodos que flota en el líquido.

Una vez formados los flóculos por la agregación de las partículas coloidales en suspensión, hay que proceder a la separación de éstas. Esta separación, si no se está siguiendo el proceso de filtración directa, tiene lugar por sedimentación en los decantadores o sedimentadores.

Los tipos de sedimentadores, clasificados según el sentido del flujo, utilizados en las unidades de decantación y el tipo de clarificación que se generan se resumen en el cuadro 3.

*Cuadro 3. Tipos de Sedimentación según el sentido del flujo en unidades de sedimentación de plantas de potabilización de agua.*

Sentido del flujo	Tipo de sedimentación	Ejemplo	Rata de flujo $m^3 / m^2 / d$
Horizontal	1 y 2	Desarenadores	200 - 420
			15 - 30
Vertical	2 y 3	Manto de lodos	45 - 60
Inclinado (ascendente o descendente)	1 y 2	Decantadores con módulos o placas	120 - 180

*Fuente: Arboleda Valencia Jorge. Teoría y Práctica de la Purificación del Agua. 1991. p. 186.*

1.4.1 Sedimentación de Flujo Vertical. La sedimentación de flujo vertical se realiza en sedimentadores en los cuales el agua entra directamente al fondo del tanque y asciende hasta las canaletas de recolección colocadas en la superficie del tanque. Por lo general en este tipo de sedimentación, se forma en la parte inferior del tanque un manto de partículas que responde a los modelos de clarificación tipos 3 y 4, a través del cual tiene que pasar el flujo. Esto hace que en el mismo tanque se realicen los procesos de floculación (dentro de lodos suspendidos) y sedimentación dentro de la zona superior<sup>21</sup>.

<sup>21</sup> ARBOLEDA VALENCIA, Op. cit., p. 207.

1.4.2 Conceptos básicos sobre el manto de lodos. Dada la alta concentración de partículas que hay en el manto de lodos (del 10% al 20% del volumen) existe una mutua interferencia en la velocidad de sedimentación con que caen, de modo que el manto se puede considerar como un filtro de flujo ascendente, en el que los granos del medio filtrante están constituidos por coágulos predestabilizados, suspendidos por la fuerza ascensional de fricción del flujo.

En el proceso, el floc no conserva su peso específico, su tamaño ni su forma constante. Antes bien, las partículas pequeñas que entran en el fondo, son arrastradas por el flujo. Al chocar éstas con otras, incrementan su tamaño, hasta adquirir un volumen tal que, caen chocando con las que suben. El régimen que se establece dentro del manto de lodos es por tanto turbulento, en el que las partículas suben y bajan, a veces con un movimiento rotacional<sup>22</sup>.

1.4.3 Manejo de Lodos. Uno de los aspectos más críticos en la operación de plantas de tratamiento es el manejo de los lodos producidos en los procesos de sedimentación y filtración, según sean provenientes de coagulación con sulfato de aluminio, o de compuestos férricos, para remoción de color o turbiedad, ya que tanto sus características fisicoquímicas como sus volúmenes son distintos en cada caso.

Los lodos que se producen en los sedimentadores constituyen entre el 60 y el 70% de los sólidos totales y en los filtros entre el 30 y el 40%. Si embargo en las plantas que remueven hierro y manganeso los filtros retienen la mayoría de los lodos: 50 a 90%. Los polielectrolitos tienden a reducir los volúmenes de estos lodos<sup>23</sup>.

Los lodos pueden extraerse en dos formas: a) En forma periódica, por llenado y vaciado; b) en forma continua. Debe además distinguirse entre:

- a. Los lodos líquidos que involucran el agua de arrastre.
- b. Los lodos concentrados a los que se les ha sacado, por sedimentación u otro método similar buena parte del agua de arrastre.
- c. Los lodos semisolidificados que son los mismos concentrados pero a los que se les ha extraído aún más la humedad, al punto de dejarlos manejables y transportables en estado semisólido en filtros prensa<sup>24</sup>.

El volumen de los primeros puede estimarse así: los sedimentadores producen entre el 2 y el 4% del caudal que se procesa y los filtros entre el 1 y el 2% del

---

<sup>22</sup> ARBOLEDA VALENCIA, Op. cit., p. 207.

<sup>23</sup> Ibid., p. 269.

<sup>24</sup> Ibid., p. 269.

mismo. En total el flujo de lodos de una planta no debe ser mayor, en promedio del 5% pero hay casos en que es mayor<sup>25</sup>.

Este volumen se concentra en el fondo de los sedimentadores cuando se usa el sistema de vaciado y llenado periódico; o en concentradores especiales, provistos de lentas paletas, que giran para romper los puentes entre partículas y permitir así que el lodo se compacte en la base del tanque, mientras el agua sobrenadante es extraída por arriba. La concentración del lodo líquido permite reducir su volumen del 3 al 25%<sup>26</sup>.

1.4.3.1 Evacuación Periódica. Es el sistema más tradicional que consiste en llenar los sedimentadores y dejarlos trabajar durante un periodo de tiempo que puede variar entre 15 días o uno o varios meses, según sea la turbiedad del agua cruda durante ese periodo, la dosis y tipo de coagulantes y el volumen muerto dejado en el tanque para almacenamiento de lodos. Este suele, en forma empírica, especificarse que sea del 10 al 20% del volumen total del tanque para sedimentadores de flujo horizontal. En sedimentadores de placas no debe ser inferior al 50% del volumen total para que los procesos de llenado y vaciado no sean demasiado frecuentes<sup>27</sup>.

En todos los casos, el fondo debe tener una pendiente mínima del 5% hacia las bocas de desagüe colocadas en el piso y éstas no deben quedar a más de 10 m del punto más alejado de recolección. Por eso en tanques grandes hay que proveer varias salidas para los lodos a fin de facilitar su arrastre por medio de mangueras de alta presión.

1.4.3.2 Evacuación Continua. La evacuación continua puede hacerse en dos formas distintas: a) Por métodos mecánicos; b) por métodos hidráulicos.

Los primeros son de dos clases: 1.- Con equipos que empujan por el fondo, lentamente, el lodo hacia la boca de salida, desde donde es extraído (en este caso el lodo es arrastrado por el equipo y la boca está quieta). 2.- Con equipos que transportan por el fondo las bocas de salida para ir succionando el lodo en su sitio en la medida que cae (en este caso el lodo está quieto y son las bocas de salida las que se mueven)<sup>28</sup>.

Los métodos hidráulicos consisten, por su parte, en dejar escurrir gravitacionalmente el lodo hasta las bocas de salida y de ahí extraerlo (en este caso el lodo se mueve por su propio peso y las bocas de salida están quietas).

---

<sup>25</sup> Ibid., p. 270.

<sup>26</sup> ARBOLEDA VALENCIA, Op. cit., p. 270.

<sup>27</sup> Ibid., p. 271.

<sup>28</sup> Ibid., p. 272.

**a. Métodos Mecánicos.** En los sedimentadores de flujo horizontal tradicionales se ha preferido el uso de métodos mecánicos con cadenas o puentes barrelados, debido a la gran área que estos tanques ocupan (seis veces mayores que los de placas y dos veces mayores que los de manto de lodos).

La remoción mecánica se hace por medio de estructuras metálicas que avanzan, apoyadas en las crestas de los muros de los sedimentadores, barriendo el fondo con rastras que llevan el material sedimentado hasta una tolva colocada al extremo del tanque donde hay una válvula automática que se abre periódicamente para extraer los sólidos acumulados. En estos casos las rastras tienen movimiento circular y el lodo se recolecta al centro de ellas<sup>29</sup>.

**b. Métodos Hidráulicos.** La remoción hidráulica de los sedimentos es especialmente apropiada para sedimentadores de alta rata debido a su menor área construida que permite atolvar los fondos sin que el costo sea excesivo y para algunos sedimentadores de manto de lodos por su configuración especial.

Para efectuar la remoción hidráulica es necesario acercar los lodos tanto como se pueda a las bocas de drenaje ya que dichos lodos no son arrastrados por el flujo sino hasta muy corta distancia alrededor de ellas.

Esto implica que: a) Para poder remover lodos hidráulicamente es necesario proyectar un gran número de bocas de desagüe; b) para disminuir el número de puntos de salida la única solución es construir tolvas con una pendiente suficiente como para que las partículas de lodo rueden hacia las bocas de drenaje, ya sea durante la apertura del desagüe o antes por concentración del material de ellas.

Para remover lodos se recomienda los métodos mecánicos, ya que éstos favorecen la instalación de estructuras más pequeñas y por ende se obtienen menores tiempos de retención hidráulica.

## 1.5 FILTRACIÓN

El objetivo básico de la filtración es separar las partículas y microorganismos objetables, que no han quedado retenidos en los procesos de coagulación y sedimentación. En consecuencia el trabajo que los filtros desempeñan, dependen directamente de la mayor o menor eficiencia de los procesos preparatorios.

La filtración puede efectuarse de muchas formas: con baja carga superficial (filtros lentos) o con alta carga superficial (filtros rápidos); en medios porosos (pastas arcillosas, papel de filtro) o en medios granulares (arena, antracita, granate o combinados); con flujo ascendente de abajo hacia arriba o descendente de arriba hacia abajo y mixto (parte ascendente y parte descendente). Por último, el filtro

---

<sup>29</sup> ARBOLEDA VALENCIA, Op. cit., p. 276.

puede trabajar a presión o por gravedad, según sea la magnitud de la carga hidráulica que exista sobre el lecho filtrante<sup>30</sup>.

1.5.1 Tipos de Filtros. A continuación en el cuadro 4, se enumeran diversos tipos de filtros.

Cuadro 4. Tipos de filtros

Filtros Químicos		Filtros Biológicos		
1. Rápidos con lecho de un solo material.	De arena sola fina o gruesa.	Lentos convencionales		
	De antracita sola			
2. Rápidos con lecho múltiple.	De antracita y arena.			Prefiltros
	De antracita, arena y granate o ilmenita.	De arena dinámicos		
3. Rápidos con flujo ascendente		De arena horizontales		
4. De flujo mixto (parte ascendente y parte descendente).		De arena ascendentes		

Fuente: adaptado de Arboleda Valencia Jorge. *Teoría y Práctica de la Purificación del Agua*. 1991.

Los más comunes en plantas de tratamiento municipales son los de flujo descendente, a saber:

1. Filtros rápidos de arena sola o antracita sola.
2. Filtros de lecho mixto: de arena y antracita o arena, antracita y granate o ilmenita.
3. Filtros lentos biológicos convencionales<sup>31</sup>.

Los filtros de lechos mixtos de arena y antracita deben preferirse para la mayoría de las aguas, sobre los de arena sola o antracita sola, aunque en la actualidad se están usando los filtros profundos de arena gruesa o antracita gruesa, para lavado con aire y agua.

1.5.1.1 Filtros Rápidos Convencionales. Esencialmente constan de un tanque rectangular de concreto de 3.5 a 5 m de profundidad total, en el cual se coloca un lecho de arena y grava sobre un sistema adecuado de drenaje. El flujo pasa de la parte superior del tanque, cuya profundidad se suele hacer de 0.50 a 2 m, a los drenes del fondo atravesando el medio filtrante. Como al cabo de cierto número de horas de servicio el filtro se obstruye, se hace necesario lavarlo invirtiendo el

<sup>30</sup> Ibid., p. 367.

<sup>31</sup> ARBOLEDA VALENCIA, Op. cit., p. 405.

sentido del flujo, por medio de agua que se inyecta a presión en los drenes y se recoge en las canaletas de lavado colocadas sobre la superficie de la arena. Esta operación dura de 5 a 15 minutos\*, después de la cual el filtro vuelve a su operación normal.

El sistema consta de cuatro flujos básicamente:

1. un flujo de entrada del agua sedimentada al filtro.
2. un flujo de salida del agua ya filtrada.
3. un flujo de entrada del agua de lavado al filtro para hacer la limpieza del medio filtrante.
4. un flujo de desagüe del agua sucia proveniente del lavado de la unidad.

1.5.2 Lavado del Filtro. Durante el proceso de filtrado, los granos del medio filtrante se recubren de material depositado en ellos hasta obstruir el paso del flujo, lo que obliga a limpiarlos periódicamente.

Esto se puede hacer raspando las capas superficiales, lavándolas por separado y volviéndolas a colocar en el filtro o invirtiendo el sentido del flujo en él, inyectando agua en los drenes y recolectándola en la parte superior.

El primer método se emplea sólo en filtros lentos en donde se remueven partículas discretas, no floculentas que penetran poco dentro del lecho. El segundo, en cambio, se usa tradicionalmente en todos los filtros rápidos, que trabajan con agua floculada, y en donde la penetración de las impurezas es mucho más profunda que en los lentos<sup>32</sup>.

El lavado debe hacerse cada vez que la pérdida de carga es igual a la presión estática sobre el fondo del lecho, o la calidad del efluente desmejore. La mayoría de los problemas del filtro se originan en un lavado deficiente incapaz de: a) desprender la película que recubre los granos del lecho; b) romper las grietas o cavidades en donde se acumula el material que trae el agua y c) transportar el material desde el interior del lecho hasta las canaletas de lavado.

1.5.3 Sistemas de Filtración. Para asegurar una buena filtración, un filtro debe reunir numerosas condiciones. No existe un filtro universal, sino filtros adaptados especialmente los requerimientos de las plantas de tratamiento de agua. A continuación se describen los dos sistemas de filtración generales: filtración lenta y filtración rápida.

---

\* Dato obtenido en la experiencia de funcionamiento de la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Cervecería Leona S.A.

<sup>32</sup> ARBOLEDA VALENCIA, Op. cit., p. 377.



1.5.3.1 Filtración Lenta. La filtración lenta tiene por objeto la depuración de las aguas de superficie, sin coagulación ni sedimentación previa. Las enzimas segregadas por algas y microorganismos que se fijan sobre la arena (membrana biológica) coagulan las materias coloidales. Para obtener buenos resultados, se necesitan generalmente tres etapas de filtración:

- filtros de desbaste que trabajan a un caudal de 20 a 30 m<sup>3</sup>/24 h por m<sup>2</sup> de filtro;
- prefiltros que trabajan a un caudal de 10 a 20 m<sup>3</sup>/24 h por m<sup>2</sup> de filtro;
- filtros que trabajan a un caudal de 3 a 7 m<sup>3</sup>/24 h por m<sup>2</sup> de filtro.

Debido a la baja velocidad de filtración, la pérdida de carga, en cada etapa, es bastante pequeña y los filtros se lavan, por término medio, una vez al mes. Los filtros de desbaste y los prefiltros se lavan más a menudo, en función de la turbiedad del agua cruda.

Después del lavado, la calidad del agua filtrada no es satisfactoria, por lo que debe verse ésta al desagüe, hasta que se forme la membrana biológica, para lo cual se precisan varios días.

La filtración lenta da buenos resultados de clarificación, mientras el agua se mantenga poco cargada de materias en suspensión y se respete una pequeña velocidad final de filtración; pero si el agua llega cargada, los filtros de desbaste y los prefiltros no son suficientemente eficaces y la turbiedad del agua tratada puede elevarse muy por encima del límite fijado por las normas, a menos que se reduzca la velocidad de filtración.

1.5.3.2 Filtración Rápida. En el proceso de filtración rápida, el agua atraviesa el lecho filtrante a velocidades de 4 a 50 m/h. La acción biológica es prácticamente nula; se observa solamente una nitrificación en ciertos casos en los que se limita la velocidad, el contenido en oxígeno es suficiente y se encuentran en el agua bacterias nitrificantes en condiciones nutritivas favorables.

## 1.6 DESINFECCIÓN

Los procesos de mezcla, coagulación, sedimentación y filtración remueven, con mayor o menor eficiencia, la mayoría de las bacterias y virus presentes en el agua. Desde este punto de vista pueden ser considerados como procesos preparatorios para la desinfección, pues cumplen dos objetivos: a) disminuyen la carga bacteriana del agua y b) hacen más eficientes los métodos de desinfección<sup>33</sup>.

Para llevar a cabo la desinfección se recurre al uso de desinfectantes. Las condiciones que debe tener un desinfectante ideal para poder ser usado en las plantas de tratamiento de agua son:

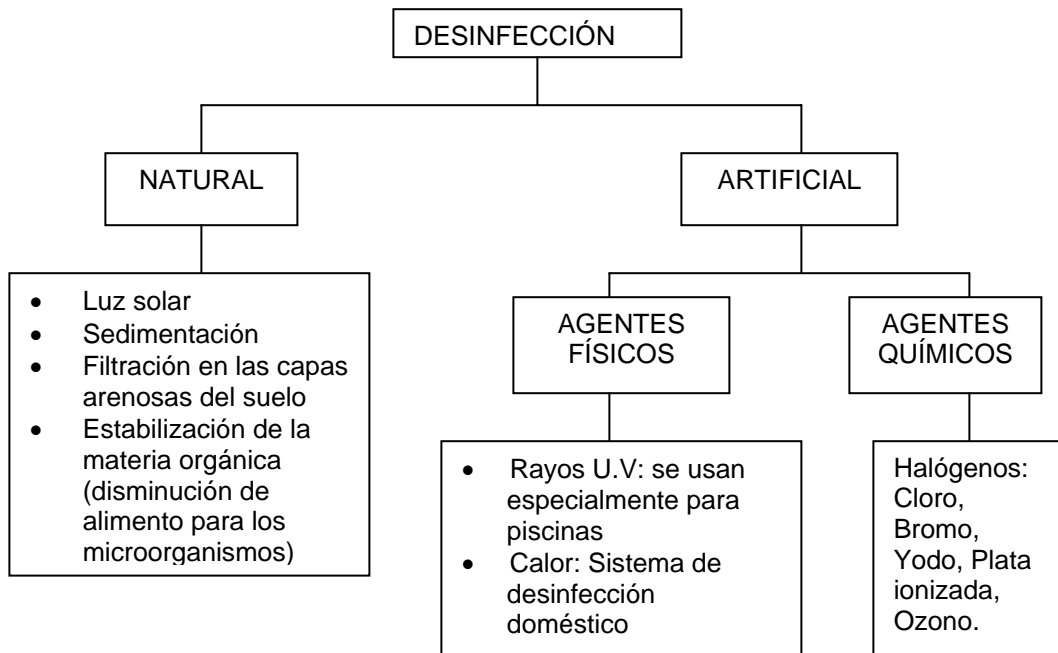
---

<sup>33</sup> ARBOLEDA VALENCIA, Op. cit., p. 585.

- Debe ser capaz de destruir los organismos causantes de enfermedades.
- Debe realizar esta labor a la temperatura del lugar y en un tiempo adecuado.
- No debe hacer el agua tóxica peligrosa para la salud o de sabor desagradable.
- Debe ser de fácil obtención, sencillo manejo y bajo costo.
- Su concentración en el agua debe poderse determinar prontamente.
- Debe dejar un efecto residual, para que proteja el agua contra posteriores contaminaciones<sup>34</sup>.

1.6.1 Modos de Desinfección del Agua. La desinfección se puede dividir en *natural* y *artificial*. En la siguiente figura se presentan los modos de desinfección del agua más generalizados.

Figura 1. Modos de desinfección del agua



Fuente: teoría tomada de ESCOBAR (2004) y adaptada por la Autora..

Todos los productos empleados en el tratamiento del agua, como oxidantes/desinfectantes, presentan ventajas y desventajas en su empleo, que de forma resumida se presentan en el cuadro 5.

<sup>34</sup> ARBOLEDA VALENCIA, Op. cit., p. 589.

Cuadro 5. Ventajas y desventajas de algunos agentes químicos usados en desinfección

	<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
<b>Cloro</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fácil de preparar</li> <li>- Es el método más utilizado y conocido</li> <li>- Oxida fácilmente al hierro, sulfuros y algo más limitado al manganeso</li> <li>- Mejora generalmente la reducción del color, olor y sabor</li> <li>- Es muy efectivo como biocida</li> <li>- Proporciona un residual en el sistema de abastecimiento</li> <li>- Mejora los procesos de coagulación y filtración</li> <li>- Elimina el amonio, previa transformación en cloramina.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Forma subproductos halogenados (posiblemente peligrosos para la salud), tanto con precursores procedentes del agua cruda como en la propia red.</li> <li>- En algunos casos puede provocar problemas de olor y sabor, dependiendo fundamentalmente de la calidad del agua</li> <li>- Requiere instalaciones para neutralizar las fugas de gas</li> <li>- El cloro gaseoso es peligroso y corrosivo</li> <li>- En el caso de emplear uno de sus principales derivados como es el hipoclorito sódico, este se degrada en el tiempo y al estar sometido a la luz.</li> <li>- Es menos efectivo a pH alto</li> </ul>
<b>Dióxido de cloro</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Oxida con facilidad al hierro, manganeso y sulfuros</li> <li>- No genera subproductos halogenados (si está bien generado)</li> <li>- Es más efectivo que el cloro y las cloraminas para inactivación de virus, <i>Cryptosporidium</i> y <i>Giardia</i>.</li> <li>- Mejora los procesos de coagulación y filtración</li> <li>- Elimina bien muchos de los olores y sabores procedentes de algas y compuestos fenólicos</li> <li>- Su efectividad está poco influenciada por el pH</li> <li>- Proporciona un residual en el sistema de abastecimiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-</li> <li>- Forma subproductos como cloritos y cloratos</li> <li>- El gas es explosivo en una concentración del 10% en el aire</li> <li>- La generación no apropiada, como exceso de cloro, puede formar subproductos halogenados</li> <li>- No reacciona con el amoníaco, no eliminándolo por tanto del agua bruta.</li> <li>- Tiene que ser generado in situ</li> </ul>
<b>Yodo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Es el halógeno de mayor peso molecular y que por su bajo poder de oxidación resulta el más estable.</li> <li>- Sus residuales se conservan mucho más tiempo que los del cloro</li> </ul>	Es más costoso que el cloro
<b>Bromo</b>	Debido a sus propiedades antisépticas y algicidas se utiliza para la desinfección de aguas de piscina	Se necesitan variaciones bruscas en su concentración (de 0.4 g/m <sup>3</sup> puede pasar a 2 g/m <sup>3</sup> ) para conseguir una desinfección que ofrezca las debidas garantías.

Cuadro 5. Ventajas y desventajas de algunos agentes químicos usados en desinfección

<b>Cloraminas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No forman (como hace el cloro) subproductos clorados</li> <li>- Son más estables como residual (especialmente la monocloramina) y de mayor duración en el tiempo que el cloro y el dióxido de cloro</li> <li>- No reaccionan con la mayor parte de compuestos orgánicos que suelen causar olores y sabores</li> <li>- Protegen la red en abastecimientos extensos contra recrecimientos bacterianos</li> <li>- Son fáciles de preparar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No oxidan al hierro, manganeso y sulfuros</li> <li>- Tienen menor poder de desinfección que el cloro, dióxido de cloro u ozono</li> <li>- El exceso de amoníaco puede originar en la red problemas de nitrificación</li> <li>- La monocloramina es menos efectiva como desinfectante a pH alto</li> <li>- Tienen que ser, generalmente, generadas in situ.</li> <li>- Puede originar algunos subproductos como algún ácido dicloroacético y cloruro de cianógeno.</li> </ul>
<b>Ozono</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Oxida al hierro, manganeso y sulfuros</li> <li>- Es más efectivo que el dióxido de cloro y cloraminas en la inactivación de virus, Cryptosporidium y Giardia</li> <li>- Elimina y controla los problemas de olor, sabor y color</li> <li>- No forma subproductos halogenados, a no ser que haya presencia de bromuros</li> <li>- Requiere una concentración y tiempo de contacto menor para su labor de desinfección</li> <li>- Su efectividad no está influida por el pH</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Puede producir subproductos, como bromatos, aldehídos y ácidos.</li> <li>- Requiere gran cantidad de energía en su generación, así como equipos más costosos.</li> <li>- Es muy corrosivo y tóxico (puede formar óxido nítrico y ácido nítrico que causaran corrosiones en los equipos.</li> <li>- No proporciona residual en la red.</li> <li>- Desaparece con rapidez del agua, especialmente a altos pH y temperatura.</li> <li>- Tiene que ser generado in situ</li> </ul>
<b>Permanganato potásico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Oxida y elimina a materias orgánicas precursoras de subproductos</li> <li>- Oxida a sustancias que causan problemas de sabor y olor</li> <li>- Es fácil de aplicar en cuanto a las instalaciones requeridas</li> <li>- No forma los subproductos de los demás oxidantes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Puede teñir el agua de un ligero color rosado si se dosifica en exceso</li> <li>- Requiere largo tiempo de contacto</li> <li>- Es tóxico e irritante de la piel</li> <li>- No es un gran desinfectante.</li> </ul>

Fuente: Adaptado de *Teoría y Práctica de la Purificación del Agua*. Arboleda Valencia Jorge. 1991.

Casi todos los desinfectantes mencionados, presentan alguna limitación, que excluyen su aceptación en las operaciones de tratamiento en sistemas y abastecimientos públicos, por ahora y en general, el cloro es el producto más ampliamente utilizado en el proceso de desinfección del agua. La eficiencia de la desinfección con este agente químico debe analizarse desde tres puntos de vista:

- a. De acuerdo con el tipo de microorganismo que se intenta destruir.
- b. De acuerdo con el compuesto de cloro que se forma en el agua.
- c. De acuerdo con el tiempo de contacto del cloro en el agua.

Se ha visto que los diferentes microorganismos (esporas, quistes, virus o bacterias) tienen distinta sensibilidad a los desinfectantes. En general las esporas

son más resistentes que los quistes y éstos más que los virus o bacterias. A su vez cada uno de dichos microorganismos se comporta en forma diferente, según su especie.

Por otra parte, los cuatro compuestos básicos que se forman en el agua con el cloro: ácido hipocloroso ( $\text{HOCl}$ ), ión hipoclorito ( $\text{OCl}^-$ ), monoclaramina ( $\text{NH}_2\text{Cl}$ ) y dicloramina ( $\text{NHCl}_2$ ) tienen diferente poder desinfectante. Por último el porcentaje de organismos destruidos es función del tiempo de contacto<sup>35</sup>.

1.6.2 Estimación de la Dosis de Cloro. La dosis de cloro ideal que se aplique al agua debe ser la necesaria para destruir todos los organismos patógenos presentes en ella, antes de que sea consumida por la población. La aplicación de esta norma aparentemente simple presenta dos problemas básicos:

- a. El término “*organismos patógenos*” involucra microorganismos tales como bacterias, virus, quistes y esporas que tienen distinta resistencia al cloro.
- b. La necesidad de destruir dichos microorganismos antes de que el agua llegue al consumidor implica una relación entre cantidad aplicada, clase de compuesto desinfectante producido y tiempo disponible.

Por tanto, para poder determinar la dosis de cloro es indispensable fijarse una meta, la cual debe tener en cuenta los siguientes parámetros:

- a. Organismos que se intenta destruir u organismo índice (coliformes, *E. Histolítica* o *Giardia Lamblia*) cuya eliminación se considera como indicativa de que todos los patógenos han muerto.
- b. Tiempo disponible entre el momento en que se aplica el cloro al agua y el momento en que éste es consumido.
- c. Cantidad de cloro que económicamente se debe agregar para destruir el organismo índice en el tiempo de contacto disponible.
- d. Clase de desinfectante que se forma en el agua (*HOCl, OCl, NH<sub>2</sub>, Cl, etc.*) según sea el pH y el contenido de nitrógeno y materia orgánica de ella.

Anteriormente se usaron como organismos índice los coliformes, partiendo del principio de que estos son más resistentes que las salmonellas y shigellas patógenas. Sin embargo, al tomar dicho microorganismo como índice, no se considera la presencia de virus y protozoarios cuya resistencia es varias veces mayor que la de aquellos<sup>36</sup>.

---

<sup>35</sup> ARBOLEDA VALENCIA, Op. cit., p. 617 - 618.

<sup>36</sup> Ibid., p. 632.

## 2. LODOS PROVENIENTES DE LA POTABILIZACIÓN DEL AGUA

Durante la etapa de sedimentación, la cual tiene lugar en los clarificadores o sedimentadores, se genera un manto de lodos que ha retenido la mayor parte de las materias inorgánicas arrastradas por las aguas superficiales, tales como arcillas, arenas finas y limos.

La fuente de los diferentes residuos de una planta de potabilización, así como sus características y cantidades, es función del tipo de tratamiento aplicado, de la composición del agua cruda y de la calidad del producto.

Los principales residuos que se generan son los provenientes de la coagulación química, los cuales están constituidos básicamente por el lodo de los sedimentadores. Este lodo está compuesto por los precipitados de aluminio o de hierro, provenientes del uso de alumbre o de sales de hierro como coagulantes, así como por el material orgánico e inorgánico removido, arena, limo, arcilla, polímeros o ayudantes de coagulación usados, y por el agua de arrastre utilizada para su transporte. Generalmente, los lodos de sedimentadores de agua coagulada son estables, no se descomponen rápido ni causan problemas de septicidad, debido a que la fracción orgánica del residuo, (que sería la principal causante de la septicidad) arrastrada o absorbida, es pequeña<sup>37</sup>.

En una planta en particular, las características del lodo pueden cambiar anual, estacional o diariamente, dependiendo de las condiciones climáticas de la cuenca de donde es captada el agua para el tratamiento de potabilización.

Las características fisicoquímicas de estos lodos dependen del origen del agua cruda y de los sistemas usados en el tratamiento del agua, ya que la mayoría de los sólidos con los que entra el agua cruda al sistema de tratamiento son retenidos, luego de la coagulación-floculación, en la etapa de sedimentación, donde se forma el manto de lodos.

Así por ejemplo, los lodos provenientes de la Coagulación con sales de Aluminio, se considera como un lodo viscoso y coloidal, difícil de manejar y de secar. Algunas características de estos lodos se incluyen en el cuadro 6.

---

<sup>37</sup> ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Purificación del Agua. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2002. p. 290.

*Cuadro 6. Características de Lodos de Sales de Aluminio.*

pH	(6 - 8)
DBO	30 - 300 mg/L
DQO	30 - 5000 mg/L
Sólidos Totales	1% - 2% (típico 1%) del volumen total
Color	Gris a carmelita
Olor	Inodoro
Volumen	20 - 50 L/m <sup>3</sup>
Conteo bacterial	Alto
Sedimentabilidad	50 % en 8 hr.
Secado	2 días sobre lechos de arena para 10% de sólidos

*Fuente: Purificación del Agua. Jairo Alberto Romero Rojas. P. 291.*

Otros coagulantes típicamente usados para la potabilización del agua son las sales de hierro, que pueden generar la producción de un lodo rico en cloruro férrico y en agua de hidratación; difícil de secar y de concentrar. Las características de los lodos de sales de hierro son similares a las de los lodos de sales de aluminio. Sin embargo, el empleo más extendido de los coagulantes de aluminio que los de hierro en la técnica de tratamiento de agua se debe fundamentalmente a consideraciones económicas.

Otra característica de los lodos de plantas de potabilización de agua es que pueden modificar el pH y la capacidad de retención de agua del suelo, aunque tienen poco valor fertilizante. En el cuadro 7, se incluyen las características reportadas por Elliot y Dempsey acerca de algunos lodos evaluados para su aplicación sobre el suelo.

*Cuadro 7. Características de Lodos de Purificación de Agua.*

Sólidos suspendidos	0.01% - 0.1%
DBO	2 - 10 mg/L
DQO	28 - 160 mg/L
pH	6.9 - 7.8
Color	Gris - carmelita - negro
Olor	Inodoro
Conteo bacterial	Alto
Sedimentabilidad	80% en 2 a 24 horas
Secado	Requieren coagulación y sedimentación

*Fuente: Purificación del Agua. Jairo Alberto Romero Rojas. P. 293.*

## 2.1 TRATAMIENTO DE LOS LODOS

De acuerdo con Escobar: “el tratamiento de los residuos líquidos producidos en procesos de tratamiento de agua implica la separación del agua y de los sólidos, al nivel permitido por el método de disposición, por lo que el grado de tratamiento requerido es una función directa del método de disposición final”<sup>38</sup>.

El tratamiento utilizado para los residuos líquidos generados en las plantas de tratamiento consiste básicamente en la reducción del porcentaje de agua contenido en ellos, haciéndolos más concentrados y minimizando, por consiguiente, el volumen a ser dispuesto. Cabe señalar que esos residuos presentan un contenido de humedad superior al 95% cuando no se ha realizado ningún tipo de concentración de los residuos<sup>39</sup>.

La reducción del porcentaje de agua se realiza por medio de procesos de separación de las fases líquida y sólida de los residuos. La fase líquida debe tener cualidades que permitan su recirculación o su vertimiento en cuerpos de agua o a una red de alcantarillado, mientras que la fase sólida debe presentar un volumen suficientemente reducido, de forma que su transporte hacia el destino final sea fácil y de bajo costo y que su concentración de sólidos cumpla las normas exigidas para la disposición final<sup>40</sup>.

Aunque existen varios métodos de tratamiento, ninguno de éstos puede ser generalizado, una vez que no existe una composición típica para los residuos. Además, la disponibilidad de recursos financieros es determinante en la selección del proceso que se adoptará para soluciones a corto, mediano y largo plazo. Por otro lado, uno de los temas más difíciles en el manejo de esos residuos es la optimización global de la planta de tratamiento<sup>41</sup>.

En la Figura 2 se muestran las etapas generalmente involucradas en el tratamiento de los residuos líquidos y semisólidos (lodos) de las plantas de tratamiento de agua potable.

---

<sup>38</sup> ESCOBAR, Juan Carlos. Gestión Integral de Manejo de Lodos de Plantas de Tratamiento de Agua Potable. Bogotá: Acodal, 2004. p. 20.

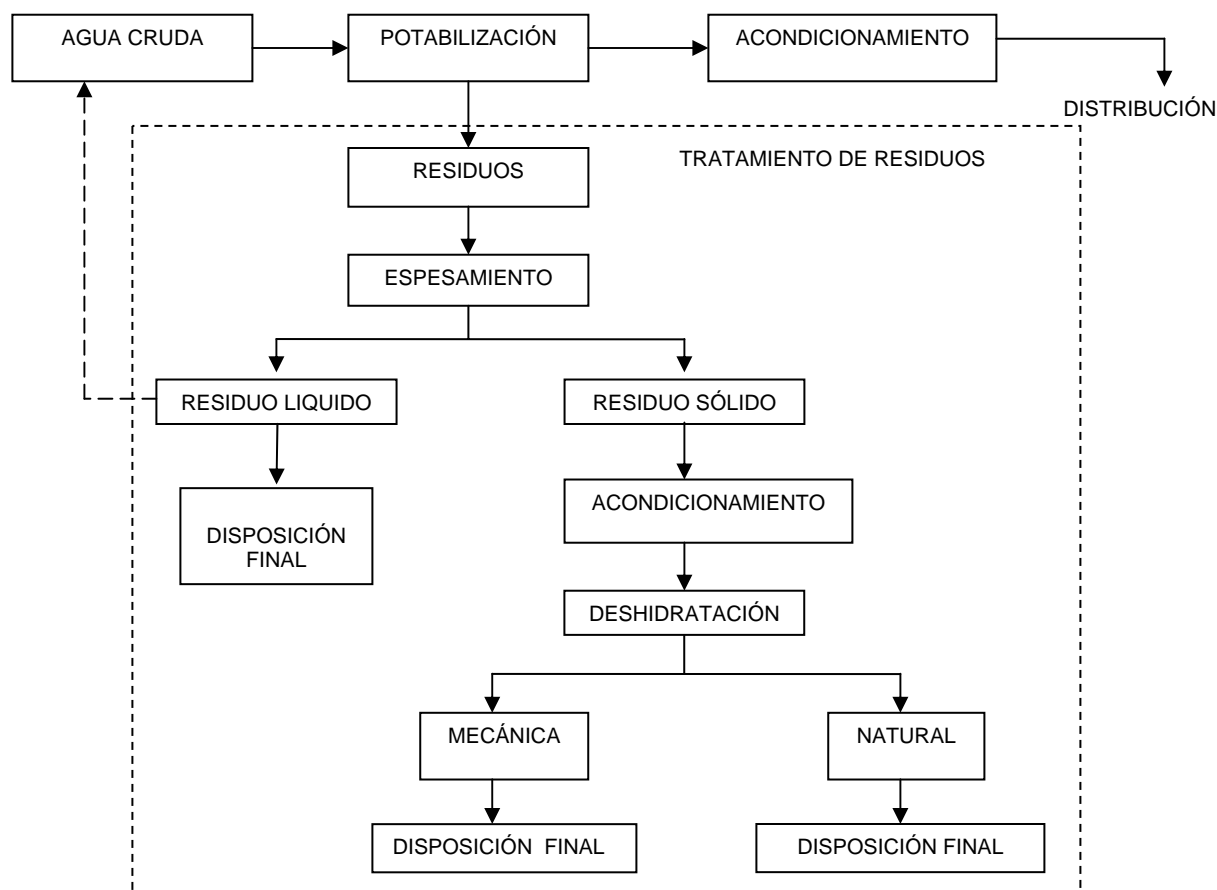
<sup>39</sup> CARVALHO, 1999, citado por ESCOBAR, Op. cit., p. 20.

<sup>40</sup> HILSON, 1980, citado por ESCOBAR, Ibid., p. 20.

<sup>41</sup> ESCOBAR, Ibid., p. 20.



Figura 2. Etapas Involucradas en el Tratamiento de los Residuos de Plantas de Tratamiento.



Fuente: "Gestión Integral de Manejo de Lodos de Plantas de Tratamiento de Agua Potable" – Escobar, Juan Carlos. Acodal.

2.1.1 Espesamiento. El espesamiento de los residuos de Plantas de Tratamiento reduce el volumen de estos produciendo un lodo más concentrado, ayuda a equalizar el lodo para su posterior deshidratación y facilita el proceso de deshidratación; también, si es el caso, facilita el transporte para la aplicación en el terreno.

Los espesadores se usan no solo para incrementar la concentración del lodo, sino también para garantizar una calidad determinada del agua clarificada efluente del tanque espesador, permitiendo la descarga de esta a una fuente receptora, previo cumplimiento de las normas, o su recirculación al inicio del tratamiento.

2.1.1.1 Espesamiento por sedimentación. La suspensión de lodos se introduce en un depósito (tanque espesador) con un tiempo de permanencia determinado (de acuerdo con las características de diseño del tanque espesador), en el que se produce el asentamiento del lodo sobre sí mismo, efectuándose su extracción por

el fondo, mientras que el agua sobrenadante se evacua por la parte superior. El lodo espesado se procesa adicionalmente, o se dispone<sup>42</sup>.

La velocidad ascensional del caudal que se vierte por la parte superior no es un parámetro esencial para el cálculo de las dimensiones de un espesador. Los espesadores pueden ser de tipo sin barrido o mecanizado.

**1. Espesadores sin Barrido.** Se trata de simples cubas, generalmente cilíndricas, de fondo cónico, concebidas como sedimentadores estáticos. La pendiente de la parte inferior debe ser suficiente (50 a 70° de inclinación con relación a la horizontal). Se construyen estos aparatos con diámetros no superiores a 5 m, y, generalmente, no van enterrados<sup>43</sup>.

**2. Espesadores mecanizados.** La cuba cilíndrica, cuya pendiente en el fondo está comprendida, generalmente, entre 10 y 20° con respecto a la horizontal, va equipada de un conjunto mecánico, giratorio, cuyo papel es doble: 1) asegurar la recogida de los lodos depositados en la fosa central colectora de lodos, mediante rastrillos dispuestos en el fondo; 2) facilitar el desprendimiento del agua intersticial y de los gases ocluidos en los lodos, el cual se produce por la acción de un rastrillo vertical, colgado del dispositivo giratorio. El conjunto del dispositivo mecánico es, generalmente, de accionamiento central, con doble brazo diametral. Este debe ser de construcción muy sólida<sup>44</sup>.

2.1.2 Deshidratación. Es la operación unitaria utilizada para reducir el contenido de humedad del lodo por una o varias de las siguientes razones:

- Reducción de los costos de transporte por camión.
- Mayor facilidad de manipulación del lodo espesado.
- Reducción de la producción de lixiviados en el sitio de disposición final donde se evacue el lodo.
- Paso previo necesario si se desea incinerar el lodo.

La deshidratación de los lodos puede realizarse por métodos mecánicos o naturales. El secado natural al aire libre es el método más elemental, en el cual los sólidos se separan del agua libre a través de la sedimentación y evaporación de ésta; otro método consiste en lechos de arena provistos de drenes. Dentro de los métodos mecánicos se destacan la centrifugación y filtros prensa entre otros.

En el cuadro 8, se presenta una descripción de los sistemas de deshidratación natural más utilizados como son los lechos y las lagunas de secado.

---

<sup>42</sup> DEGRÉMONT, Op. cit., p. 460.

<sup>43</sup> Ibid., p. 462.

<sup>44</sup> Ibid., p. 463.


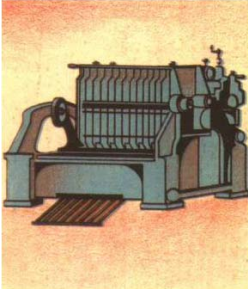
Cuadro 8. Sistemas de Secado Natural

LECHOS DE SECADO	LAGUNAS DE SECADO
<p>- <i>Mecanismos principales:</i> drenaje o percolación, la sedimentación y la evaporación. Generalmente están equipados con bases de arena y grava y con tubería de drenaje.</p> <p>- <i>Principio de funcionamiento:</i> El agua libre de lodos drena por gravedad hacia el lecho de arena y grava; en la parte inferior del lecho el agua es colectada por una serie de tuberías de recolección, para luego ser descargada a un pozo de bombeo para su recirculación a la planta. El agua que sedimenta cuando se separa del lodo se evapora por acción de los factores climáticos, como la radiación solar y humedad relativa principalmente. La eficiencia del lecho de secado de arena se puede mejorar mediante pre-acondicionamiento del lodo con coagulante.</p> <p>- <i>Especificaciones de diseño típicas:</i> capa de lodo (15 – 30 cm); número mínimo de lechos (2); drenaje en tubería perforada (4"); capa de arena (15 – 25 cm de espesor); tamaño efectivo de la capa de arena (0.3 – 1.2 mm); lecho de grava (20 – 30 cm de espesor).</p>	<p>- <i>Principio de funcionamiento:</i> el secado de los lodos se realiza por la separación del sobrenadante y aguas lluvias y, principalmente, por la evaporación de las mismas.</p> <p>- <i>Carga de aplicación de sólidos típica:</i> 40 Kg/m<sup>2</sup> para zonas lluviosas y 80 Kg/m<sup>2</sup> en regiones secas. (ESCOBAR, 2004)</p> <p>- Difieren de los lechos de secado en que operan con cargas iniciales mucho más altas y tienen mayores tiempos de secado entre limpiezas. Se llenan durante un periodo largo (3 a 12 meses) y se deja secar por periodos largos de tiempo durante la fase de evaporación, las capas inferiores no secan. Algunas instalaciones han descubierto que remover el lodo durante el ciclo de evaporación ayuda a exponer todos los ciclos al secado. (ESCOBAR, 2004)</p>



Fuentes: teoría tomada de ESCOBAR, 2004 y ROMERO ROJAS adaptada por la Autora.

En el cuadro 9 se presenta una descripción de los sistemas de deshidratación mecánica más utilizados.

Cuadro 9. Sistemas de Deshidratación Mecánica

	GRÁFICO	DESCRIPCIÓN
<b>FILTROS AL VACÍO</b>	 <p data-bbox="358 810 659 856">www.enonet.it/es/viewprod.asp/cmds</p>	<p data-bbox="675 338 1474 905">La remoción del agua contenida en el lodo se realiza por un vacío creado dentro de un tambor recubierto, externamente, con un tejido filtrante que usualmente consiste en una malla tejida y es suficientemente fino como para retener una torta tina de lodos sólidos a medida que se forma. Al girar parcialmente sumergido en un recipiente con lodo acondicionado, el vacío provoca un flujo de líquido hacia el interior del cilindro, permitiendo la retención de las partículas mayores que los poros del material filtrante y, además, de las partículas de tamaño inferior que se adhieren al material ya filtrado, la torta, en la superficie externa del tambor. Cuando se aplica el vacío en esta zona, produce la filtración del agua que pasa, dejando una torta formada sobre el tejido. La próxima zona, la zona de secado de la torta, representa del 40 al 60% de la superficie del cilindro; en esta zona la humedad se retira de la torta por vacío. La zona termina en el punto en que se corta el vacío. Finalmente, la torta de lodo entra en la zona de descarga, donde es retirada del medio (AWWA, 2002).</p> <p data-bbox="675 940 1474 1241">Existen muchos tipos de filtros de vacío, cada uno de los cuales está sujeto a la misma limitación, que es que la máxima presión diferencial teórica que puede aplicarse es la atmosférica (14.7 psi). El lodo, para facilitar su deshidratación, está normalmente acondicionado con un coagulante o el recipiente posee una alimentación de un producto como cenizas volantes. La producción del filtro se define como la masa de torta de sólidos secos descargada del medio filtrante por hora y m<sup>2</sup> de filtro (AWWA, 2002), citado por ESCOBAR (2004).</p>
<b>FILTRO PRENSA</b>	 <p data-bbox="370 1566 646 1612">www.inicia.es/dc/novarunda/filtro.htm</p>	<p data-bbox="675 1247 1474 1514">En el secado con este método el proceso es generalmente en cochada, con presiones a través del medio de filtración de hasta 1725 Kpa, 250 psi, para obtener lodos con un 40% de sólidos. El filtro prensa está conformado por una serie de placas verticales, las cuales soportan un medio filtrante de tela y retienen la pasta en la superficie del tejido. Las placas están soportadas rígidamente dentro de un marco metálico formando una serie de cámaras huecas.</p> <p data-bbox="675 1556 1474 1717">El lodo se dosifica dentro de la prensa a presiones incrementables por cerca de media hora, las placas son presionadas unas con otras y el agua pasa a través de la tela de filtración mientras que los sólidos son retenidos; se forma así una pasta que se remueve al despresurizar la prensa.</p>

Cuadro 9. Sistemas de Deshidratación Mecánica

<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);"><b>FILTRO BANDA</b></p>	 <p><a href="http://www.geocities.com/jerrq22/secado.html">www.geocities.com/jerrq22/secado.html</a></p>	<p>En los filtros de banda, la remoción del agua incluye tres etapas: un acondicionamiento químico, usualmente con polielectrolito orgánico; un drenaje y espesamiento gravitacional a una consistencia no fluida; y, posteriormente, la compresión del lodo, a baja presión, entre dos bandas sin fin que atraviesan un conjunto de rodillos ajustables de variados diámetros, siguiendo un camino en forma de "S".</p> <p>El camino en "S" produce en el lodo una fuerza de cizallado, que ayuda al proceso deshidratador. La fuerza de compresión y cizalladura que actúan sobre el lodo se incrementan a lo largo de esta etapa deshidratadora. La torta de lodo final se retira de las cintas por medio de cuchillas. Un acondicionamiento típico de los lodos consta de un tanque de almacenamiento del acondicionador químico, bombas dosificadoras, equipo de mezcla (de producto químico y producto químico / lodo), controles y tuberías de proceso.</p>
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);"><b>CENTRÍFUGAS</b></p>	 <p><a href="http://www.geocities.com/jerrq22/secado.html">www.geocities.com/jerrq22/secado.html</a></p>	<p>La centrifugación, en definitiva es una decantación que tiene lugar en un decantador cilíndrico que gira a gran velocidad; esta rotación origina un campo centrífugo equivalente a varios miles de veces la fuerza de la gravedad precipitándose por tanto el lodo deshidratado en las paredes interiores del cilindro giratorio.</p> <p>Las centrifugas industriales convencionales están formadas por un cuerpo cilíndrico rotatorio o rotor en cuyo interior gira en el mismo sentido y también a gran velocidad, aunque algo menor que el rotor, un tornillo helicoidal que va arrastrando hacia el exterior los sólidos que se han ido acumulando en las paredes interiores del rotor. La entrada del lodo al rotor de la centrifuga tiene lugar por un tubo central. El tornillo helicoidal arrastra el lodo retirado de las paredes internas del rotor hacia el exterior por un extremo, mientras que el agua clarificada sale por el extremo opuesto.</p>

Fuente: "Gestión Integral de Manejo de Lodos de Plantas de Tratamiento de Agua Potable" – Escobar, Juan Carlos. Acodal.

A continuación, en el cuadro 10, se presenta una comparación entre los sistemas de secado natural y los sistemas de deshidratación mecánica de acuerdo con sus ventajas y desventajas.

Cuadro 10. Ventajas y Desventajas de los Sistemas de Deshidratación Natural y Mecánica.

	Ventajas	Desventajas
<b>Sistemas de secado natural</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Menor costo de implementación (siempre que se disponga del área suficiente a bajo precio)</li> <li>- Bajo consumo de energía y de productos químicos</li> <li>- Baja sensibilidad a las variaciones cuantitativas y cualitativas del lodo</li> <li>- Simplicidad de operación</li> <li>- Apropriadas para plantas pequeñas o aisladas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Altas exigencias de superficie</li> <li>- Alta dependencia de las condiciones climáticas</li> <li>- Alto requerimiento de mano de obra para la remoción del lodo</li> </ul>
<b>Sistemas de deshidratación mecánica</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Necesitan áreas menores</li> <li>- Independencia de las condiciones meteorológicas</li> <li>- Minimización de ciertos impactos ambientales</li> <li>- Mayor eficiencia en menos tiempo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mayor consumo de energía</li> <li>- Necesidad de utilizar acondicionantes químicos adecuados</li> <li>- Alta sensibilidad a las variaciones cuantitativas y cualitativas del lodo</li> <li>- Necesidad de un lavado frecuente de las telas filtrantes y otros equipos en contacto directo con el lodo</li> <li>- Eventuales problemas de ruido</li> <li>- Vibraciones excesivas provocadas por el funcionamiento de bombas y motores</li> </ul>

Fuente: Extraído del documento "Gestión Integral de Manejo de Lodos de Plantas de Tratamiento de Agua Potable" – Escobar, Juan Carlos. Acodal.

La selección de uno u otro método de deshidratación depende de las necesidades propias de la Planta de Tratamiento, entre las cuales se encuentran, disponibilidad de área, inversión inicial, producto final deseado, proyección económica a largo plazo, etc.

## 2.2 DISPOSICIÓN FINAL DEL LODO

En general se debe considerar la disposición final como la última etapa dentro de una estrategia general de manejo de lodos. La disposición depende de las características del lodo. El sitio para la disposición debe contar con sistemas técnicos de operación y diseño sencillos, con mínimos requerimientos de operación, control, supervisión y mantenimiento.

Dentro de los residuos producto de la potabilización del agua, se encuentran los residuos líquidos (agua sobrenadante) y los lodos. Es importante que luego de someter el lodo proveniente del tratamiento del agua, a cualquier tratamiento de los anteriormente mencionados, éste sea dispuesto de la mejor manera buscando

el menor riesgo de impacto ambiental y tratando de darle un uso benéfico, tanto al lodo, como al agua sobrenadante.

Es así que, teniendo en cuenta que el agua sobrenadante es inherente al proceso de tratamiento del lodo, se habla de un reciclaje de esta agua como parte de la búsqueda de un manejo adecuado de estos residuos. El reciclaje de residuos líquidos en el inicio del tratamiento de una Planta de Potabilización es parte integral de sus operaciones y es de especial interés en la minimización de gastos y reuso del agua en la industria de la potabilización.

Los residuos generados en las operaciones y procesos de las Plantas de potabilización que pueden ser reciclados al inicio del tratamiento provienen principalmente de:

- 1) Tanques de clarificación y sedimentación.
- 2) Sobrenadante del espesamiento de lodos.
- 3) Residuos líquidos de operaciones de deshidratación
  - a) Filtros prensa
  - b) Centrífugas
  - c) Lechos de secado de arena

El reciclaje de esas aguas puede afectar el proceso de tratamiento propiamente dicho, alterando la calidad del agua tratada. Los impactos pueden ser causados por los propios sólidos, por los componentes del residuo reciclado o por contaminantes liberados del lodo. Es limitada la literatura existente acerca de las características de los volúmenes reciclables o exigencias efectivas referentes al volumen reciclado<sup>45</sup>.

2.2.1 Métodos de Aplicación y Disposición de Lodos. En la producción de agua potable deben evaluarse las actuales prácticas de disposición de los lodos generados durante el tratamiento e incentivar la investigación en torno a nuevas tecnologías de disposición y/o reducción en la producción de los mismos.

El manejo, tratamiento y disposición de los lodos deben ser considerados de manera integral como parte del sistema de tratamiento de agua y no como una solución al final del tubo.

Una solución integral permite reducir la generación de lodos y mejorar las características del mismo facilitando su tratamiento, su valorización o uso potencial y reduciendo los costos.

2.2.1.1 Disposición de Lodos en el Ambiente Acuático. Una de las práctica más usuales en el manejo de los residuos de plantas de aguas es descargarlos directamente a las corrientes naturales de agua (ríos, lagos, lagunas, etc.). Sin

---

<sup>45</sup> ESCOBAR, Op. cit., p. 37.

embargo, en la medida que los recursos hídricos se vuelven más escasos y las normas medioambientales se vuelven más participativas en la búsqueda de la protección y conservación de los recursos, nace la necesidad de reevaluar dicho procedimiento y de fomentar la búsqueda de nuevas alternativas que permitan evitar la descarga de estos residuos a los cuerpos de agua. En el cuadro 11, se presentan los efectos más representativos de esta práctica.

*Cuadro 11. Consideraciones Ambientales de la Descarga de Lodos a los Cuerpos de Agua.*

CAUSA	EFEECTO
Descarga de lodos de plantas de potabilización de agua sobre ríos y lagos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Formación de depósitos, o bancos de lodos, en las zonas de baja velocidad de flujo.</li> <li>- Dichos depósitos cubren a los organismos bénticos y alteran la cadena alimenticia de los peces.</li> <li>- Reducción de la calidad estética de la fuente receptora al aumentar la turbiedad del agua.</li> <li>- El aumento de turbiedad puede disminuir la actividad fotosintética</li> <li>- Pérdida del valor recreacional del agua y su uso para esparcimiento (debido al incremento de sólidos suspendidos y de turbiedad)</li> </ul>
Descarga de aguas de lavado de filtros	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Riesgo de contaminación bacterial patogénica</li> <li>- Riesgo de aumento en el crecimiento microbiano del agua</li> </ul>
Descarga de aguas de carbón activado	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Creación de colores oscuros negros en el agua y pérdida de su valor estético y recreacional.</li> </ul>
Descarga de Lodos de alumbre	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Efectos tóxicos, por exceso de aluminio, sobre algunos organismos acuáticos.</li> </ul>

*Fuente: Extraído del libro Purificación del Agua. Jairo Alberto Romero Rojas.*

2.2.1.2 Relleno y Monorelleno. Tradicionalmente existen dos opciones de disposición de los lodos generados en plantas de tratamiento: relleno sanitario y monorelleno. Para ello, existen una serie de criterios a considerar en su implementación de tal forma que garanticen tanto el adecuado funcionamiento como la salud pública de la población y el ambiente<sup>46</sup>.

Algunos aspectos a tener en cuenta para el diseño son:

- Características hidrogeológicas del terreno en el que será construido el relleno y sus alrededores.
- Proximidad y distancia a los puntos de uso del agua subterránea.
- Calidad, cantidad y dirección de flujo de las aguas subterráneas.
- Volumen, características físicas y químicas del lixiviado<sup>47</sup>.

<sup>46</sup> ESCOBAR, Op. cit. p. 43.

<sup>47</sup> ESCOBAR, Ibid., p. 44.



Los requerimientos operacionales del relleno deben considerar la seguridad de la gente incluyendo los operadores del mismo y el medio ambiente. Se recomienda tener en cuenta las siguientes medidas para implementar en todos los rellenos:

- Excluir residuos peligrosos y Bifenilos Policlorados PCBs
- Aplicar material de cobertura
- Control de vectores
- Monitorear frecuentemente el metano producido
- Eliminar quemas a cielo abierto
- Control en el acceso público
- Control de descargas de aguas superficiales
- Impedir la disposición de residuos líquidos
- Guardar los documentos de implementación y requerimientos operacionales.

Para la disposición de estos lodos en rellenos sanitarios deben concentrarse los sólidos a estado semisólidos o forma pastelosa, seguido de un tratamiento de secado. Además, debe controlarse el área de disposición en el relleno sanitario, cuidando los problemas de olores y las posibles fallas que se puedan presentar<sup>48</sup>.

2.2.1.3 Aplicación de Lodos al Suelo. La opción de aplicación en el suelo de lodos provenientes de plantas de tratamiento de agua potable incluye el uso agrícola, aplicación en silvicultura, aplicación para la recuperación de terrenos o zonas degradadas.

Los problemas más importantes asociados con la aplicación de los lodos de plantas de tratamiento en los suelos son: la incorporación de metales en estos y en las aguas subterráneas, adsorción del fósforo del suelo, disminución de la productividad del suelo y aplicación excesiva de nitrógeno al agua subterránea<sup>49</sup>.

De acuerdo con lo expuesto en la siguiente figura (Figura 3), para llevar a cabo una aplicación de estos lodos en el suelo, lo primero y más importante que debe realizarse, es una caracterización fisicoquímica de los mismos, ya que de los resultados que de ella se obtengan, depende en buena parte la toma de decisiones; y para esto es importante tener presente la legislación vigente con relación al uso del suelo puesto que si en los resultados de la caracterización se obtiene que los lodos sobrepasan los límites aceptables de metales, por ejemplo, ya se consideraría como un residuo peligroso y no podría ser usado para tal fin.

Por otro lado hay que tener en cuenta las opciones en este tipo de tratamiento (como recuperación de suelos, disposición en relleno, etc.) y, en un acto de participación pública, elegir la más conveniente de acuerdo con la disponibilidad de recursos. Una vez se selecciona la alternativa, se debe seguir el orden en el procedimiento explicado en la figura con lo que se pretendería llegar a la

---

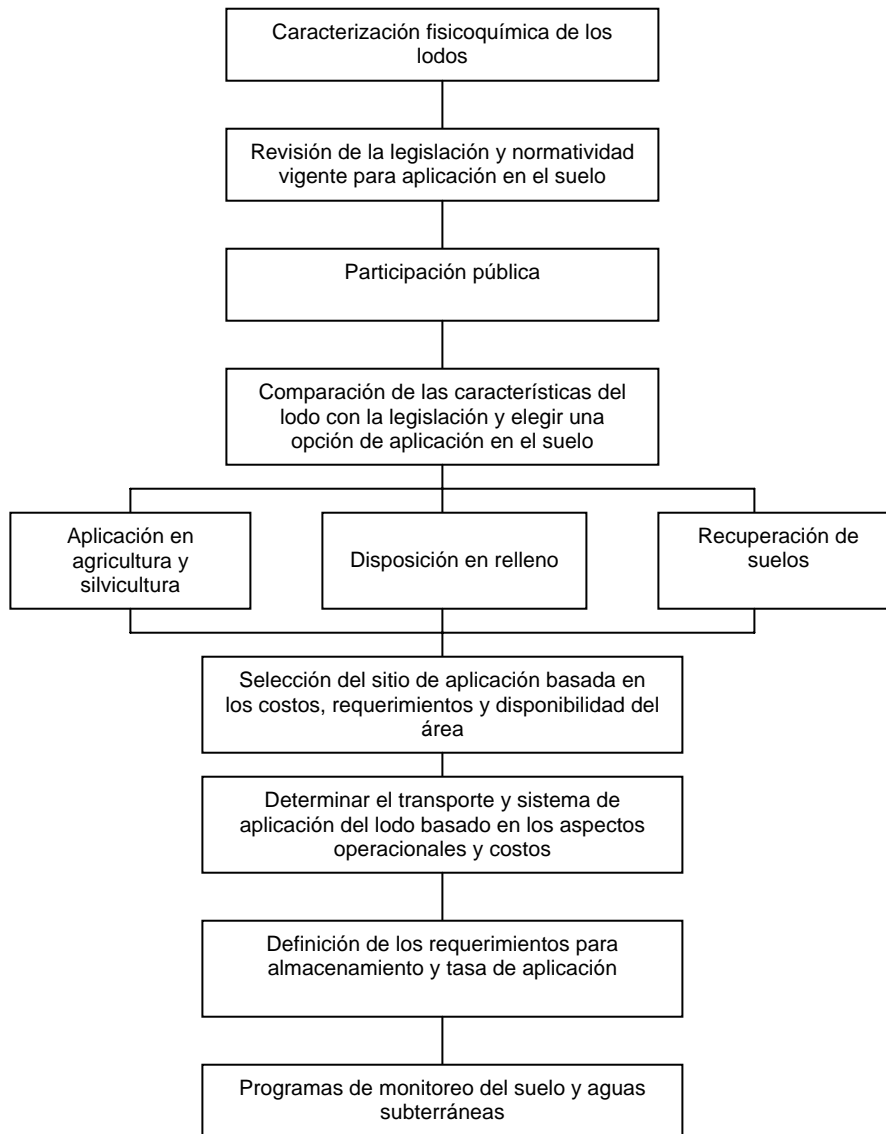
<sup>48</sup> RAS, 2000.

<sup>49</sup> Escobar, Op. cit., P. 47.

obtención de resultados a través del seguimiento del mismo proyecto.

La Figura 3 simplifica la planeación y el procedimiento a seguir para la aplicación en el suelo de lodos de plantas de tratamiento de agua.

Figura 3. Procedimiento simplificado para la aplicación de lodos de plantas de tratamiento en el suelo



Fuente: “Gestión Integral de Manejo de Lodos de Plantas de Tratamiento de Agua Potable” – Escobar, Juan Carlos. Acodal.

La aplicación moderada de lodos de plantas de tratamiento puede mejorar las condiciones físicas del suelo, por la floculación de partículas coloidales que

favorecen la agregación del suelo mediante reacciones análogas al tratamiento del agua.

Los óxidos de hidrógeno metálicos contenidos en los lodos de plantas de tratamiento son fuertemente absorbentes de metales traza y fósforo. En términos de los metales traza, la aplicación de lodo en el suelo puede resultar beneficiosa, reduciendo o eliminando estas concentraciones en el suelo. Caso contrario de lo que ocurre con la absorción del fósforo del suelo, el cual es un elemento esencial en el mismo<sup>50</sup>.

Para la aplicación de lodos de plantas de tratamiento en suelo para uso agrícola, deben evaluarse los efectos que puede tener sobre la fertilidad y propiedades físicas del suelo. Las características físicas determinarán si las plantas pueden tener suficiente soporte para su crecimiento, esto incluye la cohesión, agregación, fuerza y textura. Estos parámetros afectan directamente las propiedades hidráulicas del suelo como la capacidad de mezcla, infiltración, permeabilidad y drenaje. La inadecuada aplicación de estos lodos puede ocasionar la degradación del suelo y la calidad de las aguas subterráneas.

La aplicación de lodos de plantas de tratamiento en la silvicultura es poco común. De acuerdo con diferentes investigaciones realizadas, se ha encontrado los siguientes efectos por la aplicación de lodos: efectos poco significativos en el crecimiento de los árboles, bajos niveles de nutrientes, disminución leve del contenido de fósforo e incremento del pH del suelo<sup>51</sup>.

---

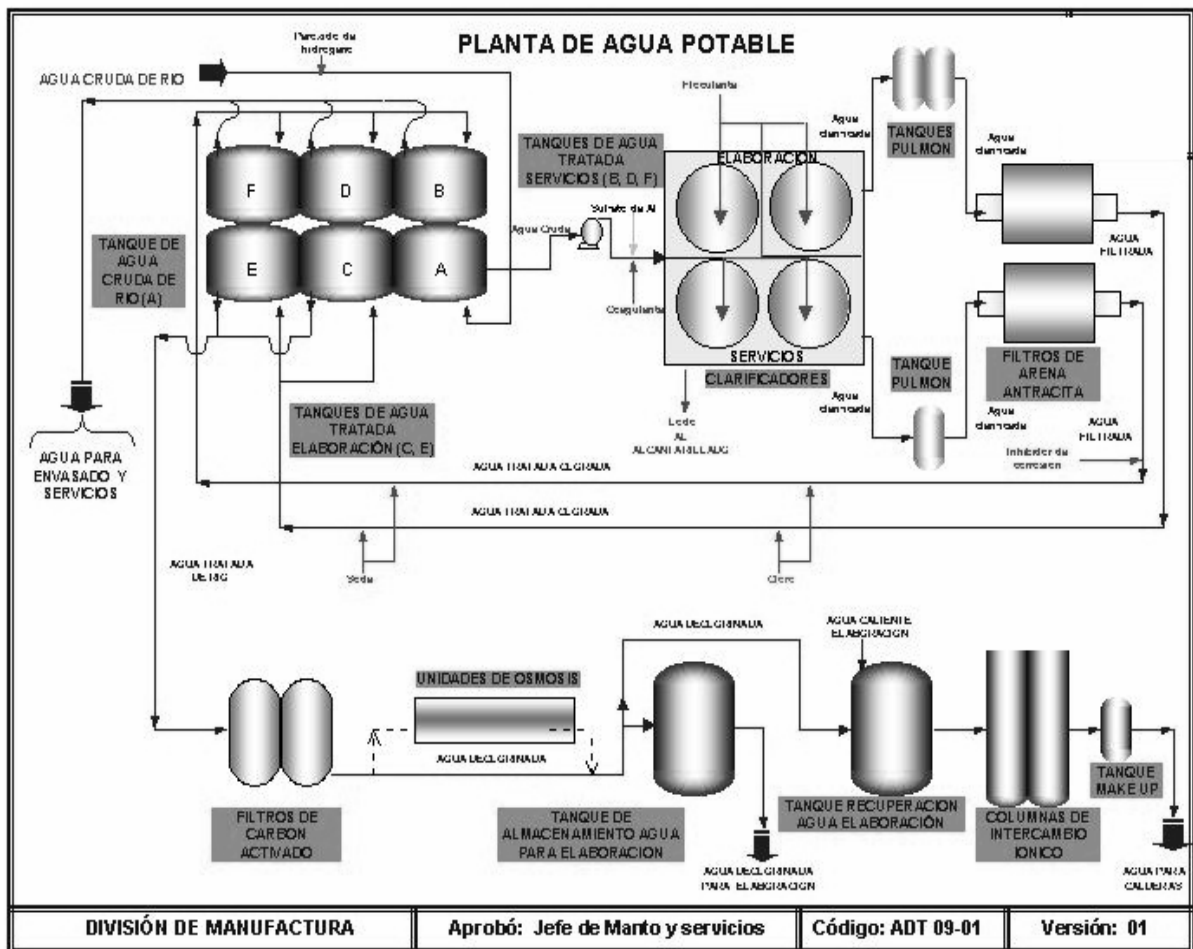
<sup>50</sup> ESCOBAR, Op. cit., p. 51.

<sup>51</sup> Ibid., p. 52.

### 3. EL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUA EN CERVECERÍA LEONA

En la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) de la cervecería Leona S.A, ubicada en el Km. 30 sobre la vía Bogotá – Tocancipá, se realiza un tratamiento de potabilización que consta de: almacenamiento de agua cruda, coagulación, floculación, sedimentación, filtración, desinfección, estabilización del pH y almacenamiento y distribución del agua tratada. En la Figura 4 se presenta un esquema de la Planta de Agua Potable de la Cervecería.

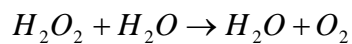
Figura 4. Esquema de la Planta de Tratamiento de Agua Potable de la Cervecería Leona S.A.



Fuente: Cervecería Leona S.A.

El agua para el tratamiento es captada a través de cinco bombas, tipo centrífuga, con acople flexible de 18 HP, ubicadas en una plataforma de captación en la ribera del Río Bogotá, Finca Britalia, para ser enviada hacia el tanque de almacenamiento de agua cruda (1500 m<sup>3</sup> de capacidad). Es de anotar que la Cervecería cuenta con una concesión de agua del Río Bogotá de 150 L/s.

Al agua cruda de río, antes de entrar al tanque de almacenamiento, se le adiciona *Peróxido de Hidrógeno*, en dosis de 3 ppm; esta dosificación es realizada desde el punto de vista microbiológico después de realizar pruebas de contacto. La reacción que se presenta en el agua al adicionar el peróxido es la siguiente, en donde el O<sub>2</sub> oxida y desinfecta porque rompe la membrana celular de las bacterias:



El caudal de operación de la Planta es de 792 GPM, el cual corresponde a la capacidad máxima de diseño de la Planta. El caudal es regulado mediante la operación de las válvulas existentes en la descarga de las bombas de agua cruda, y es medido en el totalizador de volumen de agua instalado en la línea de agua cruda, cronometrando la cantidad de agua que pasa en un minuto.

Del tanque de almacenamiento de agua cruda, el agua es conducida hacia los clarificadores. En la PTAP hay cuatro clarificadores, dos diseñados para tratar agua cruda de pozo o de río y los otros dos diseñados para tratar agua cruda de río únicamente. Los dos primeros tienen una capacidad de 50 L/s cada uno y los otros dos tienen una capacidad de 75 L/s cada uno, con un total de 250 L/s de capacidad.

Aunque actualmente en la planta se está tratando únicamente agua de río, es posible tratar agua de pozo profundo, la cuál se utiliza para contingencias, en caso de que el agua de río no tenga la disponibilidad por razones técnicas o de calidad.

Los clarificadores con capacidad de 50 L / seg., cuentan cada uno con una torre de aireación distribuida en bandejas (Ver foto 1), las cuales contienen material de relleno (anillos pall-ring). Con esta torre de aireación se busca desgasificar el agua, para permitir su posterior tratabilidad en el clarificador, debido al alto contenido de gas carbónico que tiene el agua de pozo que dificulta la sedimentación en el clarificador.

Los clarificadores con capacidad de 75 L / s, no cuentan con torres de aireación (Ver foto 2), ya que para el agua cruda de río no se requiere efectuar tal operación, ya que esta no contiene gas carbónico gracias a su contacto con el aire y a su movimiento superficial que favorece la aireación.

*Foto 1. Clarificador con Torre de Aireación para Tratar Agua de Pozo*



*Fuente: Cervecería Leona S.A.*

*Foto 2. Clarificador para tratar Agua de Río - Vista Lateral*



*Fuente: Cervecería Leona S.A.*

El principio de funcionamiento de los clarificadores es el siguiente:

El agua cruda es introducida en la cámara de entrada, de donde pasa por gravedad a la zona primaria de mezcla y reacción, en la cual es mezclada con los productos químicos (Polímero coagulante y ayudante de floculación) en la presencia de sólidos formados durante reacciones anteriores, circunstancia que permite acelerar las reacciones.

La mezcla es movida completamente hacia arriba por el rotor impulsor dentro de la zona secundaria de mezcla y reacción, donde continúa el contacto con los sólidos llevando las reacciones hasta el equilibrio.

En la zona secundaria de mezcla y reacción, mediante la recirculación se transporta el lodo hacia abajo a través del espacio comprendido entre las dos chimeneas, descargándolo hacia afuera y hacia abajo sobre la superficie del manto de lodos en la parte externa de la cámara de floculación.

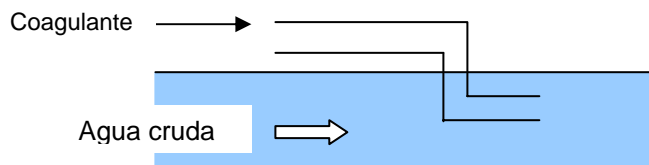
El lodo circula hacia abajo y pasa por debajo de la campana a la zona primaria de mezcla y reacción. El agua tratada se separa de la superficie del manto de lodos y pasa completamente a través de los orificios de la canaleta colectora a una rata igual a la rata de flujo de entrada de agua cruda.

Existen tres concentradores de lodos, los cuales son compartimentos abiertos en la parte superior y se encuentran localizados bajo la superficie del manto de lodos. En ellos se almacena una porción de los lodos que están en recirculación y se concentran para formar un lodo más pesado, el cual es automáticamente descargado a un drenaje mediante la acción de un temporizador, a una rata de flujo igual a la de formación de sólidos por el tratamiento. De esta forma se mantiene constante y en un valor óptimo la cantidad de lodos en recirculación<sup>52</sup>.

### 3.1 COAGULACIÓN

El proceso de coagulación comienza en el momento en que el agua es mezclada con el coagulante el cual es inyectado sobre la tubería de conducción hacia el clarificador, en la descarga de las bombas de agua cruda (ver figura 5), y es introducida en la zona primaria de reacción del clarificador, donde empiezan a formarse las partículas denominadas coágulos.

Figura 5. Esquema del Punto de Aplicación del Coagulante en la PTAP de Cervecería Leona



Fuente: Asesor del Proyecto.

El coagulante utilizado en este caso es el sulfato de aluminio, aplicado en solución sobre la línea de agua cruda de forma tal que cuando el agua llega al bolsillo del clarificador, el coagulante ya ha tenido un tiempo suficiente para reaccionar con el agua (1 minuto aprox.) y se han producido las primeras partículas o coágulos.

### 3.2 FLOCULACIÓN

<sup>52</sup> TECNIAGUAS. Manual para sistemas de tratamiento de agua: Cervecería Leona. Tomo 1.

Para facilitar esta operación se aplica, en la zona primaria de mezcla y reacción del clarificador, un polímero ayudante de floculación (8173 Marca Nalco) aniónico de mediana carga y mediano peso molecular en un dosis de 0.3 – 0.4 ppm, que reacciona con las partículas o coágulos ya formados que están llegando a esta zona.

El agua junto con las partículas de coágulos, es sometida a una agitación controlada con un agitador mecánico a una velocidad de 7 rpm para facilitar el contacto entre partículas y favorecer así su crecimiento, transformándose en partículas con mayor tamaño, peso y velocidad de sedimentación que los coágulos. Las partículas así formadas se denominan flóculos y el proceso de agitación y aglomeración requerido para su formación se llama *floculación*.

La operación de agitación y mezcla dentro del clarificador se logra mediante un conjunto llamado rotor impulsor, el cual está compuesto por: un motorreductor con variador de velocidad instalado en la parte superior del clarificador; un rotor tipo turbina, similar a un impulsor tipo cerrado, de una bomba centrífuga con apertura ajustable para tener la posibilidad de modificar el grado de recirculación de los lodos, ensamblado con una serie de aspas verticales formando un círculo y, por último, un eje para acople entre el motorreductor y el rotor<sup>53</sup>.

### 3.3 SEDIMENTACIÓN

El proceso de crecimiento de partículas se acelera aún más mediante la *recirculación de lodos*, la cual consiste en poner en contacto los lodos ya formados que contienen partículas pesadas de alta velocidad de sedimentación, con las partículas o coágulos recién formados por la adición de los productos químicos al agua, facilitando así el crecimiento y posterior sedimentación de estas últimas.

Los lodos ya formados se encuentran depositados en los concentradores de lodos de los clarificadores. Cuando estos concentradores se llenan (es decir, que sobrepasan el límite permitido para garantizar la calidad de clarificación en el agua), son descargados para que salgan al drenaje o desagüe de la planta. Si no se hiciera esto, la acumulación de lodo sería excesiva y produciría un gran arrastre de flóculos hacia la zona de agua clarificada.

Por otra parte no es conveniente eliminar o drenar completamente los lodos que se producen ya que una de las características del tratamiento es el contacto de flóculos livianos recién formados con flóculos pesados anteriores, lo cual acelera el crecimiento y facilita la sedimentación; además de que los lodos pesados tienden a mantenerse en suspensión a una cierta altura formando un manto a través del cual se filtra el agua y en el que se retienen flóculos pequeños<sup>54</sup>.

---

<sup>53</sup> TECNIAGUAS, Op. cit., tomo 1.

<sup>54</sup> Ibid., tomo 1.



Los concentradores de lodos están provistos de un colector con válvula de diafragma accionada neumáticamente activada mediante un temporizador para la evacuación periódica de los lodos con un periodo de duración de unos 60 segundos. Esta descarga está programada para que ocurra cada 10 minutos aproximadamente.

El nivel del manto de lodos debe mantenerse entre 40 cm y 80 cm, leídos en la reglilla indicadora del clarificador (ver foto 3). Lo ideal es tratar de mantener este nivel en el punto de ajuste que es de 60 cm, para evitar un desbordamiento o paso de partículas floculadas hacia el tanque que se encuentra unido al clarificador, denominado de equilibrio o tanque pulmón (Ver foto 4).

El agua clarificada, pasa al tanque de equilibrio o tanque pulmón, en el cual se almacena el agua libre de flóculos que rebosa de los clarificadores a través de las bandejas perforadas. Cada tanque tiene una capacidad de 20 m<sup>3</sup> y su función es recibir el agua clarificada y enviarla por bombeo a las baterías de filtros correspondientes a cada clarificador.

*Foto 3. Reglilla Interna de los Clarificadores para controlar Nivel del Manto de Lodos.*



*Fuente: Cervecería Leona S.A. Nivel Óptimo de 60 cm.*

*Foto 4 . Entrada de Agua Clarificada al Tanque Pulmón.*



*Fuente: Cervecería Leona S.A.*

### 3.4 FILTRACIÓN

Cuando el agua clarificada sale del tanque pulmón, el flujo es distribuido a través de los filtros, los cuales cumplen la función de remover las partículas o impurezas suspendidas en el agua, las cuales, debido a su tamaño tan pequeño y peso liviano, no pudieron ser removidas durante los procesos de coagulación-floculación y alcanzaron a pasar en el agua clarificada.

La filtración se efectúa con tres filtros por cada clarificador de 50 L y cuatro filtros para los 2 clarificadores de 75 L, con una capacidad entre 400 Gal/min para los primeros y 600 Gal/min para los segundos. Los filtros se encuentran conectados en paralelo (Ver foto 5).

Cada filtro contiene un material de medio mixto (Arena-Antracita), de granulometría apropiada (con un tamaño efectivo de 0.8 – 1.2 mm para la arena y de 1.5 – 1.8 mm para la antracita) y descendente, el cual retiene las partículas suspendidas en el agua, cuando ésta se hace pasar a través de ese lecho de material granular.

La operación de filtración ocurre de la siguiente manera: el agua atraviesa el lecho filtrante en el sentido de arriba hacia abajo, permitiendo que las partículas sean adsorbidas sobre la superficie de los granos del material o queden atrapadas en las aperturas que hay entre los granos. Este proceso puede ocurrir varias veces, hasta que el lecho filtrante se sature, hecho en el cual la presión diferencial (la cual puede ser mediada por medio de los manómetros instalados en el filtro) se incrementa hasta alcanzar valores de 15 psi, momento en el cual se debe parar el funcionamiento del filtro y efectuar la operación de retrolavado.

Una vez se ha saturado el lecho, se hace necesario eliminar las partículas retenidas mediante la operación de retrolavado, en la cual se invierte el sentido de flujo de agua (el flujo de lavado requerido es de 900 GPM y la rata de lavado es de 10 GPM/pie<sup>2</sup>), es decir, atraviesa el lecho filtrante de abajo hacia arriba, expandiéndolo y haciendo que los granos se froten unos con otros eliminando así las partículas indeseables retenidas, las cuales son arrastradas en el agua que sale y que es enviada al alcantarillado de la Planta. La duración de esta etapa es de 5 a 10 minutos normalmente. Esta operación se realiza cada 15 días aproximadamente, y depende de las características de turbiedad del agua que alimenta el filtro.

Después del retrolavado, se realiza un enjuague (con una duración de 3 a 5 minutos), cuya operación es similar a la filtración normal, y con el que se busca remover alguna pequeña cantidad de partículas indeseables, garantizando así la completa limpieza de los filtros. El agua producto del enjuague, también es enviada al alcantarillado de la planta.

Foto 5. 1. Batería de Filtración para Clarificadores de 50 L – 2. Batería de Filtración para Clarificadores de 75 L.



Fuente: Cervecería Leona S.A.

### 3.5 DESINFECCIÓN

La desinfección del agua se realiza con cloro gaseoso (con el cual se garantiza la calidad microbiológica del agua) y se adiciona a la salida de los filtros de arena antracita en forma líquida, de tal manera que el agua contenga entre 0.3 y 1.8 mg/L de cloro residual libre a la salida del tanque de almacenamiento de agua tratada. Se le adicionan entre 5 y 6 ppm, aunque es de resaltar que estos valores pueden variar dependiendo de la calidad microbiológica del agua.

Para lograr la dosificación del cloro, se extrae del cilindro de manera gaseosa y se mezcla con agua formando una solución con una concentración aproximada de 100 ppm, y se le adiciona en línea al agua filtrada, como ya se mencionó anteriormente.

### 3.6 ALMACENAMIENTO Y DISTRIBUCIÓN DE AGUA TRATADA

El agua clorada es almacenada en los tanques de almacenamiento denominados con las letras B, C, D, E y F (Ver figura 13) que corresponden a los tanques de Agua Tratada con una capacidad de almacenamiento de 1500 m<sup>3</sup> cada uno.

El agua de estos tanques, está destinada para distintos usos. Una parte (60 % aprox. del caudal total del consumo de la Cervecería), la correspondiente a los tanques B, D y F, será enviada para ser usada en servicios de la Cervecería (baños, casino, aseo, etc); mientras que el resto del agua correspondiente a los tanques C y E, será enviada para ser usada en la elaboración de los productos.

### 3.7 ADICIÓN DE OTROS PRODUCTOS QUÍMICOS

3.7.1 Adición de Inhibidor de Corrosión. La adición de este reactivo (metafosfato de Cinc - Nalco7384) se realiza después de los filtros de arena sobre la tubería y su dosificación varía entre 5 y 6 ppm.

Debido a que el agua de servicios es transportada por una tubería de acero al carbón, se hace necesario agregar este producto para evitar la corrosión de la tubería, debido a las condiciones abrasivas propias del agua. Mientras que al agua destinada para elaboración no es necesario aplicarle inhibidor de corrosión, ya que es transportada por tubería de acero inoxidable.

3.7.2 Adición de Soda. La dosificación de soda (NaOH) se hace para lograr mantener un pH en el agua tratada entre 7 y 8; esta adición es la última que se realiza dentro del proceso de tratamiento de agua antes del almacenamiento final en los tanques de almacenamiento de agua tratada y se hace calibrando manualmente el dial de la bomba dosificadora y haciendo mediciones de pH en laboratorio hasta obtener el valor requerido.

Para realizar la dosificación, se tiene un pH-metro en línea el cual permite visualizar al operador la dosis a aplicar. Adicionalmente se esta implementando un sistema de dosificación automático que de manera automática le envía la señal a la bomba dosificadora la cual, de acuerdo con un set point, disminuye o aumenta la dosificación del neutralizante (soda).

La adición de productos químicos se resume de la siguiente forma y en el siguiente orden:

Peróxido de hidrógeno – coagulante – floculante – (inhibidor de corrosión) – Cloro – Soda.

Peróxido de hidrógeno: en la línea de conducción del agua cruda, antes de entrar al tanque de almacenamiento de agua cruda.

Coagulante (sulfato de aluminio): en la línea de conducción del agua cruda, antes de entrar a los clarificadores.

Polímero ayudante de floculación: en la zona primaria de reacción del clarificador.

Inhibidor de corrosión. A la salida de los filtros, en la tubería que conduce el agua destinada para servicios de la Cervecería.

Cloro: en la línea de conducción del agua tratada hacia los tanques de almacenamiento, a la salida de los filtros.

Soda: se realiza después de la adición del cloro en la misma línea de conducción hacia los tanques de almacenamiento de agua tratada.

Después de la adición de reactivos químicos, en el orden ya mencionado, el agua debe pasar por una tubería serpentín (ver foto 6), ubicada en la parte superior de la Planta cerca de los tanques de almacenamiento, con la cual se le da al cloro el tiempo de retención necesario para garantizar la desinfección antes del almacenamiento.

Foto 6. Serpentín Homogenizador de Agua Clorada – Tanques de Almacenamiento.



Fuente: Cervecería Leona S.A.

## 4. MARCO LEGAL

La reglamentación aplicable a la disposición de residuos de las plantas de tratamiento de agua puede tener una influencia significativa en los costos de construcción y operación de los sistemas de tratamiento y puede limitar la selección de opciones de tratamiento disponibles. Como consecuencia, se deben integrar las leyes dentro de las etapas de decisión con respecto a la selección y dimensionamiento de los sistemas de tratamiento de agua<sup>55</sup>.

En este caso se contempla como parte de la Legislación Colombiana, el RAS - 2000, teniendo en cuenta su aplicación en las prácticas de disposición del lodo y como parte de la legislación internacional, las normas de los Estados Unidos (EUA), por ser uno de los países que ha avanzado en la legislación y práctica de tratamiento y disposición de residuos de Plantas de Tratamiento de Agua en la última década.

### 4.1 LEGISLACIÓN COLOMBIANA

#### 4.1.1 Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS – 2000. Sección II. Título C. Sistemas De Potabilización.

En el artículo 19 del Título A del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) se establecen los parámetros sujetos a la evaluación de un sistema existente para el suministro de agua potable, sin embargo, el manejo de los lodos provenientes de este proceso no se contempla dentro de esos parámetros.

El Título C del RAS 2000 (Ver Anexo A) se refiere a los sistemas de potabilización y en el capítulo 13 se establecen los requisitos mínimos para el manejo de los lodos producidos durante la potabilización y específicamente durante los procesos de sedimentación y filtración. Estos requisitos son aplicables a todos los sistemas de potabilización, cualquiera que sea su nivel de complejidad.

Los procesos que deben seguirse para un adecuado manejo de estos lodos se dividen en evacuación, ya sea en forma periódica o continua, y disposición final. En caso de utilizar algún sistema de manejo y disposición final diferente de los que menciona el RAS se debe pedir autorización a la Comisión Reguladora de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA), demostrando la eficiencia de dicho proceso a través de ensayos a escala de laboratorio y/o piloto, o por resultados internacionales o nacionales. El RAS establece que se deben realizar estudios previos acerca de:

---

<sup>55</sup> (KOORSE, 1993), citado por ESCOBAR, 2004.

- Caracterización de los lodos: determinación de la concentración en peso de los lodos y el peso específico.
- Evacuación de los lodos: debe analizarse si se hará por medios mecánicos o hidráulicos y si se realizará en forma periódica, para las partículas discretas de los desarenadores, o si se quiere utilizar una evacuación continua debe analizarse en función del equipo requerido para ello.
- Disposición final del lodo: El tipo de tratamiento seleccionado para tratar el lodo deberá estar en función del volumen y calidad del mismo, por lo cual se debe realizar un estudio de costos del proceso seleccionado. El Cuadro 12 sirve de guía para el tratamiento de acuerdo a datos promedios del porcentaje de concentración de sólidos para diferentes tipos de lodos.
- Minimización de la producción de lodos: Con el fin de reducir los costos de inversión, operación y mantenimiento de la línea de lodos se pueden considerar las siguientes opciones: 1) Operar bajo la modalidad de filtración directa si la calidad del afluente lo permite, 2) Sustituir coagulantes por polímeros, ya que son más eficientes con menores dosis, 3) Ahorrar en el consumo de químicos empleando la dosis óptima.

*Cuadro 12. Concentración de Lodos en el Tratamiento de Aguas.*

<b>Tipo de Lodo</b>	<b>Concentración de sólidos (%)</b>
Proceso de sedimentación	0.5 – 2
Agua de lavado de filtros	50 – 1000 <sup>a</sup>
Proceso de ablandamiento con soda y cal	2 – 15
<b>Espesado gravitacional</b>	
Sedimentos de coagulación y lavado	2 – 20 (típico 2 – 4)
Agua lavado de filtros	Mayor a 4
Lodos de cal	15 – 30
<b>Filtración al vacío</b>	
Lodos coagulación	10 – 20
Ablandamiento con cal (>85% contenido de CaCO <sub>3</sub> )	50 – 70
Ablandamiento con cal (alto contenido de Mg(OH) <sub>2</sub> )	20 – 25
<b>Filtración a presión</b>	
Lodos de coagulación	30 – 45
Lodos de cal	55 – 70
<b>Centrífugas</b>	
Lodos de coagulación	10 – 20
Lodos de cal y aluminio	15 – 40
Lodos de cal	30 – 70
<b>Camas de secado</b>	
Lodos de coagulación	15 – 30
Lodos de cal	50 – 70
<b>Lagunas</b>	
Lodos de coagulación	7 – 15
Lodos de cal	50 - 60

<sup>a</sup> concentración en mg/L

Fuente: RAS (2000)

## 4.2 LEGISLACIÓN DE LOS ESTADOS UNIDOS (EUA)

En 1972, el Congreso de los EUA decretó enmiendas al Acta Federal de Control de la Polución (PL 92-500), incluyendo los residuos de las Plantas de Tratamiento de Agua como residuos industriales. Para los estados, "el administrador de la Planta de Tratamiento de Agua debería aprobar controles sobre la disposición de todos los residuos de un proceso de tratamiento de agua". En la época, eso causó confusión entre los administradores de Plantas de Tratamiento, una vez que se retiraran las impurezas de las fuentes de agua, las podrían devolver a las corrientes receptoras. No obstante, algunos estados interpretaron las Plantas de Tratamiento de Agua como industrias, y por lo tanto, sujetas a las reglamentaciones de descarga de residuos establecidas en el Acta.

Como el tratamiento de agua fue considerado una actividad industrial, no fueron incluidos fondos federales para garantizar el cumplimiento de los requisitos del Acta PL 92-500 y, consecuentemente, los administradores de las Plantas de Tratamiento de Agua han sido renuentes a gastar grandes sumas de dinero en la reducción de la polución. En 1977, la Clean Water Act - CWA (PL 95-217), que enmendaba ciertas previsiones de la PL 92-500, llamó, entre otros puntos, al establecimiento de criterios de calidad de los vertimientos de industrias específicas, incluyendo la industria de abastecimiento de agua<sup>56</sup>.

Antes de la CWA (PL 95-217), en 1974, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) había realizado un estudio tratando de desarrollar criterios para el manejo de residuos de Plantas de Tratamiento de Agua a nivel federal, pues su carencia creaba problemas, una vez que las oficinas regionales de la USEPA y los estados se basaban en las normas de calidad de agua para autorizar la descarga de los residuos de las Plantas de Tratamiento de Agua en las corrientes de agua<sup>57</sup>.

En los Estados Unidos, a nivel federal, la Agencia de Protección Ambiental no había establecido ninguna reglamentación específicamente dirigida a residuos de Plantas de Tratamiento de Agua. Esas reglamentaciones están asociadas a diferentes actas de compromiso que reglamentan la protección del medio ambiente. Dentro de esas actas, se puede citar, por ejemplo, la CWA (PL 95-217) que limita las descargas directas en los cursos de agua, mientras que otras reglamentaciones gobiernan otros métodos de uso y/o disposición de residuos. La mayor parte de los estados americanos son responsables por el establecimiento y administración de reglamentaciones que estén de acuerdo con los requerimientos establecidos en estas actas y, en resumen, la reglamentación de los residuos es responsabilidad directa de los estados<sup>58</sup>.

---

<sup>56</sup> ESCOBAR, Op. cit., p. 57 - 58.

<sup>57</sup> (A WW A, 1990), citado por ESCOBAR (2004).

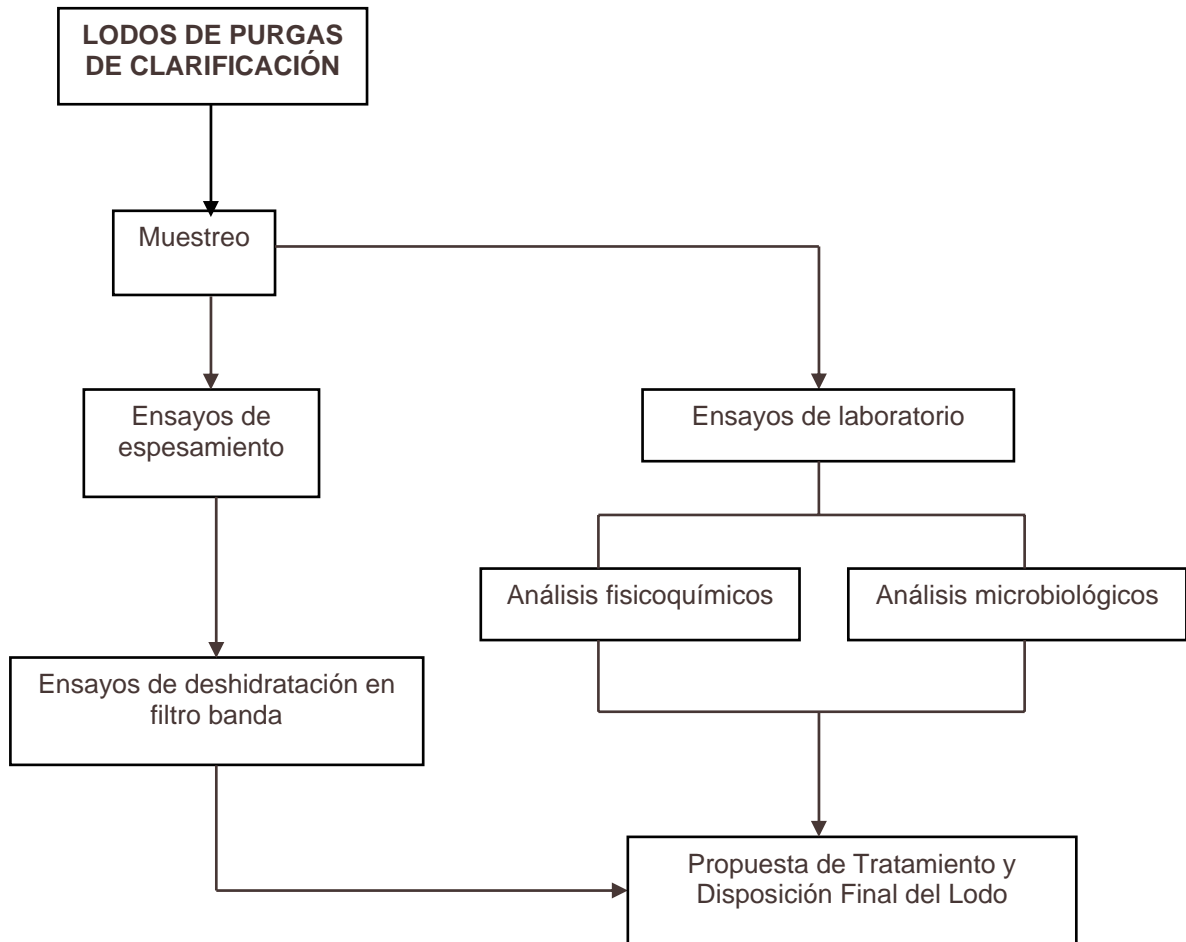
<sup>58</sup> (AWWA, 1996), citado por ESCOBAR (2004).



## 5. METODOLOGÍA DE TRABAJO

La metodología de trabajo se dividió en dos grandes grupos: 1) un diseño experimental, en el que se incluyeron todos los ensayos de laboratorio (como los análisis fisicoquímicos y microbiológicos), los ensayos de espesamiento y deshidratación (en filtro banda) y 2) la ingeniería básica, con la que se presenta la propuesta del tratamiento para los lodos y entre la que se incluyó el prediseño de un tanque espesador; de igual manera se recomienda una alternativa para la disposición final del lodo. Esta metodología de trabajo se ve ilustrada en la siguiente figura.

Figura 6. Diagrama de flujo de la metodología del proyecto



Fuente: La Autora

## 5.1 DISEÑO EXPERIMENTAL

Como ya se mencionó, el diseño experimental incluyó desde ensayos de laboratorio (físicoquímicos y microbiológicos) para realizar la caracterización del lodo, hasta ensayos de espesamiento y deshidratación en filtro banda. A continuación se explican cada uno de los ensayos ya mencionados, en su respectivo orden.

5.1.1 Análisis Físicoquímicos. Una caracterización de los residuos semisólidos (lodos) generados en las plantas de potabilización, de acuerdo con su naturaleza físicoquímica y microbiológica es de vital importancia para evaluar sus posibles impactos ambientales y para definir los métodos y equipos para su tratamiento y disposición final.

Las características de estos residuos varían generalmente con la calidad del agua cruda, origen, tecnología de tratamiento utilizada para el agua cruda, el tipo y dosis de productos químicos empleados y el procedimiento utilizado para la limpieza de las unidades, de manera que no existe una composición que pueda ser considerada típica para estos.

Para la determinación de las propiedades físicoquímicas se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros: *DQO, amonio, nitratos, nitritos, aluminio, fosfatos, sulfatos, DBO<sub>5</sub>, sólidos totales, sólidos suspendidos, magnesio, potasio, calcio, hierro, sodio, Cinc, plomo, cobalto, cromo, cadmio y mercurio.*

La selección de la cantidad y tipo de estos análisis surgió a partir de las necesidades propias de la industria, teniendo en cuenta el alcance del proyecto, en el que se pretendía realizar una caracterización lo más completa posible del lodo, pero teniendo en cuenta algunas limitantes como disponibilidad de materiales y equipos. Es importante aclarar que la toma de decisiones siempre fue avalada y aprobada por el personal a cargo del proyecto dentro de la Cervecería.

5.1.1.1 Recolección de Muestras. Para llevar a cabo los análisis mencionados anteriormente, se contó con tres puntos de recolección: agua cruda a la entrada de la PTAP, agua filtrada y lodo de purgas; los cuales forman parte del proceso de potabilización y se consideran necesarios para obtener una caracterización del lodo, debido a que el proceso de potabilización funciona como un sistema en el que hay una entrada (agua cruda), una salida (agua filtrada) y un residuo (lodo), y en el que debe presentarse un balance de materias, aún cuando este no sea constante teniendo en cuenta las características fluctuantes del agua, las cuales varían de acuerdo con diversos factores como el caudal, las condiciones climáticas, etc.

El criterio de selección de los tres puntos de muestreo mencionados surge de la necesidad de realizar un análisis comparativo entre ellos, teniendo en cuenta que los tres hacen parte del sistema de tratamiento de potabilización del agua.

Se parte del supuesto de que las características con las que entra el *agua cruda* serán removidas en el clarificador quedando retenidas en su mayoría en el manto de *lodos* que se forma allí y esto es lo que se pretende comprobar con los análisis ya mencionados.

Con relación a la muestra de *agua a la salida del filtro* se puede decir que esta fue seleccionada con el fin de verificar que el proceso de potabilización funciona correctamente de acuerdo con los parámetros establecidos en la cervecería, ya que como se mencionó, todo hace parte de un mismo sistema. Por otro lado, el análisis del agua a la salida del filtro permite tener un control de la eficiencia del tipo de tratamiento aplicado en el agua.

Los puntos de muestreo fueron los siguientes:

- Agua cruda: bombas a la salida del tanque de almacenamiento de agua cruda.
- Agua filtrada: a la salida de los filtros (antes de la adición del cloro).
- punto de muestreo de lodo: en la tubería de descarga de los lodos de los clarificadores.

La recolección de muestras estuvo a cargo del personal de la planta, debido a que se estableció que el muestreo sería durante 24 horas para obtener muestras representativas, por lo que era necesaria la presencia constante dentro de la planta; es importante aclarar que el personal que estuvo a cargo tiene las competencias del ser y del saber en el proceso de muestreo.

Para tomar las muestras se tuvieron en cuenta las siguientes recomendaciones: 1) las muestras debían ser tomadas en botellas plásticas rotuladas, completamente limpias y aclaradas varias veces con la muestra a analizar y 2) el muestreo se realizaría cada cuatro horas. Este último punto se estableció teniendo en cuenta el tiempo de retención hidráulica de las estructuras que conforman el proceso de potabilización, ya que cuentan con dicho tiempo, de acuerdo con la experiencia obtenida a través del tiempo de funcionamiento de la planta de tratamiento.

El muestreo se realizó con una frecuencia de dos veces por semana, primero, por distribución de tiempo entre muestreo y análisis y segundo, porque se quiso realizar muestreo de un día de baja producción (Ej. martes) y un día de alta producción (Ej. Viernes); tuvo una duración de un mes porque fue el tiempo establecido para el cumplimiento del alcance del proyecto y por la disponibilidad de materiales y reactivos.

El muestreo se realizó por duplicado teniendo en cuenta que la mitad de las muestras debían ser conservadas en ácido nítrico 1:1 (de acuerdo con la metodología del Estandar Methods numeral 3030 F, 17th Edition, 1989) y refrigeradas a 4° C para su posterior análisis por Absorción Atómica (A.A), con el fin de determinar la posible presencia de metales pesados en estas. La función del ácido nítrico era evitar la degradación de las muestras hasta que fuera posible la realización de los ensayos. Las otras muestras, que iban a ser analizadas mediante otras metodologías diferentes a la A.A, como gravimetría y fotometría, no requerían conservación en ningún medio específico, pero sí su pronto traslado al laboratorio, para evitar falsos resultados a la hora del análisis.

En las figuras 7 y 8, se presenta la distribución de las muestras conservadas en ácido por tipo de elemento a analizar y las que no requirieron de la acidificación, respectivamente.

Figura 7. Muestras Acidificadas para Determinación de Análisis Físicoquímicos.

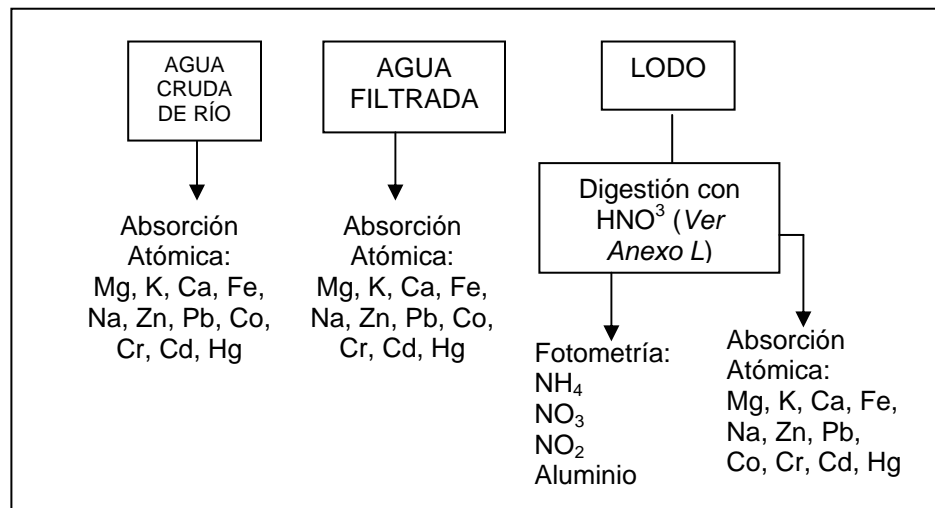
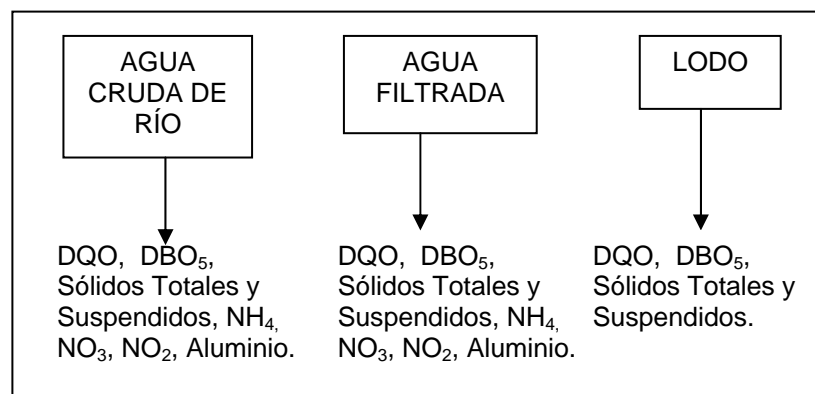


Figura 8. Muestras sin Acidificar para Determinación de Análisis Físicoquímicos.



Fuente: la Autora

5.1.1.2 Métodos y Técnicas. Los ensayos para determinar el contenido de metales pesados (por Absorción Atómica) se llevaron a cabo en el laboratorio de Techo de la Cervecería Bavaria S.A. ubicado en la Av. Boyacá No. 9 – 02. Los análisis determinados por otros métodos diferentes a la Absorción Atómica, se realizaron en dos de los laboratorios de la Cervecería Leona, uno ubicado en la dirección central y el otro ubicado en planta de aguas. Todos estos ensayos fueron realizados por la investigadora del proyecto con el aval de la Cervecería.

Con cada muestra se realizaron los análisis que se relacionan a continuación:

*Cuadro 13. Ensayos de Laboratorio*

<b>UBICACIÓN LABORATORIO</b>	<b>ANÁLISIS</b>	<b>MÉTODO</b>
CERVECERÍA LEONA	DQO 10-150 ppm	Fotométrico
CERVECERÍA LEONA	DBO <sub>5</sub>	Respirométrico
CERVECERÍA LEONA	Amonio	Fotométrico
CERVECERÍA LEONA	Nitratos	Fotométrico
CERVECERÍA LEONA	Nitritos	Fotométrico
CERVECERÍA LEONA	Sólidos Totales	Gravimétrico
CERVECERÍA LEONA	Sólidos suspendidos	Gravimétrico
CERVECERÍA LEONA	Aluminio	Fotométrico
CERVECERÍA LEONA	Fosfatos	Fotométrico
CERVECERÍA LEONA	Sulfatos	Fotométrico
TECHO	Magnesio	Absorción Atómica
TECHO	Potasio	Absorción Atómica
TECHO	Calcio	Absorción Atómica
TECHO	Hierro	Absorción Atómica
TECHO	Sodio	Absorción Atómica
TECHO	Cinc	Absorción Atómica
TECHO	Plomo	Absorción Atómica
TECHO	Cobalto	Absorción Atómica
TECHO	Cromo	Absorción Atómica
TECHO	Cadmio	Absorción Atómica
TECHO	Mercurio	Absorción Atómica

*Fuente: la Autora*

La metodología utilizada en los análisis se encuentra establecida en los laboratorios de la Cervecería, los cuales están basados en su mayoría en los parámetros definidos por el ESTÁNDAR METHODS. For the Examination of Water and Wastewater, 17<sup>th</sup> Edition, 1989.

Los procedimientos de cada técnica y la descripción de equipos se encuentran consignados en los Anexos B y C respectivamente.

5.1.1.3 Resultados de los Análisis. Los resultados obtenidos durante la caracterización se presentan en el Anexo D, en donde se encuentra el soporte estadístico de los datos. Para la presentación de los resultados, se tuvieron en cuenta los valores correspondientes a la media de cada elemento analizado, los cuales se calcularon por medio del Método Analítico de tendencia Central disponible en la Cervecería. Con este método se calculó la media muestral, que es la suma de las observaciones realizadas dividida entre la cantidad de observaciones correspondiente.

La media muestral se representa por la notación  $\bar{X}$  y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n}$$

En donde

$X_i$  = Valores que se obtienen en el muestreo en cada una de las observaciones.  
 $n$  = tamaño de la muestra (número de observaciones).

En el siguiente cuadro se presentan los resultados de los análisis en cada punto al que se le realizó la caracterización: agua cruda de río, agua a la salida de los filtros y lodo proveniente de las purgas de los clarificadores.

*Cuadro 14. Resultados Análisis Físicoquímicos de agua cruda de río, Agua a la Salida del Filtro y Lodo.*

PARÁMETROS	UNIDADES	VALOR AGUA CRUDA DE RÍO	VALOR AGUA FILTRADA	VALOR LODO
<b>DQO</b>	mg/l	26,5	2	1446,5
<b>DBO</b>	mg/l	2,5	1,75	17
<b>SÓLIDOS TOTALES</b>	mg/l	359,2	82,8	6643,2
<b>SÓLIDOS SUSPENDIDOS</b>	mg/l	8,4	0,2	4764
<b>NITRATOS</b>	mg/l NO <sub>3</sub> <sup>=</sup>	3,59	2,59	8,425
<b>NITRITOS</b>	mg/l NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0,158	0,01325	5,3
<b>AMONIO</b>	mg/l NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,0425	0,028	1,5
<b>ALUMINIO</b>	mg/l Al	0,0425	0,1	43,25

Cuadro 14. Resultados Análisis Físicoquímicos de agua cruda de río, Agua a la Salida del Filtro y Lodo

<b>FOSFATOS</b>	mg/l PO <sub>4</sub>	0,5	0	100
<b>SULFATOS</b>	mg/l SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	23	0	800
<b>SODIO</b>	mg/l Na	15,75	15,416	10,45
<b>CINC</b>	mg/l Zn	0,083	0,747	1,82
<b>POTASIO</b>	mg/l K	12,516	12,166	13,08
<b>HIERRO</b>	mg/l Fe	1,701	0,192	57,21
<b>CALCIO</b>	mg/l Ca	9,936	8,517	6,625
<b>MAGNESIO</b>	mg/l Mg	2,931	2,447	1,692
<b>CADMIO</b>	mg/l Cd	0,0003	0,0001	0,001
<b>COBALTO</b>	mg/l Co	0,0004	0,001	0,008
<b>CROMO</b>	mg/l Cr <sup>+6</sup>	0,0048	0	0,008
<b>PLOMO</b>	mg/l Pb	0,0108	0,01	0,106
<b>MERCURIO</b>	mg/l Hg	Ausente	Ausente	Ausente

*Nota: los resultados están dados en promedio para cada uno de los puntos de muestreo.*

*Fuente: la Autora*

De acuerdo con estos resultados se encuentra lo siguiente:

Se observa un incremento en la concentración de los elementos analizados en el lodo, lo cual evidencia un excelente proceso de clarificación.

Teniendo en cuenta la relación DQO/DBO en el lodo para establecer biodegradabilidad, se observa que esta relación es alta (> 8), lo que quiere decir que este lodo no es fácilmente biodegradable<sup>59</sup>.

Con relación a los sólidos se observa que estos, efectivamente, son removidos totalmente del agua cruda, durante las etapas de coagulación-floculación y sedimentación, lo cual es evidente por el aumento significativo de sólidos en el lodo. Sin embargo, el alto valor de los mismos en el lodo (superior al del agua cruda), se debe a que éste último es acumulativo y contiene gran cantidad de sólidos removidos durante un largo periodo de tiempo.

En los casos en que los resultados presentan un valor más alto en el agua filtrada que en el lodo (como en el caso del sodio, calcio y magnesio), se debe a que no todos los metales se precipitan, sino que algunos tienden a continuar solubles en el agua.

<sup>59</sup> CERVECERÍA LEONA S.A., Planta de Tratamiento de Aguas Residuales: Manuales Ensayos de Tratabilidad.

En el caso del Cinc, se nota un aumento de su valor en el agua filtrada, en comparación con el agua cruda; esto se debe a que, durante el proceso de potabilización del agua, se utiliza un inhibidor de corrosión para proteger la tubería de la corrosión, el cuál está hecho a base de Cinc.

En el caso particular del lodo, los valores de sulfatos y de aluminio presentan un incremento importante, debido a la adición de sulfato de aluminio como coagulante.

En el caso del hierro, se observa que presentó un aumento significativo en el lodo, en comparación con el agua cruda; esto se debe quizás, a que el lodo es acumulativo de metales y como el hierro no se degrada fácilmente, entonces se presenta ese aumento en su contenido.

Con relación a los fosfatos se observa que existió un incremento en los resultados del lodo (de 0.5 mg/L con que entró el agua cruda, salió en el lodo un contenido de fosfatos de 100 mg/L), esto se debe a que este ultimo es acumulativo y no es purgado totalmente por lo que se puede presentar una lectura de fosfatos presentes en corrientes anteriores de lodo.

En el caso del potasio, se observa que no se presentó un cambio significativo en los resultados y con relación a los nitratos se observa que, inclusive en el lodo, los resultados están por debajo del valor admisible para agua potable (decreto 475 1998), el cuál es de 10 ppm.

Aunque en Colombia no existe en el momento una normatividad en donde se encuentren establecidos los parámetros permitidos para el manejo de los lodos procedentes del tratamiento del agua para consumo, para este caso en particular, se adoptó como norma estándar comparativa, la *resolución 2309 del 24 de febrero de 1986 del Ministerio de Salud* (en la cual se contemplan algunos lineamientos para el manejo de los residuos especiales) y los resultados obtenidos en la caracterización del lodo, se compararon con esta norma con el fin de comprobar si este tipo de residuo (lodo) presenta características que lo hacen especial, para lo cual se haría necesario recurrir a otro tipo de manejo contemplado en esta misma norma. Los resultados de esta comparación se presentan a continuación, en el cuadro 15.



Cuadro 15. Comparación Valores del Lodo con la Resolución 2309/86.

PARÁMETROS	UNIDADES	VALOR LODO	CONCENTRACIÓN MÁXIMA (Res. 2309/86)
Cadmio	mg/l Cd	0.001	0.5
Cromo	mg/l Cr <sup>+6</sup>	0.008	5
Plomo	mg/l Pb	0.106	5
Mercurio	mg/l Hg	0	0.1

Fuente: la Autora y Resolución 2309/86 del Ministerio de Salud

De acuerdo con estos resultados, este tipo de lodo no puede ser considerado un residuo especial, pues no sobrepasa los límites establecidos en esta resolución.

Aún cuando en esta norma no se contemplan todos los análisis realizados en el lodo, se puede asegurar que este residuo no es considerado de carácter especial, puesto que los resultados permiten ver que solamente se encuentran valores traza de cada uno de los metales pesados lo que permite su posterior manejo y disposición final.

5.1.1.4 Comparación Resultados de Agua Filtrada con Decreto 475 / 98. Los resultados obtenidos en la caracterización del agua filtrada, permiten verificar que el sistema de tratamiento actual realizado en el agua, esté funcionando correctamente, de acuerdo con la normatividad establecida para agua potable en Colombia, el decreto 475 de 1998.

De esta forma se puede tener un control del tratamiento aplicado en la planta y establecer si deben realizarse cambios en el sistema de tratamiento actual. Es importante aclarar que en la misma planta ya se tienen establecidos otros sistemas de control que son realizados a diario y que permiten descartar errores de operación para garantizar un correcto tratamiento del agua.

Con relación a los parámetros de color y turbidez, no se consideró necesario realizar su determinación, ya que en la PTAP a diario se realiza el control de los mismos para garantizar la calidad del agua.

A continuación, en el cuadro 16, se presenta una comparación entre los datos obtenidos en la caracterización del agua filtrada y los datos de valores admisibles estipulados en el decreto 475 de 1998.

Cuadro 16. Comparación Resultados de Agua Filtrada con Decreto 475 / 98.

PARÁMETROS	UNIDADES	VALOR AGUA FILTRADA (CERVECERÍA LEONA)	VALOR ADMISIBLE AGUA POTABLE (DECRETO 475 1998)
Sólidos Totales	mg/l	82,8	<500
Aluminio	mg/l Al	0,1	0,2
Cadmio	mg/l Cd	<0,003	0,003
Cromo hexavalente	mg/l Cr <sup>+6</sup>	Ausente	0,01
Mercurio	mg/l Hg	Ausente	0,001
Nitritos	mg/l NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0,013	0,1
Nitratos	mg/l NO <sub>3</sub> <sup>=</sup>	2,59	10
Plomo	mg/l Pb	0,01	0,01
Calcio	mg/l Ca	8,5	60
Hierro total	mg/l Fe	0,2	0,3
Magnesio	mg/l Mg	2,4	36
Sulfatos	mg/l SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	0	250
Zinc	mg/l Zn	0,75	5
Fosfatos	mg/l PO <sub>4</sub>	0	0,2
Amonio	mg/l NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,028	1
Coliformes totales	UFC/100 cm <sup>3</sup>	Ausentes	Ausentes
E. Coli	UFC/100 cm <sup>3</sup>	Ausentes	Ausentes

Fuente: la Autora y Decreto 475 /98 del Ministerio de Salud

Comparando los resultados entre sí, se puede decir que el sistema de tratamiento actual funciona correctamente ya que permite obtener un agua que cumple con todas las condiciones establecidas en la normatividad, en este caso, el decreto 475 de 1998.

5.1.2 Análisis Microbiológicos. Es importante la determinación de las características microbiológicas para constatar problemas de salud pública por contacto o manipulación de estos residuos. Al igual que en el tratamiento de las aguas residuales, el indicador utilizado es el número de coliformes fecales o totales. Los análisis microbiológicos se llevaron a cabo en el laboratorio de la Cervecería Leona, realizados por el personal a cargo (microbiólogos industriales).

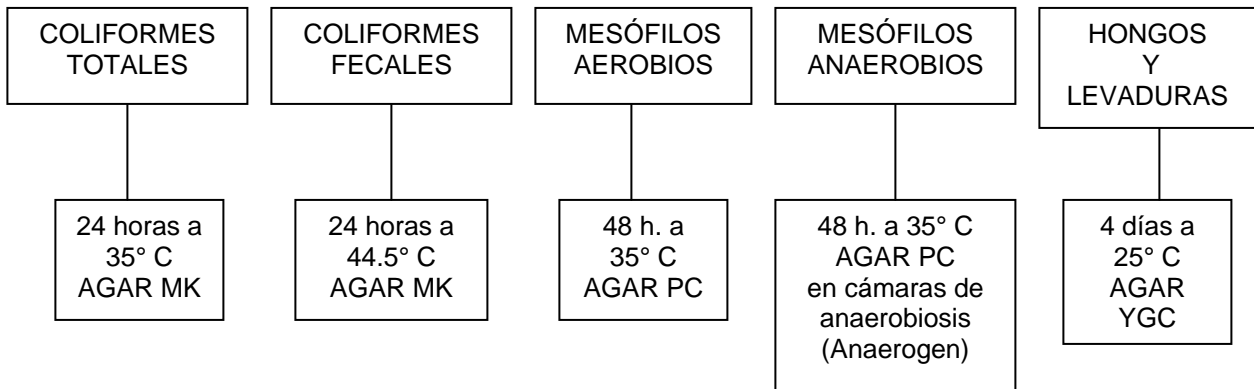
Para llevar a cabo estos análisis se realizaron recuentos microbianos con tres muestras pertenecientes a los mismos tres puntos de recolección de los análisis fisicoquímicos (Agua cruda, agua a la salida del filtro y lodo de purgas de

clarificación). Los análisis que se realizaron en estas muestras, son los que se relacionan a continuación:

- Coliformes totales
- Coliformes fecales
- Hongos y levaduras
- Mesófilos anaerobios
- Mesófilos aerobios

5.1.2.1 Procedimiento. Para estos análisis se tomaron muestras estériles de cada una de los puntos establecidos previamente (agua cruda de río, agua de sobrenadante del lodo y lodo de las purgas de clarificación de agua potable), y se trasladaron debidamente marcadas al laboratorio de microbiología de la Cervecería donde se realizaron diferentes diluciones en solución salina al 0.93 %. Cada dilución se sembró por profundidad (1ml) en los medios (agares) respectivos para cada microorganismo. Cada muestra se incubó por separado de la siguiente manera, como se representa en la figura 9.

*Figura 9. Periodo de Incubación y Medios Utilizados para Cada Análisis de Microbiología.*



*Fuente: Manuales de Laboratorio de Microbiología - Cervecería Leona S.A.*

Una vez cumplido el tiempo de incubación, la revisión de las muestras se hizo por medio de la técnica de recuento en placa UFC/ml (Unidades Formadoras de Colonias por mililitro).

5.1.2.2 Resultados. Con base en las tablas del Anexo E, se obtuvieron los siguientes resultados microbiológicos, expresados en el Cuadro 17.

Cuadro 17. Resultados Análisis Microbiológicos de Agua Cruda de Río, Agua filtrada y Lodo.

PARÁMETROS	UNIDADES	AGUA CRUDA	AGUA A LA SALIDA DEL FILTRO	LODO
<b>Coliformes totales</b>	<sup>(*)</sup> UFC/100 ml	35.75	0	36.06
<b>Coliformes fecales</b>	UFC/100 ml	18.375	0	22.06
<b>Mesófilos aerobios</b>	UFC/100 ml	55.31	11.81	34.38
<b>Mesófilos anaerobios</b>	UFC/100 ml	24.94	1.38	33.79
<b>Hongos y Levaduras</b>	UFC/100 ml	3.38	0.13	5.14

<sup>(\*)</sup> UFC = Unidades Formadoras de Colonias.

Nota: los resultados están dados en promedio para cada uno de los puntos de muestreo.

Fuente: Laboratorio de Microbiología – Cervecería Leona S.A.

Con base en los resultados de la tabla anterior, se puede decir que la carga microbiana del agua cruda es abundante con respecto a los grupos microbiológicos analizados, teniendo en cuenta su origen (Río Bogotá); se observa que el grupo microbiano que con más frecuencia se repite para esta muestra es el de mesófilos aerobios, debido a que este grupo encierra un amplio número de géneros y a sus pocas exigencias en cuanto a crecimiento y desarrollo se refiere.

Lo que resulta interesante observar es que el promedio de microorganismos aumentó en el lodo con referencia al agua cruda, a excepción de los mesófilos aerobios que para este caso disminuyeron, teniendo en cuenta que el lodo tiende a acumularse y formar varias capas dentro del manto, comienza a volverse anaerobio lo que inhibe el desarrollo de los microorganismos aerobios. Mientras que el aumento de los otros tipos de microorganismos pudo haberse favorecido en el lodo gracias a que este suele acumularse de procesos de sedimentación anteriores (después de ser drenado siempre se deja un remanente de lodo antiguo), lo que hace que la carga microbiana antigua y nueva se mezclen aumentando su promedio.

En cuanto al agua filtrada se observa la ausencia de coliformes totales y fecales, cumpliendo así con los parámetros establecidos en el decreto 475/98 para Agua potable, y una drástica disminución en el resto de la microbiota en comparación con las otras dos muestras.

Los resultados del lodo no difieren mucho de los del agua cruda, por lo que se observa que tal como se había planteado, las características con las que entra el agua cruda son retenidas en su mayoría durante el proceso de clarificación en donde se forma el lodo.

5.1.3 Ensayos de Espesamiento de Lodos. Dentro del sistema de tratamiento propuesto (del cuál se habla más adelante) para los lodos de clarificación de agua potable en la Cervecería, se tiene en cuenta el espesamiento y la deshidratación de los mismos. Es así que se recurre a la realización de diferentes ensayos a nivel de laboratorio, cuyos resultados permitieron definir la forma de realizar dichos procesos (espesamiento y deshidratación).

El ensayo de espesamiento permitió determinar la dosis necesaria, del polímero seleccionado, para llevar a cabo el espesamiento del lodo. Teniendo en cuenta que uno de los aspectos importantes del espesamiento es la separación de la fase sólida-líquida, en la que la parte líquida (sobrenadante) pretende ser devuelta al proceso en el tanque de almacenamiento de agua cruda, el polímero seleccionado debe ser aprobado para consumo en agua potable. Es así, que teniendo en cuenta este criterio, dentro de la gama de productos disponibles para la Cervecería, se eligió el polímero que cumple con este requisito, en este caso, el polímero 9901 de Nalco, aniónico de alto peso molecular y mediana carga. (*Ver anexo F. Ficha Técnica*).

Cabe mencionar que no se realizaron ensayos utilizando el cloruro férrico y la cal por recomendaciones del personal de la planta, basados en la experiencia con la que se determinó que estos compuestos traen como consecuencias el ataque a los equipos (por la acción corrosiva del cloruro férrico) y su difícil manipulación (desde el punto de vista de la salud ocupacional). Por otro lado, la cal es insoluble en el agua y por tener esta condición en su manipulación especial, no se tuvo en cuenta para los ensayos.

Una vez se eligió el tipo de polímero a utilizar, se realizaron diversos ensayos para determinar la dosis recomendada para lograr llevar a cabo el espesamiento con este tipo de lodos.

5.1.3.1 Procedimiento. La presentación del polímero es en forma sólida, por lo que se hace necesario llevarlos a su estado líquido para permitir su dosificación por bombeo. Para la preparación de todos los polímeros (incluyendo los utilizados para las pruebas de deshidratación), se parte de una concentración de 0.2%, debido a las especificaciones dadas por el fabricante o proveedor, el cuál aconseja no obtener concentraciones mayores al 0.5%; y gracias a la experiencia obtenida en la Planta de la Cervecería, la concentración aceptada y aprobada es la de 0.2%; este dato fue obtenido desde el principio del funcionamiento de la planta, a través de pruebas de jarras (cuyos datos históricos hacen parte de los registros de carácter privado de la empresa).

Para llevar a cabo las pruebas de espesamiento se contó con un equipo de jarras (Ver foto 7), en las cuales se realiza la adición inicial del polímero para permitir el espesamiento del lodo.

Foto 7. Equipo para Pruebas de Jarras.



Fuente: Cervecería Leona – Laboratorio Planta de Aguas Potables.

El polímero se añadía en dosis progresivas, (desde 1 a 5 ppm), las cuales fueron determinadas por recomendaciones del fabricante con un máximo de 5 ppm (Ver Anexo F. Ficha Técnica del polímero), en cada jarra de la siguiente forma:

- Se colocaban las muestras (1000 ml de lodo de purgas de clarificación) en las jarras, las cuales se introducían debajo de los agitadores, los cuales se ponían a funcionar a 100 rpm. Luego se inyectaba el polímero con una jeringa de 5 cm<sup>3</sup>, profundamente dentro del líquido junto a la paleta. No debía dejarse caer la solución del polímero en la superficie de la muestra, pues esto podía desmejorar la eficiencia de la mezcla rápida. El tiempo de mezclado suele ser entre 30 y 60 segundos (para este caso en particular se utilizó un tiempo de 30 segundos).

Nota: se calculó el gradiente de velocidad de la mezcla en tubería a partir de la potencia disipada por unidad de volumen, equivalente a 100 rpm en una jarra de 1000 ml. El valor del gradiente oscila entre 600 – 800 s<sup>-1</sup> (valor estipulado en la PTAP de Cervecería Leona)

- Una vez hecha la mezcla rápida se disminuía la velocidad de rotación de las paletas a 30-60 rpm (promedio de 40 rpm) y se dejaba flocular la muestra durante 5 min. Luego se suspendía la agitación, se extraían las paletas y se pasaban las muestras a los conos imhoff, en los cuales se simulaba el espesamiento que se pretende llevar a cabo dentro del cono espesador (ver foto 8) y una vez allí, se procedía a medir tiempo y volumen de sedimentación con el fin de comparar eficiencias de las diferentes dosis del polímero.

Foto 8. Conos imhoff con muestra de lodo de clarificación de agua potable.



Fuente: Cervecería Leona – Laboratorio Planta de Aguas Potables.

- Luego de 30 minutos de sedimentación (tiempo en el cual el volumen de sedimentación en cada muestra se volvía constante: ver cuadro 18), se retiraba el sobrenadante (agua que se separa del lodo) con la ayuda de una pipeta, y el lodo que quedaba en el fondo del cono era sometido nuevamente a prueba de jarras para la deshidratación, la cuál es explicada más adelante.

*Cuadro 18. Volúmenes de Sedimentación en un Periodo de Tiempo determinado*

Cono 1		Cono 2		Cono 3		Cono 4		Cono 5	
1 ppm		2 ppm		3 ppm		4 ppm		5 ppm	
<i>t</i>	<i>Vol.</i>	<i>t</i>	<i>Vol.</i>	<i>t</i>	<i>Vol.</i>	<i>t</i>	<i>Vol.</i>	<i>t</i>	<i>Vol.</i>
<i>(min.)</i>	<i>(ml)</i>	<i>(min.)</i>	<i>(ml)</i>	<i>(min.)</i>	<i>(ml)</i>	<i>(min.)</i>	<i>(ml)</i>	<i>(min.)</i>	<i>(ml)</i>
5	600	5	530	5	520	5	500	5	450
10	500	10	430	10	430	10	380	10	380
15	450	15	380	15	380	15	360	15	350
20	400	20	360	20	360	20	330	20	340
25	370	25	350	25	350	25	320	25	330
30	370	30	350	30	340	30	320	30	330

*Fuente: la Autora*

Una vez mezclado el polímero con el lodo, dentro de los conos se realizaban las determinaciones de tipo cualitativo como la evaluación del tamaño del floc producido (con ayuda del Índice de Willcomb) y determinaciones cuantitativas como el contenido de sólidos suspendidos en el sobrenadante, a fin de hacer una evaluación de la remoción de partículas que se obtuvo durante la sedimentación, la cual según Arboleda “puede considerar que está en función directa de la eficiencia de la aglutinación”<sup>60</sup>. En el cuadro 19 se presenta el Índice de Floculación de Willcomb, el cuál sirvió como base para realizar la calificación del espesamiento. La determinación de este índice es bastante subjetiva y depende del criterio del observador.

*Cuadro 19. Índice de Floculación de Willcomb*

Número del Índice	Descripción
0	Floc coloidal. Ningún signo de aglutinación.
2	Visible. Floc muy pequeño, casi imperceptible para un observador no entrenado.
4	Disperso. Floc bien formado pero uniformemente distribuido. (Sedimenta muy lentamente o no sedimenta)
6	Claro. Floc de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud.
8	Bueno. Floc que se deposita fácil pero completamente.
10	Excelente. Floc que se deposita todo dejando el agua cristalina.

*Fuente: Arboleda Valencia Jorge. Teoría y Práctica de la Purificación del Agua. 1991. P. 154.*

<sup>60</sup> ARBOLEDA VALENCIA, Op. cit., p. 154.

En el Cuadro 20, se presenta el criterio de selección de la dosis “óptima”, de acuerdo con el Índice de Willcomb. Con este método se realizaba una preselección de las dosis con los índices de calificación más altos y, con el sobrenadante correspondiente a cada una de las muestras preseleccionadas, se procedía a realizar los ensayos de sólidos.

*Cuadro 20. Criterio de Selección de la Dosis Óptima de polímero*

<b>Cono No.</b>	<b>Dosis de polímero (ppm)</b>	<b>Índice de Willcomb</b>
1	1	0
2	2	2
3	3	4
4	4	10
5	5	8

*Fuente: la Autora*

De acuerdo con los resultados de este cuadro, se seleccionan las muestras correspondientes a las dosis de 4 y 5 ppm (con índices de Willcomb de 10 y 8 ppm, respectivamente) para realizar los ensayos de contenido de sólidos en los sobrenadantes correspondientes a cada una. A continuación, en el Cuadro 21, se presentan los resultados de este ensayo.

*Cuadro 21. Sólidos suspendidos en el sobrenadante.*

<b>Muestra</b>	<b>Espesamiento</b>	<b>Sólidos suspendidos</b>
<b>Cono N°</b>	<b>Dosis de polímero (ppm)</b>	<b>(ppm)</b>
4	4	9
5	5	9

*Fuente: la Autora*

De acuerdo con estos resultados, se observa que con las dos muestras se obtienen los mismos resultados en contenido de sólidos. Sin embargo, teniendo en cuenta el índice de Willcomb más alto y la menor cantidad de polímero utilizado, se escoge como dosis “óptima” para este polímero, la de 4 ppm.

5.1.4 Pruebas de Deshidratación de Lodos. Las pruebas de deshidratación se realizaron con el fin de determinar el tipo de polímero y la dosis recomendada del mismo para lograr reducir, con la ayuda de los filtros banda disponibles en la PTAR, el contenido de humedad en el lodo (proveniente de la clarificación de agua potable) y así obtener un lodo más concentrado facilitando su manejo y



disposición. Para lograr la deshidratación del lodo se debe agregar el polímero seleccionado luego de las pruebas de deshidratación, primero en el laboratorio realizando ensayos de jarras y después en el filtro banda.

Se debe tener en cuenta que actualmente la eficiencia de deshidratación en el press deg (filtro banda) no sobrepasa el rango de 80 – 85 % de humedad final (según datos históricos que aparecen en los registros de los análisis de humedad realizados a los lodos de la PTAR). Por lo tanto, el criterio de selección del polímero al final de los ensayos, será el costo total de deshidratación (\$ por kilogramo de producto \* dosis a utilizar), dado que ésta es la única variable que podrá ser controlada dentro del proceso de selección, según lo establecido por el ingeniero de planta de la Cervecería.

5.1.4.1 Procedimiento. Para llevar a cabo cada una estas pruebas se utilizaron 4 polímeros comerciales que se encuentran a disposición de la Planta de Tratamiento de Aguas residuales (PTAR) de la Cervecería y cuyo uso se encuentra avalado por la Cervecería para este tipo de aplicaciones. A continuación en el Cuadro 22, se presenta una lista con los nombres de cada uno de los polímeros comerciales usados en los ensayos.

Cabe resaltar que todos los polímeros utilizados son catiónicos de alta carga y alto peso molecular, y fueron los que arrojaron mejores resultados para llevar a cabo la deshidratación en el filtro banda; esto se determinó luego de hacer un barrido con varios polímeros que se encuentran a disposición del PTAP de la Cervecería.

*Cuadro 22 . Polímeros Usados en los Ensayos de Deshidratación.*

NOMENCLATURA	PROVEEDOR	COSTO DE COMPRA (\$)
5130	Fluidis	12100 / Kg
8110	Nalco	16000 / Kg
9909	Nalco	16000 / Kg
3249	Nalco	16000 / Kg

*Fuente: Cervecería Leona S.A.*

Al comienzo de los ensayos se encontró que estos lodos por sí solos presentan una pobre capacidad de deshidratación, por lo que se hace necesario el uso de polímeros comerciales. Esto se comprobó haciendo pasar por el filtro banda, una muestra de lodo a la cual no se le había agregado polímero y dicha muestra se perdió dentro de la banda, confirmando así su poca capacidad de deshidratación. Así mismo se realizaron pruebas empíricas para conocer el rango adecuado de dosificación del lodo en donde se observaba una mejor formación de floc y dado que no se conocía el comportamiento del lodo frente a la adición de cada polímero

para la deshidratación, se realizaron pruebas de ensayo y error ajustando rangos. Se determinó de esta forma (empíricamente) que el rango de adición se encontraba entre 10 ppm a 25 ppm.

Luego de establecida la dosificación se procedió a realizar más ensayos de jarras, con el fin de establecer la dosis óptima a nivel de laboratorio para luego escalarla al proceso. Hay que tener en cuenta que actualmente a nivel de planta (PTAR) la adición del polímero se realiza en la tubería de conducción del lodo hacia los filtros banda con una rata de flujo de 5 m<sup>3</sup>/h; pero la forma de establecer la dosificación necesaria para la deshidratación es a nivel de laboratorio, mediante los ya mencionados ensayos de jarras, cuyo procedimiento se encuentra avalado por la Cervecería.

Una vez se tenían las muestras con las diferentes dosis de cada polímero, estas eran pasadas por el filtro banda, de donde se obtenían diferentes tortas de lodo, las cuales presentaban mayor o menor grado de remoción de humedad, dependiendo de la calidad del polímero utilizado y de la dosis empleada.

Para que una muestra sea considerada de buena calidad después de la deshidratación, se debe observar la calidad de agua del lixiviado y el grado de humedad final.

En el Cuadro 23, se presentan los criterios de calificación para la deshidratación y en el Cuadro 24, la calificación dada a las dosis de los diferentes polímeros de acuerdo con los criterios del cuadro 23.

*Cuadro 23. Criterios de Calificación para la Deshidratación del Lodo.*

<b>CRITERIOS DE CALIFICACIÓN</b>	<b>DESHIDRATACIÓN</b>	<b>CALIDAD DE LA TORTA</b>
<b>Calificación</b>	<b>Significado</b>	<b>Significado</b>
3	Alta deshidratación	Excelente calidad = Torta seca % Humedad: 80 – 85 %
2	Media deshidratación	Buena calidad = Muestra con cierto grado de humedad. % Humedad: 85 – 90 %
1	Baja deshidratación	Mala calidad = Muestra húmeda y poca concentración en materia seca. % Humedad: > 90 %

*Fuente: la Autora*

Estos criterios de calificación, permitían determinar qué tan alta, media o baja era la deshidratación a la salida del filtro banda, observando la calidad e la torta con relación al porcentaje de humedad final, teniendo en cuenta que el lodo sin

deshidratar, contiene un porcentaje de humedad inicial de 97 – 99% (Datos obtenidos en laboratorio).

*Cuadro 24 . Calificación para la Deshidratación del Lodo.*

<b>Polímero</b>	<b>Dosis</b>	<b>Deshidratación</b>	<b>Calidad de la Torta de Lodos</b>	<b>Total</b>
<b>5130</b>	<b>10</b>	1	1	2
	<b>15</b>	2	2	4
	<b>20</b>	3	3	6
	<b>25</b>	3	3	6
<b>8110</b>	<b>10</b>	1	1	2
	<b>15</b>	1	1	2
	<b>20</b>	1	1	2
	<b>25</b>	2	2	4
<b>9909</b>	<b>10</b>	2	2	4
	<b>15</b>	2	2	4
	<b>20</b>	2	2	4
	<b>25</b>	3	2	5
<b>3249</b>	<b>10</b>	1	1	2
	<b>15</b>	2	1	3
	<b>20</b>	2	1	3
	<b>25</b>	2	1	3

*Fuente: la Autora*

Teniendo en cuenta los resultados del cuadro anterior, se obtiene que el polímero cuyo resultado sea el más alto, será el seleccionado para llevar a cabo la deshidratación en el filtro banda.

#### 5.1.4.2 Resultados.

- Comparando los resultados del cuadro anterior entre sí, se observa que con el polímero 5130, se obtienen los mejores resultados en deshidratación (calificación 3) y en calidad de la torta (calificación 3), a partir de las 20 ppm, con un total de 6 puntos, lo que ubica a este polímero en el primer lugar dentro de la selección.
- Con el polímero 8110 se observa que sólo a partir de las 25 ppm se empiezan a obtener resultados aceptables para la deshidratación (con una calificación total de 4 puntos), por lo que se requeriría usar dosis más altas (por lo tanto mayor inversión económica) para alcanzar mejores resultados, por lo tanto se descarta el uso de este polímero.
- Con el 9909 se observa que a partir de las 25 ppm, se obtienen los mejores resultados en deshidratación (pues se le da una calificación de 3 que corresponde a alta deshidratación) pero no en la calidad de la torta

(calificación 2), con un total de 5 puntos, ocupando así el segundo lugar dentro de la selección.

- Con el polímero 3249 se requeriría el uso de dosis más altas de las establecidas en este ensayo, de acuerdo con la calificación en la calidad de la torta que siempre fue igual a 1 (baja deshidratación), lo que aumentaría los costos en el tratamiento.

Para este caso, el polímero que obtuvo la más alta calificación fue el 5130, seguido del 9909. De la misma forma, teniendo en cuenta el otro criterio de selección, es decir, los costos, el que presenta mejores resultados es el 5130.

En conclusión para este ensayo, el polímero seleccionado es el 5130 de Fluidis, con una dosis recomendada de 20 ppm. De ahí en adelante si se quiere obtener mejores resultados, esta dosis se puede aumentar en la medida que el tratamiento así lo requiera.

## 5.2 INGENIERÍA BÁSICA

Como ya se mencionó, esta etapa en el desarrollo del proyecto incluye la propuesta para el tratamiento de los lodos de la PTAP de Cervecería Leona, la cuál consiste en el espesamiento (para lo cual se realizó el prediseño de un tanque espesador) y la deshidratación en filtro banda, como la mejor alternativa de tratamiento teniendo en cuenta su facilidad de uso dentro del proyecto, dado que es una estructura que ya existe y que en la actualidad es usada para deshidratar los lodos provenientes del tratamiento de las aguas residuales. Por último se plantea una recomendación para llevar a cabo la disposición del lodo, teniendo en cuenta la disponibilidad de recursos de la Cervecería.

5.2.1 Propuesta Sistema de Tratamiento. Para el desarrollo de este proyecto se tuvo en cuenta la producción de lodo de los clarificadores. Es importante tener en cuenta que la producción de lodos no es constante, pues depende de la composición del agua cruda y de la cantidad y calidad de coagulante aplicado. Por lo tanto para tener un dato aproximado de la producción de agua con contenido de lodo, se hizo una revisión de los datos históricos registrados en las fichas de manejo de los clarificadores de la Cervecería, en las cuales se encuentran consignados, entre otros, los datos de corrientes principales de entrada (agua cruda de río) y de salida del agua (agua filtrada); la diferencia en estas dos lecturas se asumió como la producción total del agua con contenido de lodo que es rechazada a través de las purgas.

Se tuvieron en cuenta los datos registrados desde el mes de enero hasta el mes de junio. La lectura de los medidores de agua es realizada cada 24 horas por los operarios de la planta, por lo que se cuenta con los datos diarios de consumo de agua. Para obtener un dato aproximado de la producción de agua con contenido

de lodo, se realizó un promedio entre los datos de salida de las purgas de los clarificadores.

Así mismo, Para comprobar la veracidad de éste dato (es decir, del promedio entre los datos de salida de las purgas de los clarificadores) se realizó un balance de lodos de purgas, el cuál debía ser igual o muy similar al dato obtenido por el método anterior. (Ver Anexo G. Datos de Producción de Agua Potable y Balance de Lodos).

De acuerdo con la literatura encontrada y teniendo en cuenta los requerimientos propias de la PTAP, se determinó que la mejor alternativa de tratamiento inicial para estos lodos sería el *espesamiento por gravedad* (como antecedente a la deshidratación en filtro banda), con el fin de separar el lodo del agua para que esta última pueda ser devuelta al tanque de almacenamiento de agua cruda (reciclaje del agua).

Es así que con base en el dato de caudal promedio de purgas de lodos (estimado en  $500 \text{ m}^3/\text{día}$ ), entre otros datos, se procedió a realizar el prediseño de un espesador de lodos que se ajuste a las necesidades propias de la Planta y con el que se buscaría reducir el volumen de los mismos para obtener un lodo más concentrado y de esta forma facilitar el proceso de deshidratación.

Luego del espesamiento se propone someter el lodo a una deshidratación en filtro banda, teniendo en cuenta la facilidad de uso de este sistema, ya que en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de la Cervecería se encuentran disponibles tres filtros banda, los cuales cumplen la función de remover el agua del lodo proveniente del tratamiento de las aguas residuales, obteniendo así una torta de lodo más fácil de manejar y transportar que el lodo crudo. La Planta cuenta con tres filtros banda (marca Degremont); cada uno cuenta con una banda de 1 metro de ancho y una capacidad de  $5 \text{ m}^3/\text{hr}$ . (Ver foto 9).

Foto 9. Filtro Banda para Deshidratación de Lodos en la Planta de Tratamiento de Agua Residual



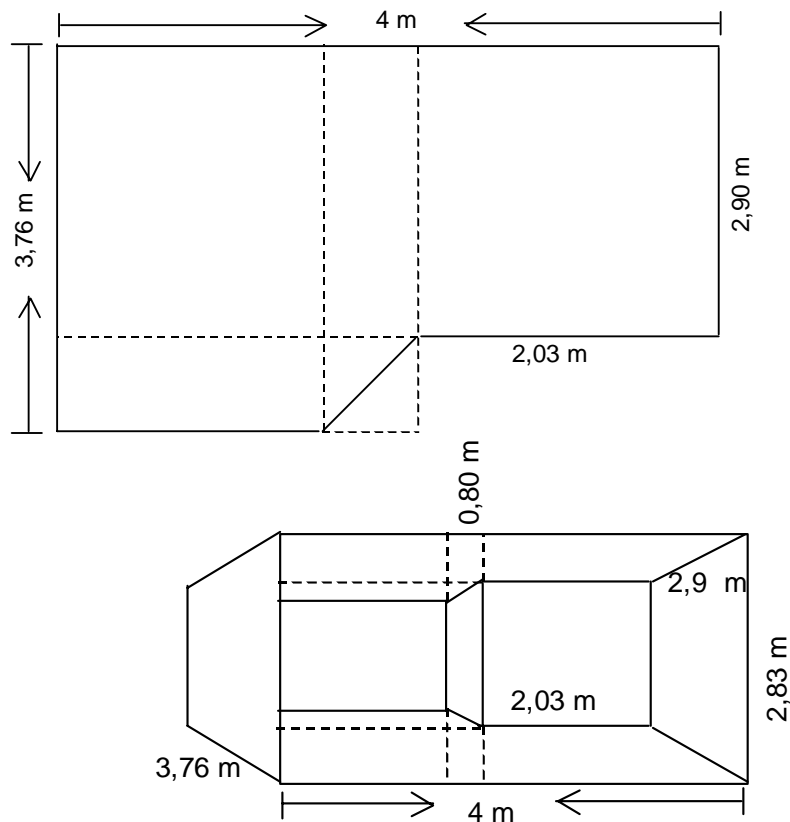
Fuente: Cervecería Leona S.A.

El sistema de Tratamiento propuesto consta de los siguientes procesos e instalaciones unitarias:

**1. Tanque de homogenización de los lodos procedentes de los clarificadores.**

El caudal medio de purgas está estimado en  $500 \text{ m}^3/\text{día}$  y se propone que dicho caudal de purgas ya no sea enviado hacia la PTAR (como sucede en la actualidad), sino que se desvíe hacia el tanque de homogenización que está conectado al pozo-depósito a través de una tubería de entrada de 4" de diámetro. Este tanque es rectangular y está elaborado en concreto con las siguientes dimensiones: largo: 4 m, ancho: 2.83 m, profundidad: 2.9 m. En la figura 10 se presenta el diagrama de este tanque.

*Figura 10. Diagrama tanque de recepción de purgas de lodos. 1- Vista lateral; 2- Vista superior*



*Fuente: La autora.*

El tanque cuenta con una caja de achique en la cual serían instalados los equipos de bombeo.

Una vez se depositasen las purgas de lodo en el tanque de homogenización, se realizaría el bombeo de estas purgas hacia el cono espesador. Esto se haría a través de dos bombas centrífugas sumergibles de 11,28 HP- 0,35 m<sup>3</sup>/min cada una (ver cálculo de la bomba en el Anexo H) y sería conducido a través de una tubería de 4 " de diámetro.

## **2. *Dosificación (en la línea de conducción) del polímero para realizar el espesamiento.***

En la línea de conducción de lodo desde el tanque de homogenización hacia el cono espesador, se aplicaría el polímero seleccionado en los ensayos de espesamiento (4 ppm del polímero 9901 de Nalco), a través de una tubería en PVC de ¾" en la descarga de la bomba de envío del lodo, garantizando así la mezcla del lodo con el polímero durante el recorrido por la tubería hacia el cono espesador.

## **3. *Espesamiento por gravedad en el cono.***

El espesamiento por gravedad se realizaría en un cono de concreto, con un área de 28 m<sup>2</sup> y 6 m de diámetro (el prediseño del cono se presenta en el Anexo I). De acuerdo con la teoría, el espesador sería una unidad de clarificación tipo 4 (remitirse al cuadro 2 de éste documento).

con el espesamiento se busca separar el agua del lodo. La parte líquida (sobrenadante), sería devuelta por gravedad al tanque de almacenamiento de agua cruda buscando con esta medida una recuperación de agua de aproximadamente el 6% del caudal de entrada.

Del espesamiento se derivan dos fases:

- a. Conducción del agua clarificada procedente del espesamiento, de retorno al tanque de almacenamiento de agua cruda.*

Hoy día en la PTAP, el agua con contenido de lodos que sale en las purgas de los clarificadores, es recogida en la conducción general de desagüe de la PTAP a través de un pozo-depósito construido al efecto y conducida por una tubería de 250 mm. de diámetro y 320 m. de longitud hacia la PTAR, convirtiéndose así en un afluente más de las aguas residuales a tratar. Por ello lo que se pretendería con el espesamiento es evitar este paso del agua con contenido de lodo hacia la PTAR.

El agua sobrenadante separada del lodo gracias al espesamiento, sería devuelta al tanque de almacenamiento de agua cruda, por gravedad, a través de una tubería de 4" de diámetro ubicada en la parte superior del tanque.

La cantidad de esta agua en comparación con el agua cruda es del 4% del caudal de agua de entrada, lo que quiere decir que las propiedades del agua sobrenadante no alterarían significativamente las propiedades del agua cruda. De igual manera, el proveedor del producto recomendado para el espesamiento garantiza el uso del mismo sin que se vean afectada las características del agua, pues su función es remover los sólidos suspendidos (en este caso el lodo) sin dejar remanentes de producto en el agua que logra separarse del lodo durante el espesamiento. Sin embargo se recomienda comprobar esto a través de ensayos fisicoquímicos en el agua sobrenadante.

*b. Bombeo y conducción del lodo espesado al sistema de deshidratación existente en la PTAR.*

El lodo espesado sería retirado del cono por la parte inferior del mismo a través de una bomba de tornillo (para evitar el rompimiento del floc) y transportado por una tubería de 3" de diámetro hacia los filtro banda de la PTAR.

#### **4. Deshidratación del lodo.**

Para lograr la deshidratación del lodo se debe agregar en la línea de conducción, desde el cono espesador hacia el filtro banda, el polímero seleccionado durante las pruebas de deshidratación, es decir, el polímero 5130 de Fluidis, con una dosificación de 20 ppm.

#### **5. Almacenamiento de los lodos deshidratados en la tolva del filtro banda.**

Los lodos deshidratados pasarían a una tolva (ubicada al final del proceso del filtro banda) destinada para el almacenamiento temporal de los mismos, con una capacidad de almacenamiento de 2 m<sup>3</sup> y un tiempo de llenado de 4 horas, aproximadamente. Una vez que en la tolva se complete dicho tiempo, esta sería descargada y el lodo sería recogido por unos vehículos que se encargarían de transportarlos hacia el sitio de disposición final.

*Cuadro 25. Tren de Tratamiento para los Lodos de Clarificación de Agua Potable.*

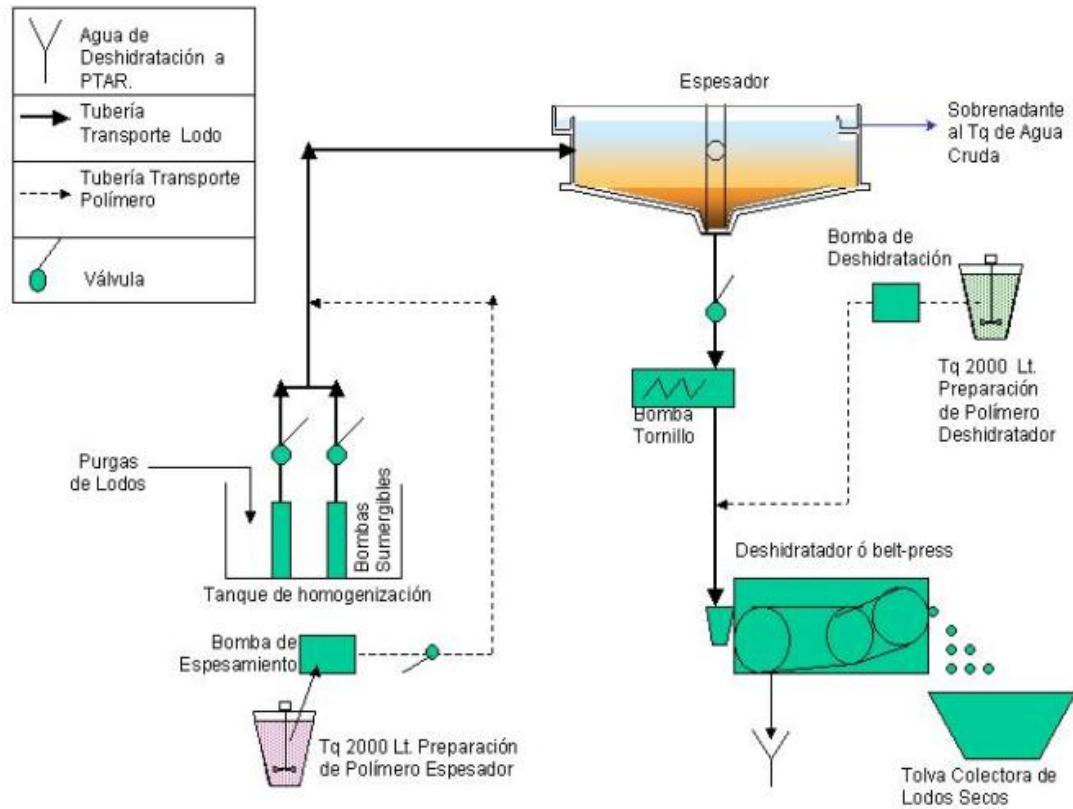
<b>ESPECIFICACIONES</b>	<b>EQUIPO</b>
Recepción de purgas de lodos	Tanque de concreto. Capacidad: 33 m <sup>3</sup>
Transporte purgas de lodos	Tuberías
Espesamiento	Cono espesador
Deshidratación	Filtros banda (PTAR)

*Fuente: la Autora*



En la Figura 11, se presenta el esquema General del Sistema de Tratamiento Propuesto.

Figura 11. Esquema General del Sistema de Tratamiento Propuesto.



Fuente: la Autora

Actualmente el lodo, resultado de la clarificación de agua, que es expulsado a través de las purgas, es conducido por la tubería conectada con el sistema de alcantarillado y llega a mezclarse con las aguas residuales.

Para cambiar esa situación, se determinó de acuerdo con la producción de lodos, la posibilidad de utilizar el tanque de homogenización existente (revisar figura 11) y que actualmente no se encuentra en uso. Esto permitiría reducir costos en el requerimiento de estructuras.

La función de este tanque sería la de recibir las purgas de lodo, permitiendo así que el lodo se mezcle, para que de aquí sea transportado, a través de tuberías, hacia el cono espesador, en donde, gracias a la adición de polímero en la línea de conducción, se presentaría la separación de la fase sólida de la fase líquida.

La fase líquida (sobrenadante) sería transportada a través de una tubería ubicada en la parte lateral superior del cono espesador hacia el tanque de recepción de agua cruda, logrando como ya se mencionó una recuperación de 6% del caudal de agua de entrada, lo que se traduciría en un beneficio económico para la empresa . Al mismo tiempo el lodo espesado sería retirado a través de una tubería ubicada en la parte inferior del cono y transportado hacia uno de los filtros banda ubicados en la PTAR (en la figura 11, denominado deshidratador o belt-press); esto es posible gracias a la capacidad de los filtros con los que se cuenta en la Planta, que es de 5 m<sup>3</sup>/h, y que permitiría recibir el caudal de alimentación de los lodos de la PTAR ya espesados. Luego de realizado el proceso de deshidratación, los lodos pasarían a la tolva colectora para su posterior disposición final.

Nota: el volumen de los tanques para la dosificación del polímero se determinó por facilidad en su preparación y por estandarización de la PTAR en la cuál todos los tanques para este uso presentan la misma capacidad en volumen, es decir, 2000 litros; este volumen ha sido obtenido por la experiencia en la que se escoge un valor intermedio entre 1000 y 3000 litros, ya que valores menores o iguales al primero, generarían una mayor frecuencia de preparación del polímero y por ende mayor disposición de personal; de igual forma, mayores volúmenes de 3000 litros generarían una degradación del polímero y por ende una menor calidad del mismo.

5.2.2 Propuesta para La disposición final del Lodo. Dado que este lodo sería recogido y mezclado en los mismos vehículos de recolección del lodo residual, se le realizaría la misma alternativa de disposición de este último; es decir que sería usado para relleno de terrenos, se dispondría en el relleno sanitario ubicado dentro de los predios de la cervecería y formaría parte de las pruebas realizadas por la empresa SISVITA BIOTECHNOLOGIES.

Actualmente, la empresa contratista SISVITA BIOTECHNOLOGIES S.A., está realizando ensayos con los lodos de la PTAR de la Cervecería, con el fin de buscarle un uso benéfico, en este caso, la posibilidad de usarlo como abono orgánico, enmienda o acondicionador de suelo.

Para la disposición final de los lodos de clarificación de agua potable se propone realizar mezclas con los lodos de la PTAR (Planta de Tratamiento de Aguas Residuales) de la Cervecería; esto es posible gracias a los resultados arrojados por la caracterización del lodo de clarificación de agua potable que lo aleja de ser considerado un residuo especial, por lo que puede ser mezclado con el lodo de la PTAR (Ver cuadro 26) sin que las características de este último varíen significativamente. Esto a su vez fue avalado por el investigador de la empresa contratista y por el responsable de la gestión ambiental de la cervecería, quienes vieron la factibilidad de mezclar los lodos sin ninguna clase de inconveniente para la realización del proyecto.

Cuadro 26. Comparación datos de caracterización lodo PTAP y lodo PTAR Cervecería Leona

PARÁMETROS	UNIDADES	VALOR LODO PTAP	VALOR LODO PTAR (*)	RES. 2309/86
ZINC	mg/L Zn	1.82	83	-
POTASIO	mg/L K	13.08	45	-
HIERRO	mg/L Fe	57.21	1200	-
CALCIO	mg/L Ca	6.625	23	-
MAGNESIO	mg/L Mg	1.692	8	-
CADMIO	mg/L Cd	0.001	2.1	0.5
COBALTO	mg/L Co	0.008	-	-
CROMO	mg/L Cr <sup>+6</sup>	0.008	< 0.05	5
PLOMO	mg/L Pb	0.106	21	5
MERCURIO	mg/L Hg	Ausente	1.23	0.1

(\*) Datos suministrados por la P.T.A.R de Cervecería Leona S.A.

Fuente: la Autora

El proyecto en términos generales se denomina: SOLUCIÓN BIOTECNOLÓGICA PARA LA DISPOSICIÓN FINAL SEGURA DE LOS LODOS DE LA PTAR Y OTROS RESIDUOS ORGANICOS PROPIOS DEL PROCESO INDUSTRIAL DE LEONA S.A., CON LA APLICACIÓN DEL BIOPROCESO SISVITA, cuyo objetivo principal consiste en ajustar el Bioproceso Sisvita, a nivel planta piloto, a las condiciones propias de los lodos y demás residuos orgánicos de Leona S.A., con miras a lograr el control del pasivo ambiental generado por los mismos.

De acuerdo con el objetivo general de este proyecto, es posible llevar a cabo el planteamiento de disposición final para los lodos provenientes de la clarificación de agua potable, ya que, luego de someterlos al tratamiento recomendado (espesamiento y deshidratación), pueden ser mezclados con los lodos de la PTAR, convirtiéndose de esta forma, en otro residuo más, propio del proceso industrial de la Cervecería; logrando de esta manera involucrarlos dentro del proyecto de solución biotecnológica para su disposición final segura.

De acuerdo con los investigadores del proyecto, "El BIOPROCESO SISVITA es un proceso novedoso que con la ayuda de mezclas microbiales benéficas (BIOTERRE) y sin el uso de energías convencionales, biotransforma y deshidrata residuos orgánicos por lo general contaminantes, para convertirlos en nuevos productos de alto valor técnico y comercial útiles a las cadenas productivas".

"Presenta las siguientes ventajas: elimina el mal olor generado en la descomposición orgánica; estandariza un producto final; da valor agregado a un producto de desecho, al obtener una base fertilizante fácil de ajustar como fertilizante orgánico mineral; controla la población de vectores (moscas y zancudos, etc); no produce lixiviados; se trata de un proceso bastante rápido ( 5 a 10 días), que reduce la humedad a niveles menores al 13%, logrando un producto final estable.

## 6. VALORACIÓN ECONÓMICA DEL SISTEMA DE ESPESAMIENTO DE LODOS

Para entrar a proponer el costo total del proyecto, se realizó una proyección de los costos de inversión para la implementación del sistema de tratamiento propuesto, en este caso el sistema de espesamiento (pues el de deshidratación ya existe, es decir que no habría que realizar una inversión en este caso). Dichos datos fueron obtenidos en la División Financiera de la Cervecería Leona S.A., de acuerdo con los recursos allí disponibles. En el Cuadro 27, se presenta la recopilación de los costos de implementación del cono espesador.

*Cuadro 27. Costos de Implementación del Prediseño del Cono Espesador.*

ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	VR. UNITARIO(\$)	VR. TOTAL	AIU	IVA	VALOR TOTAL
<b>1</b>	<b>TUBERIAS</b>							
1,1	Tubería CS 4"	ML	43	\$ 145.700	\$ 6.265.100	\$ 939.765	\$ 1.002.416	\$ 8.207.281
1,2	Tubería PVC 3/4"	ML	33	\$ 24.700	\$ 815.100	\$ 122.265	\$ 130.416	\$ 1.067.781
1,3	Tubería CS 3"	ML	103	\$ 105.500	\$ 10.866.500	\$ 1.629.975	\$ 1.738.640	\$ 14.235.115
1,4	Soporteria	GL	1	\$ 1.500.000	\$ 1.500.000	\$ 225.000	\$ 240.000	\$ 1.965.000
				<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 19.446.700</b>	<b>\$ 2.917.005</b>	<b>\$ 3.111.472</b>	<b>\$ 25.475.177</b>
<b>2</b>	<b>ACCESORIOS</b>							
2,1	Codo 90° de 4" CS	UN	6	\$ 70.200	\$ 421.200	\$ 63.180	\$ 67.392	\$ 551.772
2,2	Codo 90° de 3/4" PVC	UN	10	\$ 15.550	\$ 155.500	\$ 23.325	\$ 24.880	\$ 203.705
2,3	Codo 90° de 3" CS	UN	16	\$ 49.700	\$ 795.200	\$ 119.280	\$ 127.232	\$ 1.041.712
2,4	Codo 45° de 3/4" PVC	UN	2	\$ 15.550	\$ 31.100	\$ 4.665	\$ 4.976	\$ 40.741
2,5	Valvula CS 4" Compuerta	UN	6	\$ 990.000	\$ 5.940.000	\$ 891.000	\$ 950.400	\$ 7.781.400
2,6	Valvula PVC 3/4" globo	UN	2	\$ 90.000	\$ 180.000	\$ 27.000	\$ 28.800	\$ 235.800
2,7	Valvula CS 3" Compuerta	UN	1	\$ 710.000	\$ 710.000	\$ 106.500	\$ 113.600	\$ 930.100
2,8	Brida CS 4"	UN	8	\$ 100.200	\$ 801.600	\$ 120.240	\$ 128.256	\$ 1.050.096
2,9	Brida CS 3"	UN	2	\$ 66.200	\$ 132.400	\$ 19.860	\$ 21.184	\$ 173.444
				<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 9.167.000</b>	<b>\$ 1.375.050</b>	<b>\$ 1.466.720</b>	<b>\$ 12.008.770</b>
<b>3</b>	<b>BOMBAS</b>							
3,1	Bomba sumergible	UN	2	\$ 6.000.000	\$ 12.000.000	\$ 1.800.000	\$ 1.920.000	\$ 15.720.000
3,2	Bombas de envío	UN	2	\$ 4.000.000	\$ 8.000.000	\$ 1.200.000	\$ 1.280.000	\$ 10.480.000
				<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 20.000.000</b>	<b>\$ 3.000.000</b>	<b>\$ 3.200.000</b>	<b>\$ 26.200.000</b>

Cuadro 27. Costos de Implementación del Prediseño del Cono Espesador.

<b>4</b>	<b>TANQUE ESPESADOR</b>							
4,1	Tanque espesador	UN	1	\$ 37.500.000	\$ 37.500.000	\$ 5.625.000	\$ 6.000.000	\$ 49.125.000
4,2	Obra civil	GL	1	\$ 10.000.000	\$ 10.000.000	\$ 1.500.000	\$ 1.600.000	\$ 13.100.000
				<b>SUBTOTAL</b>	\$ 47.500.000	\$ 7.125.000	\$ 7.600.000	\$ 62.225.000
<b>5</b>	<b>SISTEMA DOSIFICADOR</b>							
5,1	Tanque preparación	UN	1	\$ 1.585.000	\$ 1.585.000	\$ 237.750	\$ 253.600	\$ 2.076.350
5,2	Bombas dosificación	UN	2	\$ 2.000.000	\$ 4.000.000	\$ 600.000	\$ 640.000	\$ 5.240.000
				<b>SUBTOTAL</b>	\$ 5.585.000	\$ 837.750	\$ 893.600	\$ 7.316.350
<b>6</b>	<b>SISTEMA BARREDOR DE LODOS</b>							
6.1	Motor (4 HP, 1750 rpm)	UN	1	\$ 8.000.000	\$ 8.000.000	\$ 1.200.000	\$ 1.280.000	\$ 10.480.000
	Reductor de velocidad	UN	1	\$ 2.000.000	\$ 2.000.000	\$ 300.000	\$ 320.000	\$ 2.620.000
	Montaje electromecánico	UN	1	\$ 4.000.000	\$ 4.000.000	\$ 600.000	\$ 640.000	\$ 5.240.000
	Estructura metálica (barandas, tubo central)	GL	1	\$ 6.000.000	\$ 6.000.000	\$ 900.000	\$ 960.000	\$ 7.860.000
				<b>SUBTOTAL</b>	\$ 20.000.000	\$ 3.00.000	\$ 3.200.000	\$ 26.200.000

**TOTAL \$ 159.425.297**

Fuente: Datos Ingeniería Cervecería Leona S.A.

De acuerdo con los resultados del cuadro anterior, el costo total del proyecto está estimado en \$159'425.297 y, por ser un gasto de inversión para la Cervecería, se requiere saber si sería rentable implementarlo; para ello se realizó la valoración económica del sistema de tratamiento de lodos propuesto, utilizando la metodología para la evaluación De proyectos desde el punto de vista económico, establecida en la Cervecería, denominada EVA\* (Valor Económico Agregado). (Ver información sobre este método en el Anexo J).

\* Por sus siglas en inglés.

El análisis económico por medio de esta metodología permite determinar si un proyecto será rentable, teniendo en cuenta los gastos de inversión y los ingresos esperados con la implementación del proyecto. Luego de analizar todas las variables que intervienen en la valoración se obtiene un índice de rentabilidad, el cuál debe ser positivo para que el proyecto sea considerado como rentable.

Para la valoración económica del proyecto se realizó una proyección de cinco (5) años, contando con dos escenarios: el primero teniendo en cuenta el máximo caudal de producción de purgas de lodos (15000 m<sup>3</sup>/mes); y el segundo teniendo en cuenta el mínimo caudal de producción de purgas de lodos (3500 m<sup>3</sup>/mes)\*\*. Fue necesario tener en cuenta estos dos escenarios puesto que la producción de purgas de lodos no es constante, debido a las condiciones climáticas y a los requerimientos propios del tratamiento que hacen que se presenten fluctuaciones de caudal.

La idea de trabajar con estos dos escenarios era comprobar si aún cuando no fuese posible contar siempre con el máximo caudal de purgas (con el cual se podría ahorrar más agua), el proyecto seguiría siendo rentable.

El primer escenario fue denominado como un EVA OPTIMISTA, teniendo en cuenta que de cumplirse lo estimado allí, el proyecto podría ser considerado como muy atractivo económicamente. Los resultados de este análisis se presentan en el cuadro 28.

El segundo escenario, denominado “EVA PESIMISTA” ya no sería rentable para la empresa, Los resultados de este análisis se presentan en el cuadro 29.

Nota: los soportes de cálculos de los cuadros se encuentran consignados en el Anexo K.

---

\*\* Los datos de caudal fueron obtenidos de las lecturas de entrada y salida de agua en los medidores de los clarificadores desde el mes de enero hasta mayo de 2004.



Cuadro 28. EVA OPTIMISTA

<b>ANÁLISIS EVA</b>	<b>AÑO 1</b>	<b>AÑO 2</b>	<b>AÑO 3</b>	<b>AÑO 4</b>	<b>AÑO 5</b>
Ingresos (Ahorros por Tratamiento de Agua)	\$ 142.740.000	\$ 151.304.400	\$ 160.382.664	\$ 170.005.624	\$ 180.205.961
<b>Total Ingresos</b>	<b>\$ 142.740.000</b>	<b>\$ 151.304.400</b>	<b>\$ 160.382.664</b>	<b>\$ 170.005.624</b>	<b>\$ 180.205.961</b>
Personal	\$ 1.060.020	\$ 1.123.621	\$ 1.191.038	\$ 1.262.501	\$ 1.338.251
Servicios (energía)	\$ 38.999.750	\$ 41.339.735	\$ 43.820.120	\$ 46.449.327	\$ 49.236.286
Mantenimiento	\$ 0	\$ 240.000	\$ 241.440	\$ 242.888	\$ 244.346
Depreciación	\$ 15.942.530	\$ 17.058.507	\$ 18.252.602	\$ 19.530.284	\$ 20.897.404
<b>Total Gastos</b>	<b>\$ 56.002.300</b>	<b>\$ 59.761.863</b>	<b>\$ 63.505.200</b>	<b>\$ 67.485.000</b>	<b>\$ 71.716.287</b>
<b>Utilidad Operacional Antes de Imptos</b>	<b>\$ 86.737.700</b>	<b>\$ 91.542.537</b>	<b>\$ 96.877.464</b>	<b>\$ 102.520.624</b>	<b>\$ 108.489.674</b>
Impuesto Renta	\$ 33.394.014	\$ 35.243.877	\$ 37.297.824	\$ 35.882.218	\$ 37.971.386
<b>Utilidad después de Imptos</b>	<b>\$ 53.343.685</b>	<b>\$ 56.298.660</b>	<b>\$ 59.579.640</b>	<b>\$ 66.638.405</b>	<b>\$ 70.518.288</b>
Capital	\$ 159.425.297	\$ 143.482.767	\$ 136.468.054	\$ 127.768.216	\$ 117.181.706
Wacc	19,8%	17,6%	17,6%	17,6%	17,6%
<b>EVA</b>	<b>\$ 21.713.707</b>	<b>\$ 31.045.693</b>	<b>\$ 35.561.263</b>	<b>\$ 44.151.199</b>	<b>\$ 49.894.308</b>
<b>VPEVA <math>VP=VF/(1+K)^n</math></b>	<b>\$ 18.118.914</b>	<b>\$ 22.448.468</b>	<b>\$ 21.865.288</b>	<b>\$ 27.146.919</b>	<b>\$ 30.678.141</b>

<b>INVERSION NETA</b>	<b>\$ 159.425.297</b>
<b>SUMA VPEVA</b>	<b>\$ 120.257.730</b>
<b>Índice de rentabilidad</b>	<b>0,75</b>

Fuente: División Financiera. Cervecería Leona S.A



De acuerdo con los resultados del cuadro anterior se observa que se parte de unos ingresos y de unos gastos. Los primeros deben ser mayores que los segundos, de tal forma que permita en un momento dado empezar a recuperar la inversión. Para obtener los datos de los ingresos, se tuvo en cuenta lo siguiente:

- Ahorros en el costo de tratamiento de las aguas residuales: Teniendo en cuenta que el costo de tratamiento de las aguas residuales por  $m^3$  es de \$793\*, se esperaba tener un ahorro en este tratamiento si se realizara el proyecto, puesto que se evitaría el paso del agua proveniente de las purgas de lodos hacia la PTAR. Por lo tanto, si se cuenta con un caudal de purgas de lodos de  $15000 m^3$  en el

mes, se tiene entonces:  $15000 \frac{m^3}{mes} \times \$793 = \$11'895.000 \frac{m^3}{mes}$

De acuerdo con este resultado se observa que con la implementación del proyecto se esperaba un ahorro mensual de \$11'895.000 (aproximadamente) y realizando la proyección anual (considerando este valor constante), se esperaba un ahorro por tratamiento de agua de \$ 142.740.000, en el primer año y así sucesivamente hasta el quinto año (realizando el incremento anual con la inflación). Los gastos provienen de las inversiones proyectadas, tales como costo total del proyecto (estimado en \$159.425.297); gastos de mantenimiento; gastos fijos (personal y energía) y la depreciación de los equipos.

Entonces, teniendo en cuenta todas las variables anteriores, se procedió a calcular el EVA, cuyo valor se obtuvo de la siguiente forma: EVA = Utilidad (después de impuestos) – (Inversión \* Tasa de oportunidad (Wacc)). Después de esto, el EVA se trajo a valor presente neto (VPN), para saber cuánto costaría el proyecto a pesos de hoy. Con este valor se realizó la proyección del proyecto a 5 años y se comparó con la inversión obteniendo así un índice de rentabilidad, que hace referencia a lo que se recibiría como beneficio, sobre lo que costaría implementar el proyecto a pesos de hoy. El índice de rentabilidad debe ser positivo.

En este caso, en el primer escenario, se observa que el índice de rentabilidad es positivo, por lo que se puede decir que el proyecto sería rentable en un plazo de cinco años; caso contrario a lo que sucede con el segundo escenario (ver cuadro 29), en el que el índice de rentabilidad es negativo, lo que quiere decir que el proyecto ya no sería rentable. Por lo tanto para que el proyecto llegase a ser atractivo económicamente, se haría necesario trabajar con el caudal máximo de producción de purgas de lodos con el que se obtendrían mayores beneficios económicos provenientes del ahorro en el tratamiento de las aguas residuales. Sin embargo, como no es posible garantizar un caudal de producción constante de purgas de lodos, se podrían analizar los otros factores que intervienen en la realización del proyecto, como son los beneficios ambientales (como el ahorro del recurso agua), que también hacen parte importante del proceso productivo.

---

\* Fuente: Cervecería Leona. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.

Cuadro 29. EVA PESIMISTA

<b>ANÁLISIS EVA</b>	<b>AÑO 1</b>	<b>AÑO 2</b>	<b>AÑO 3</b>	<b>AÑO 4</b>	<b>AÑO 5</b>
Ingresos (Ahorros por Tratamiento de Agua)	\$ 33.306.000	\$ 33.505.836	\$ 33.706.871	\$ 33.909.112	\$ 34.112.567
<b>Total Ingresos</b>	<b>\$ 33.306.000</b>	<b>\$ 33.505.836</b>	<b>\$ 33.706.871</b>	<b>\$ 33.909.112</b>	<b>\$ 34.112.567</b>
Personal	\$ 1.060.020	\$ 1.123.621	\$ 1.191.038	\$ 1.262.501	\$ 1.338.251
Servicios (energía)	\$ 38.999.750	\$ 39.233.749	\$ 39.469.151	\$ 39.705.966	\$ 39.944.202
Mantenimiento	\$ 0	\$ 240.000	\$ 241.440	\$ 242.888	\$ 244.346
Depreciación	\$ 8.264.135	\$ 8.842.624	\$ 9.461.608	\$ 10.123.921	\$ 10.832.595
<b>Total Gastos</b>	<b>\$ 48.323.905</b>	<b>\$ 49.439.995</b>	<b>\$ 50.363.238</b>	<b>\$ 51.335.276</b>	<b>\$ 52.359.394</b>
<b>Utilidad Operacional Antes de Imptos</b>	<b>-\$ 15.017.905</b>	<b>-\$ 15.934.159</b>	<b>-\$ 16.656.367</b>	<b>-\$ 17.426.164</b>	<b>-\$ 18.246.827</b>
<b>Impuesto Renta</b>	<b>-\$ 5.781.894</b>	<b>-\$ 6.134.651</b>	<b>-\$ 6.412.701</b>	<b>-\$ 6.099.157</b>	<b>-\$ 6.386.389</b>
<b>Utilidad después de Imptos</b>	<b>-\$ 9.236.012</b>	<b>-\$ 9.799.508</b>	<b>-\$ 10.243.666</b>	<b>-\$ 11.327.007</b>	<b>-\$ 11.860.437</b>
<b>Capital</b>	<b>\$ 82.641.350</b>	<b>\$ 74.377.215</b>	<b>\$ 70.740.996</b>	<b>\$ 66.231.257</b>	<b>\$ 60.743.524</b>
<b>Wacc</b>	<b>19,8%</b>	<b>17,6%</b>	<b>17,6%</b>	<b>17,6%</b>	<b>17,6%</b>
<b>EVA</b>	<b>-\$ 25.632.056</b>	<b>-\$ 22.889.897</b>	<b>-\$ 22.694.081</b>	<b>-\$ 22.983.708</b>	<b>-\$ 22.551.298</b>
<b>VPEVA <math>VP=VF/(1+K)^n</math></b>	<b>-\$ 21.388.564</b>	<b>-\$ 16.551.189</b>	<b>-\$ 13.953.740</b>	<b>-\$ 14.131.821</b>	<b>-\$ 13.865.948</b>
<b>INVERSION NETA</b>	<b>\$ 133.225.297</b>				
<b>SUMA VPEVA</b>	<b>-\$ 79.891.263</b>				
<b>Indice de rentabilidad</b>	<b>-0,60</b>				

Fuente: División Financiera. Cervecería Leona S.A.

## 7. CONCLUSIONES

La técnica de deshidratación en filtro banda seleccionada desde un principio para el manejo de los lodos provenientes de la potabilización del agua, surgió a partir de los requerimientos propios de la industria en los que se tuvo en cuenta la disponibilidad de recursos.

Se pudo comprobar, a través de los ensayos de deshidratación, que los lodos provenientes de la clarificación de agua potable de la PTAP de Cervecería Leona, sí pueden ser deshidratados en uno de los filtros banda disponibles en la PTAR gracias a la eficiencia en el funcionamiento de estos equipos y a que tiene la capacidad de tratar un nuevo caudal de lodos aparte del lodo residual.

Para llevar a cabo la deshidratación del lodo de la PTAP fue necesario recurrir al uso de un polímero, en este caso el 5130 de Fluidis disponible para la Cervecería y que hasta el momento de la conclusión de los ensayos, fue el que arrojó mejores resultados.

La producción de los lodos provenientes de la clarificación del agua cruda se ve favorecida por la adición de coagulantes y floculantes; por lo tanto, sus componentes principales son los sulfatos y el aluminio.

La caracterización del lodo de purgas de clarificación (de la PTAP) permitió observar que no es un residuo peligroso (niveles mínimos o ausentes de metales pesados); que no tiene valor como fertilizante de suelos (poca presencia de materia orgánica y otros nutrientes) y en términos generales, es un lodo que está formado por las características propias del agua cruda y por el tipo de coagulante aplicado, en este caso, sulfato de aluminio.

El lodo proveniente de la potabilización del agua puede ser mezclado con otros residuos, como el lodo proveniente del tratamiento de las aguas residuales, ya que no variarían significativamente sus características iniciales, de acuerdo con los resultados obtenidos en la caracterización.

Teniendo en cuenta las características propias del lodo (de la PTAP), el sistema de tratamiento propuesto es el espesamiento por gravedad como antecedente a la deshidratación.

Con relación a la valoración económica, se prevé que el proyecto será más atractivo en la medida que se comience a implementar la modalidad de pago de tasas de uso y retributiva, por captación de agua cruda y por vertimientos respectivamente. En el primer caso por el reciclaje del agua sobrenadante del espesamiento, que podría ayudar a disminuir el caudal de captación y en el segundo, porque se disminuiría en un 6% (aprox.) el caudal de vertimiento ayudando a disminuir así el costo por vertido.

Se observó que el valor presente del EVA en el primer escenario es positivo, lo que quiere decir que aún cuando para la Cervecería significa realizar unas inversiones y cubrir unos gastos mensuales teniendo en cuenta su costo de capital, el proyecto sería financiable.

La propuesta para la disposición final de los lodos provenientes de la clarificación de agua potable consiste en la mezcla, luego de la deshidratación, con el lodo de la PTAR (en una proporción de 80% del lodo de la PTAR y 20% lodo de la PTAP), para de esta forma lograr involucrarlos en un nuevo proyecto que se llevará a cabo en la cervecería por intermedio de la empresa contratista SISVITA BIOTECHNOLOGIES S.A. para la búsqueda de nuevas alternativas en la disposición final segura de dichos residuos.

Los beneficios ambientales del proyecto se verían reflejados en la conservación del recurso agua (reciclaje) y en el manejo de los residuos semisólidos (en este caso lodos) como parte de la gestión integral de los mismos.

## 8. RECOMENDACIONES

Desarrollar proyectos de ahorro al interior de la cervecería para que se disminuya la cantidad de agua a tratar y por ende el lodo producido.

Hacer un seguimiento de las características de la cuenca del Río Bogotá, dado que se presentan diferentes periodos de tiempo con condiciones de calidad de agua muy diferente a los valores típicos, lo que podría afectar el tratamiento aplicado, según datos históricos de la Cervecería.

Debido a que las características del lodo (proveniente de la potabilización del agua) pueden variar constantemente, es necesario seguir realizando ensayos para garantizar el buen funcionamiento del polímero seleccionado tanto para espesamiento como para deshidratación.

Si en un futuro se plantea una forma de disposición para los lodos, diferente a la que se propone en este proyecto, deberá realizarse un tratamiento adicional (p.Ej.: filtración) que permita garantizar la remoción de la carga de microorganismos, en especial, coliformes fecales.

Con base en los resultados de este proyecto pueden surgir nuevas investigaciones que continúen en la línea de generar nuevas alternativas para el manejo de estos lodos, con las que se busque introducirlos como parte de un proceso productivo.

Se deben realizar análisis fisicoquímicos en el agua sobrenadante obtenida luego del espesamiento a nivel de laboratorio, para poder así determinar su calidad en comparación con la del agua cruda; ya que un punto importante en la realización del proyecto es poder devolver el agua sobrenadante al tanque de almacenamiento de agua cruda, sin que se vean alteradas las propiedades iniciales de la misma.

Una vez se implemente el sistema de tratamiento propuesto, es importante realizar análisis microbiológicos de la mezcla del sobrenadante y el agua cruda, para poder así determinar el comportamiento de la carga microbiana.

Es importante que tanto las empresas del sector público como del privado, fomenten el desarrollo de nuevos proyectos que involucren la búsqueda de soluciones biotecnológicas para el manejo de los residuos de las Plantas de Tratamiento de Agua Potable.

## BIBLIOGRAFÍA

ACODAL SECCIONAL OCCIDENTE. Curso de Operación y Mantenimiento de Plantas de Potabilización Bavaria S.A. Santa fe de Bogotá, agosto de 2004.

ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. Teoría y Práctica de la Purificación del Agua. Colombia: Colciencias, 1992.

BUSTOS ALVAREZ, Marco Antonio. Automatización de la Planta de Aguas Potables en Cervecería Leona S.A. Bogotá, 2003, 216 p. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico). Escuela Colombiana de Carreras Industriales. Facultad de Ingeniería Electrónica.

CASTAÑEDA SARABIA, Onia. Determinación de la Toxicidad de los Lodos Generados por una Planta Potabilizadora, Utilizando Bioensayos. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). México D.F.

DEGRÉMONT. Manual Técnico del Agua. España: S.A.E. de Depuración de Aguas DEGRÉMONT. Cuarta edición, 1979.

Enciclopedia® Microsoft® Encarta 2001. © 1993-2000 Microsoft Corporation.

ESCOBAR RIVERA, Juan Carlos. Gestión Integral de Manejo de Lodos de Plantas de Tratamiento de Agua Potable. Curso de Operación de Plantas de Potabilización de Agua. ACODAL. Santafé de Bogotá, Agosto 9 al 13 de 2004.

GARCÉS ARANCIBIA Fernando, DÍAZ AGUIRRE Juan Carlos, DELLEPIANE NAVARRO Oscar Manuel. Acondicionamiento de Lodos Producidos en el Tratamiento de Agua Potable. SANTIAGO. CHILE.

MINISTERIO DE SALUD (Colombia). Decreto 475/98. Capítulo III.

MINISTERIO DE SALUD (Colombia). Resolución 2309 del 24 de febrero de 1986. Capítulo II.

Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS – 2000. Sección II Título C. sistemas de potabilización. República de Colombia. Ministerio de Desarrollo Económico. Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico. Bogota D.C., Noviembre de 2.000.

Reuniones de Trabajo con Funcionarios de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) y Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR).

Reuniones de Trabajo con el Ingeniero Jaime Toquica. Coordinador de Gestión Ambiental. Cervecería Leona S.A.

ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Purificación del Agua. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingenieros, 2002. p. 290. Capítulo 9. Tratamiento de Lodos. P. 289 – 305.

SANDOVAL YOVAL Luciano, MOTELLANO PALACIOS Leticia, MARTÍN DOMÍNGUEZ Alejandra, SÁNCHEZ GUZMÁN Laura, SANTANA RAMÍREZ Ma. de Lourdes, MORÁN PLATA Mario. Tratabilidad de los Lodos Producidos en la Potabilización del Agua. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Coordinación de tratamiento y Calidad del Agua. Subordinación de Potabilización.

#### PÁGINAS WEB:

<http://www.nlm.nih.gov/medlineplus/spanish/drinkingwater.html>

<http://www.epa.gov/safewater/agua.html>

[http://www.atsdr.cdc.gov/es/general/es\\_groundwater\\_fs.html](http://www.atsdr.cdc.gov/es/general/es_groundwater_fs.html)

<http://www.lennotech.com/espanol/FAQ-descripcion.htm>

<http://agua.geoscopio.com/medioambiente/temas/sequia/index.php>

[http://www.aquamarket.com/temas\\_interes/](http://www.aquamarket.com/temas_interes/)

<http://hispagua.cedex.es/>

<http://www.eco2site.com>

<http://www.cna.gob.mx/portal/inicial.asp>

[http://www.damsreport.org/report/wcd\\_informe.htm](http://www.damsreport.org/report/wcd_informe.htm)

<http://www.infoagua.org/http://www.epa.gov/safewater/agua/estandares.html>

<http://www.iespana.es/potablewater/>

<http://usuarios.lycos.es/drinkingwater/>

[www.cepis.ops-oms.com](http://www.cepis.ops-oms.com)

[www.miaqua.com](http://www.miaqua.com)

<http://www.conama.cl/rm/568/article-1416.html>

<http://www.cdmb.gov.co/nserviciosp.php>

## Anexo A

### REGLAMENTO TÉCNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BASICO RAS – 2000. SECCION II. TÍTULO C. SISTEMAS DE POTABILIZACIÓN

#### C.13. MANEJO DE LODOS

##### C.13.3 ESTUDIOS PREVIOS

C.13.3.2 Evacuación de los lodos. Debe estudiarse la necesidad de los métodos mecánicos o sifones de flujo intermitente, ya que no se justifican cuando la turbiedad es baja la mayoría del tiempo. El consumo de agua de un sistema de sifones se debe tanto al flujo de lodos que tiene que extraer como al consumo propio. Esto puede considerarse como el costo de operación que reemplaza el de la energía eléctrica y el del desgaste mecánico que existe en el drenaje convencional automático de sedimentadores.

Sin embargo, si este costo del agua se considera muy grande y se quiere evitar perder dicho volumen de líquido, puede colocarse una válvula de flotador en el eyector, que solo permite que éste trabaje durante los 60 s que necesita para cebar el sifón o podría conectarse los eyectores a un tanque de alimentación que por medio de válvulas solenoides programables permitiese el paso del agua a cada uno de los eyectores en el momento que se requiera y por el tiempo necesario para imprimirlos. Esto induce una cierta sofisticación mecánica en el sistema, que podría hacer más recomendables las válvulas de diafragma.

C.13.3.2.1 Evacuación periódica. Debe estudiarse la necesidad de adquirir este sistema para eliminar los sólidos provenientes de la decantación de partículas discretas (presedimentadores o desarenadores), por ser estas partículas demasiado pesadas para ser arrastradas fácilmente por el flujo en múltiples perforados, en la cual la velocidad no se puede mantener alta en todo el trayecto.

C.13.3.2.2 Evacuación continua. Este sistema debe ser evaluado y utilizado, teniendo en cuenta los equipos requeridos para su mejor funcionamiento.

C.13.3.3 Disposición final de lodos. El tipo de tratamiento que se va a utilizar para tratar el lodo debe encontrarse acorde al volumen y calidad de éste para lo cual debe realizarse un estudio detallado de los costos que conlleva el proceso de tratamiento seleccionado, según lo establecido en el capítulo A.7.

La tabla C.13.1 es una guía para la selección del tratamiento de los lodos de acuerdo a los datos promedio del porcentaje de concentración de sólidos en diferentes tipos de lodos.



TABLA C.13.1. Concentración de lodos en el tratamiento de aguas

Tipo de Lodo	Concentración de sólidos (%)
Proceso de sedimentación	0.5 – 2
Agua de lavado de filtros	50 – 1000 <sup>a</sup>
Proceso de ablandamiento con soda y cal	2 – 15
<b>Espesado gravitacional</b>	
Sedimentos de coagulación y lavado	2 – 20 (típico 2 – 4)
Agua lavado de filtros	Mayor a 4
Lodos de cal	15 – 30
<b>Filtración al vacío</b>	
Lodos coagulación	10 – 20
Ablandamiento con cal (>85% contenido de CaCO <sub>3</sub> )	50 – 70
Ablandamiento con cal (alto contenido de Mg(OH) <sub>2</sub> )	20 – 25
<b>Filtración a presión</b>	
Lodos de coagulación	30 – 45
Lodos de cal	55 – 70
<b>Centrífugas</b>	
Lodos de coagulación	10 – 20
Lodos de cal y aluminio	15 – 40
Lodos de cal	30 – 70
<b>Camas de secado</b>	
Lodos de coagulación	15 – 30
Lodos de cal	50 – 70
<b>Lagunas</b>	
Lodos de coagulación	7 – 15
Lodos de cal	50 - 60

<sup>a</sup> concentración en mg/L

Fuente: RAS (2000)

C.13.3.4 Minimización de la producción de lodos. Para reducir los costos de inversión inicial, operación y mantenimiento en los sistemas de tratamiento de lodos deben tomarse en cuenta los siguientes criterios para realizar es estudio:

- Cambiar el tratamiento convencional por una filtración directa, si las condiciones fisicoquímicas del afluente lo permiten.
- Sustituir coagulantes por uso de polímeros, los cuales son más eficientes a bajas dosis.
- Ahorrar el consumo de productos químicos por determinación de la dosificación óptima sobre intervalos frecuentes cuando cambian las características del agua cruda.

#### C.13.4.1 Evacuación de los lodos

##### C.13.4.1.1 Sistema de evacuación

El tratamiento de los lodos puede realizarse por medio de dos métodos de descarga intermitente:

1. El mecánico por medio de válvulas automáticas, que deben ser accionadas por aire comprimido o por agua mediante un programador electrónico o electroválvula que abre o cierra los circuitos para comandar las aperturas según sea la periodicidad que se requiera.
2. El hidráulico por medio de sifones de flujo intermitente, en los cuales se hace uso de las características del sifón hidráulico para cebarlo y pararlo sin necesidad de recurrir a ningún elemento mecánico.

#### C.13.4.1.2 Tipo de evacuación:

1. Evacuación periódica. Deben dejarse trabajar los sedimentadores durante un período de tiempo que puede variar entre 15 días o uno o varios meses, según sea la turbiedad del agua cruda durante ese período, la dosis y tipo de coagulantes y el volumen muerto dejado en el tanque para almacenamiento de fangos.
2. Evacuación continua. La evacuación continua puede hacerse en dos formas distintas, por métodos mecánicos o sifones de flujo intermitente y por métodos hidráulicos.

##### a) Remoción mecánica

Este método puede llevarse a cabo de dos formas:

- Con equipos que empujan por el fondo, lentamente, el lodo hacia la boca de salida, desde donde es extraído; en este caso el lodo es arrastrado por el equipo y la boca está quieta.
- Con equipos que transportan por el fondo las bocas de salida para ir succionando el lodo en su sitio a medida que cae; en este caso el lodo está quieto y son las bocas de salida las que se mueven.

#### C.13.4.4 Disposición final de los lodos:

C.13.4.4.1 Almacenamiento. Los lodos generados por los procesos de tratamiento del agua deben clasificarse principalmente en los siguientes grupos:

- Residuos por el retrolavado de los filtros.
- Lodos del proceso de coagulación con aluminio o hierro.
- Precipitados de hierro y manganeso.
- Lodos del proceso de ablandamiento.

El almacenamiento depende de la cantidad de lodos producidos por la planta de tratamiento.

## Anexo B. Procedimientos de los Análisis Físicoquímicos

**Fotometría.** Los ensayos realizados por este método fueron los siguientes: DQO, Nitratos, Nitritos, Amonio y Aluminio. A continuación se describe el procedimiento de cada uno de ellos.

**1. DQO.** El ensayo de la DQO, se divide en dos partes: DQO de rango bajo y DQO de rango alto. La primera es para el análisis de muestras que se encuentran en un rango de detección entre 0 – 150 ppm; dentro de este rango se encuentran ubicadas las muestras de agua cruda de río y de agua filtrada. Ya la segunda parte del método, se utiliza para el análisis de muestras que se encuentran en un rango de detección más alto, entre 150 – 3000 ppm, como el lodo.

Entonces, para llevar a cabo la determinación de la DQO se llevaron las muestras al laboratorio, y se siguió el siguiente procedimiento:

A. DQO RANGO BAJO: 0 – 150 ppm.

- Materiales: Tubos de ensayo con sus tapas y pipetas plásticas.
- Equipos: Espectrofotómetro DR/2010 de Nalco; thermoreacktor TR 300 de Nalco.
- Procedimiento:
  1. Adicionar 1.5 ml de  $K_2Cr_2O_7$  (Dicromato de Potasio para rango bajo)
  2. Adicionar 2.5 ml de muestra
  3. Adicionar 3.5 ml de  $H_2SO_4$ .
  4. Digestión\* de las muestras por 2 horas en el thermoreacktor.

B. DQO RANGO ALTO: 150 – 3000 ppm.

- Materiales: Tubos de ensayo con sus tapas y pipetas plásticas.
- Equipos: Fotómetro SQ 118 de Merck, thermoreacktor TR 300 de Nalco.
- Procedimiento:
  1. Adicionar 1.5 ml de  $K_2Cr_2O_7$  (Dicromato de Potasio para rango alto)
  2. Adicionar 3 ml de muestra
  3. Adicionar 2.5 ml de  $H_2SO_4$ .
  4. Digestión de las muestras por 2 horas en el thermoreacktor.

---

\* Para ver la metodología de la digestión, remitirse al Anexo M de esta misma sección.

## 2. Nitratos.

- Materiales: Tubos de ensayo con sus tapas y pipetas plásticas.
- Equipo: Fotómetro SQ 118 de Merck (Método 53, cubeta de 50 mm).
- Procedimiento: para este ensayo, se utilizó el kit para la determinación de Nitratos de Merck.
  - a. Adicionar una micro cucharada del reactivo  $\text{NO}_3 - 1\text{K}$  en cada tubo de ensayo vacío
  - b. Adicionar 1.5 ml de muestra con la pipeta
  - c. Agregar 5 ml del segundo reactivo, ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )
  - d. Tapar los tubos y homogenizar manualmente durante 10 minutos; transcurrido este tiempo, se destapan las muestras y se leen en la cubeta de 50 mm ubicada en el equipo.

## 3. Nitritos.

- Materiales: Tubos de ensayo con sus tapas y pipetas plásticas.
- Equipo: Fotómetro SQ 118 de Merck (Método 62, cubeta de 50 mm).
- Procedimiento:
  - a. Adicionar 10 ml de muestra en cada tubo de ensayo
  - b. Adicionar 10 gotas de solución de Nitritos (preparada en el laboratorio por el personal de la Cervecería, basada en el Estandar Methods)
  - c. Tapar los tubos y homogenizar manualmente durante 10 minutos; transcurrido este tiempo, se destapan las muestras y se leen en la cubeta de 50 mm ubicada en el equipo.

## 4. Amonio.

- Materiales: Tubos de ensayo con sus tapas y pipetas plásticas.
- Equipo: Fotómetro SQ 118 de Merck (Método 6, cubeta de 10 mm).
- Procedimiento: para este ensayo, se utilizó el kit para la determinación de Amonio de Merck.
  - a. Medir 10 ml de muestra y adicionar a los tubos de ensayo
  - b. Adicionar 0.65 ml del reactivo  $\text{NH}_4-1\text{B}$
  - c. Adicionar una micro cucharada (la cual ya viene incluida en el frasco) del reactivo  $\text{NH}_4-2\text{B}$

- d. Tapar los tubos y homogenizar manualmente durante 5 minutos; transcurrido este tiempo, se destapan las muestras y se adicionan 4 gotas del reactivo  $\text{NH}_4\text{-3B}$ , se agitan nuevamente durante 5 minutos más y por último se leen en la cubeta de 10 mm ubicada en el equipo.

## 5. Aluminio.

- Materiales: Tubos de ensayo con sus tapas.
- Equipo: Fotómetro SQ 118 de Merck (Método 1, cubeta de 50 mm).
- Procedimiento: para este ensayo, se utilizó el kit para la determinación de Aluminio de Merck.

Medir 5 ml de muestra y adicionar a los tubos de ensayo

Adicionar una micro cucharada del reactivo Al-1A

Adicionar 1.2 ml del reactivo Al-2<sup>a</sup>

Agregar 6 gotas del reactivo Al-4A

Tapar los tubos y homogenizar manualmente durante 4 minutos; transcurrido este tiempo, se destapan las muestras y se leen en la cubeta de 50 mm ubicada en el equipo.

5.1.1.3.2 Respirometría. El único ensayo realizado por este método fue el de la  $\text{DBO}_5$ , cuyo procedimiento se describe a continuación.

**$\text{DBO}_5$ .** Este ensayo se divide en dos partes: una primera parte, que consiste en el ajuste del pH (el cuál debe estar entre 6.8 – 7.2), y una segunda que consiste en la aplicación del método.

1. Para el ajuste del pH se tuvo en cuenta lo siguiente:

- Materiales: Probeta de 400 ml, balón o beacker
- Equipo: PH-meter CG-840 B
- Procedimiento: Medir 432 ml de cada muestra en la probeta; medir el pH: si está por debajo de 6.8, se le adiciona soda ( $\text{NaOH}$  0.1 N) hasta ajustar pH. Si es el caso contrario, es decir que el pH esté por encima de 7.2, se le adiciona  $\text{HCl}$  0.1 N hasta ajustarlo.

2. Aplicación del método:

- Materiales: Botellas de vidrio para  $\text{DBO}_5$ , sensores Oxitop para  $\text{DBO}_5$ , agitadores magnéticos, pipetas plásticas.
- Equipo: Oxitop Box de Merck.

- Procedimiento:

1. Se adicionan las muestras a las botellas de vidrio en cuyo interior se le ha ubicado un agitador magnético para favorecer la agitación durante los 5 días que dura el ensayo.
2. En algunos casos es necesario agregar a algunas de las muestras un medio de cultivo (en este caso se agregaba lodo de recirculación de fase 2 de la Planta de Tratamiento de Aguas residuales), con el fin de favorecer un medio para la degradación de la  $DBO_5$ . Este es el caso para las muestras de agua cruda de río y agua filtrada, en las que se espera que el contenido de  $DBO_5$  sea bajo y nulo, respectivamente.
3. En la boca de la botella de vidrio se ubica un tubo de caucho en cuyo interior se agregan dos lentejas de hidróxido de sodio, con precaución de que la muestra no valla a tener ningún contacto con este último, para evitar interferencias en la lectura.
4. tapar las botellas con los sensores Oxitop, prenderlos y por último llevar las botellas al equipo Oxitop Box. Este último se cierra y allí mismo comienza la reacción; al final de cinco días se sacan las muestras y se lee directamente el resultado en los sensores automáticos.

**Gravimetría.** Los ensayos realizados por este método fueron los de sólidos (totales y suspendidos).

**Absorción Atómica.** Los ensayos realizados por este método fueron los siguientes: Magnesio, Potasio, Calcio, Hierro, Sodio, Zinc, Plomo, Cobalto, Cromo, Cadmio y Mercurio. A continuación se describe el procedimiento de cada uno de ellos.

La técnica de Absorción Atómica presenta tres variantes, que se utilizaron de acuerdo con el tipo de elemento a analizar. Las tres formas de análisis que se presentan en el equipo de absorción atómica son las siguientes:

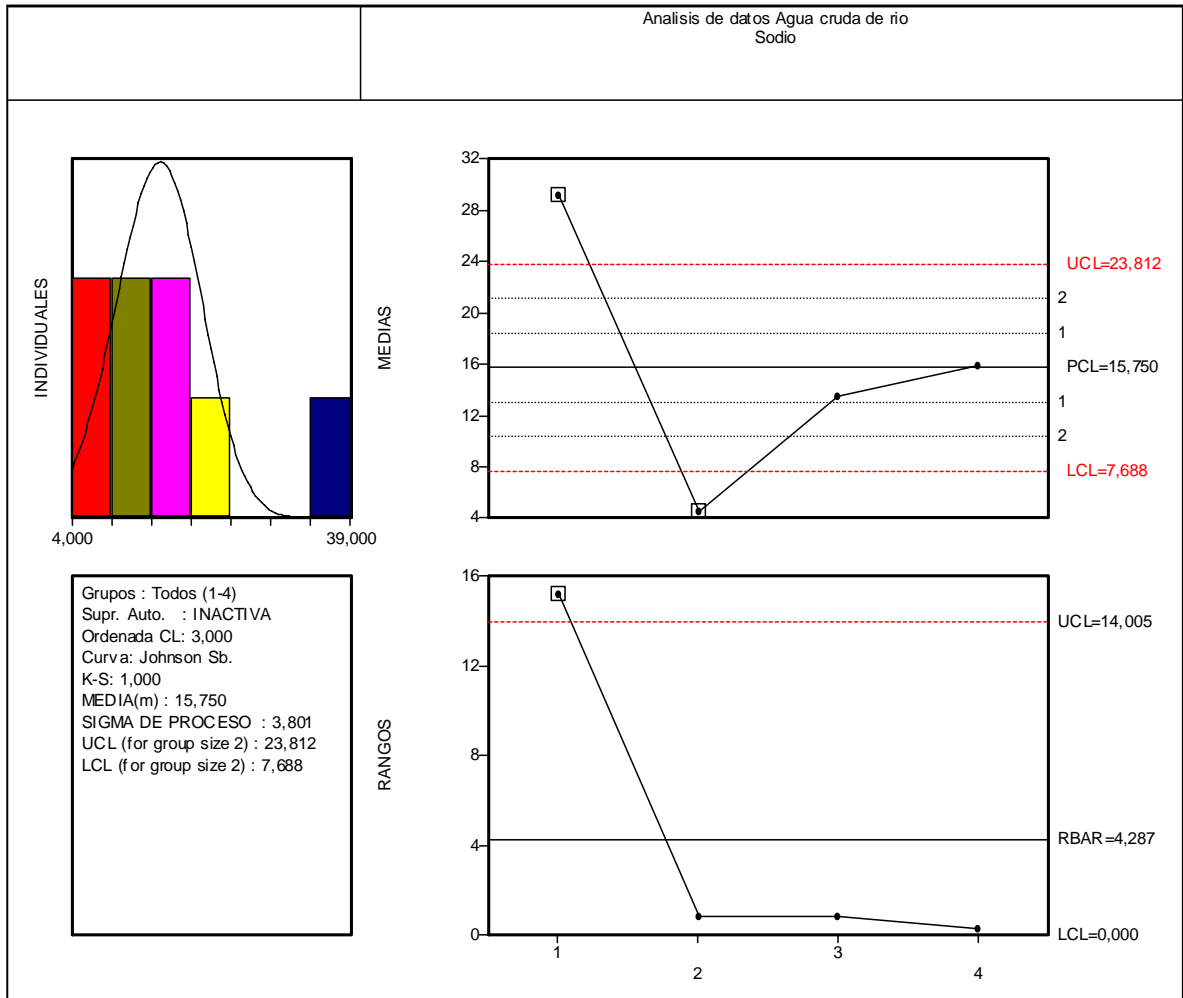
- Horno de Grafito: para la determinación de Plomo, Cobalto, Cromo, Cadmio.
- Generador de Hidruros: para determinación de mercurio.
- Absorción por flama: Magnesio, Potasio, Calcio, Hierro, Sodio y Zinc.

## Anexo C. Descripción de Equipos

- Equipo de Absorción Atómica Perkin Elmer modelo 3110: para determinación de magnesio, potasio, calcio, hierro, sodio, zinc, plomo, cobalto, cromo, cadmio y mercurio.
- Fotómetro SQ 118 de Merck (Foto 8): determinación de aluminio, nitratos, nitritos, amonio y DQO (para rango alto: de 150 – 3000 ppm).
- Espectrofotómetro DR/2010 de Nalco (Foto 8): determinación fosfatos, sulfatos, DQO (rango bajo: de 0 – 150 ppm)
- Thermoreactor TR 300 de Nalco (Foto 9): Brinda la temperatura necesaria para llevar a cabo la reacción (durante 2 horas) de las muestras para determinación de la DQO
- Mufla (Foto 10): Para determinación de sólidos y porcentaje de humedad en el lodo.
- Balanza Analítica METTLER AE 200.: para determinación del peso de los materiales utilizados en los ensayos de sólidos, entre otros
- 
- PH-meter CG-840 B: medida del pH (para la determinación de la DBO<sub>5</sub>)
- Oxitop Box MTW de Merck: para determinación de la DBO<sub>5</sub>.
- Incubadora WTB BLINDER: Para determinación de características microbiológicas.

## Anexo D. Soporte estadístico de datos fisicoquímicos

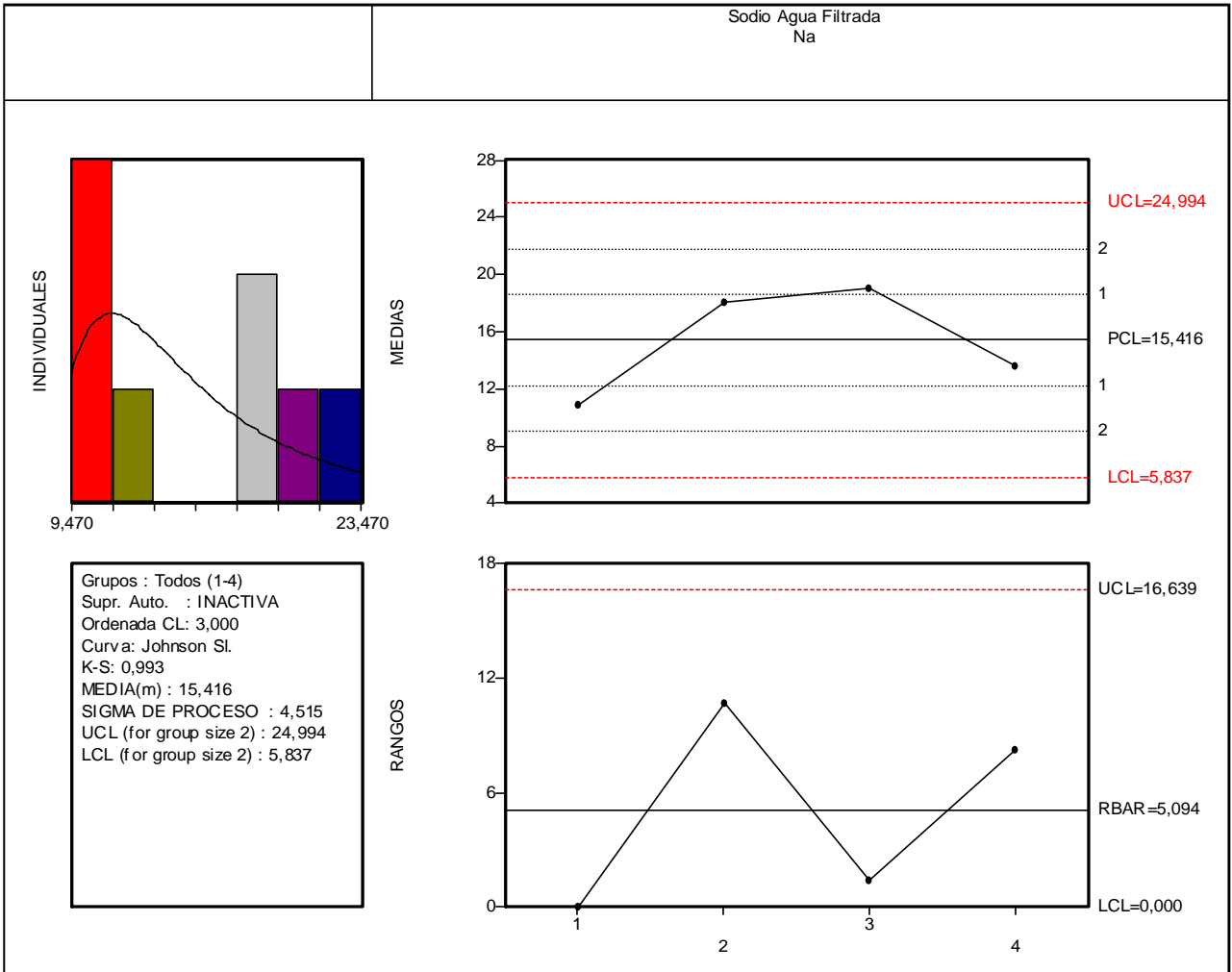
Ejemplo 1: soporte estadístico de datos para el Sodio en agua cruda.



Fuente: Cervecería Leona S.A. Modelo SAP

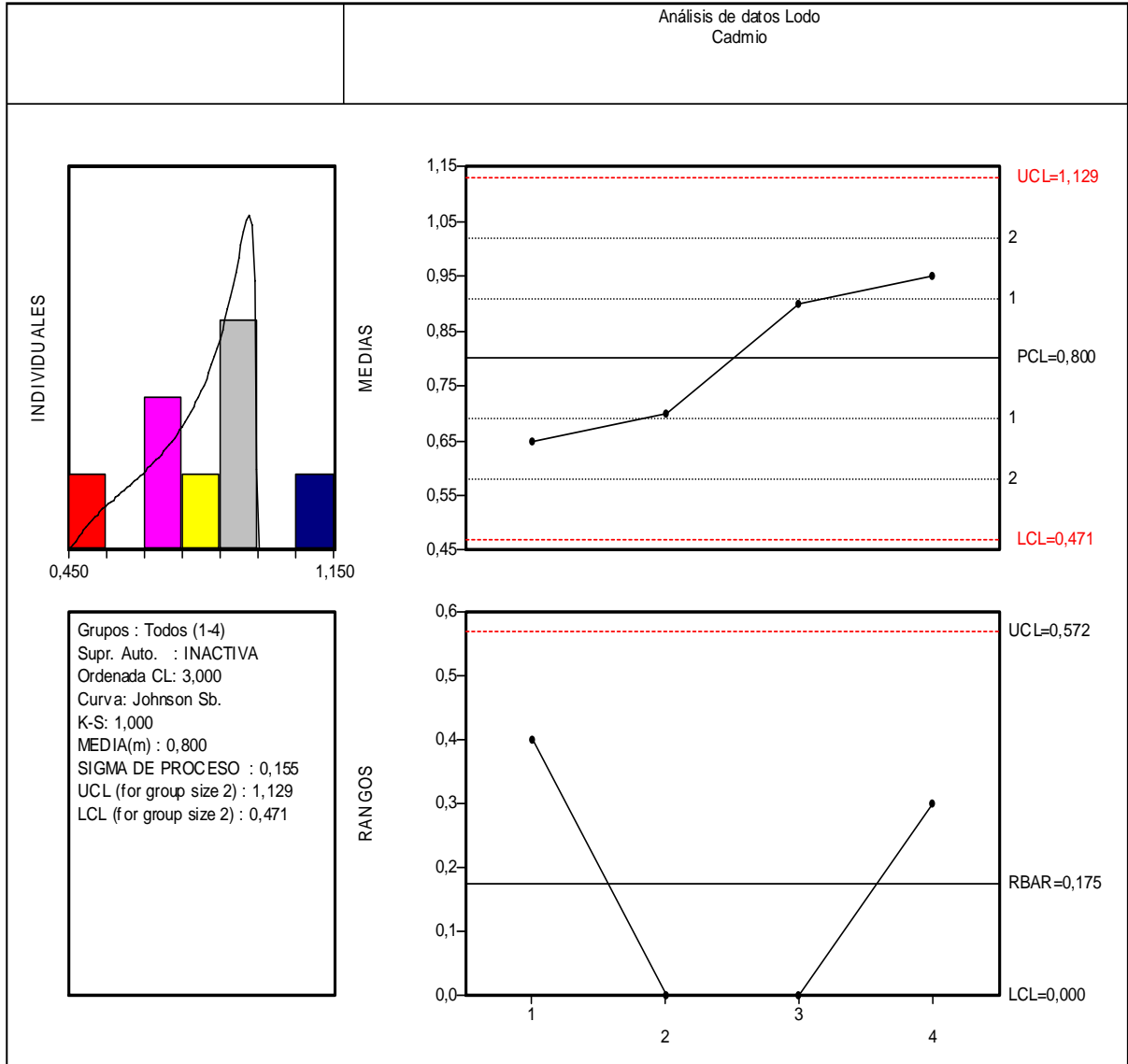


## Ejemplo 2: soporte estadístico de datos para el Sodio en agua filtrada



Fuente: Cervecería Leona S.A. Modelo SAP

### Ejemplo 3: soporte estadístico de datos para el Cadmio en Lodo de la PTAP



Fuente: Cervecería Leona S.A. Modelo SAP

### Anexo E. Soporte Resultados Análisis microbiológicos

Los datos que se exponen a continuación provienen de la caracterización microbiológica realizada a los tres puntos de recolección establecidos en este proyecto y son: agua filtrada, agua cruda y lodo, respectivamente.

Rto.Coliformes Totales UFC/ml		Rto.Coliformes fecales UFC/ml		Micoorganismos mesófilos aerobios					Micoorganismos mesófilos anaerobios		Hongo y Levaduras	
DIRECTO		DIRECTO		DIRECTO	10 <sup>1</sup>	10 <sup>2</sup>				DIRECTO	DIRECTO	
0		1		77	5	0				1		
0		0		60	3	0				7	0	
0		2		10	0	0				14	1	
0		0		2	0	0				0	0	
0		0		3	0	0				0	0	
0		0		3	0	0				0	0	
0		0		0	0	0				0	0	
0		0		0	0	0				0	0	
0		0		3	0	0				0	0	
0		0		5	0	0				0	0	
0		0		5	0	0				0	0	
0		0		6	0	0				0	1	
0		0		6	0	0				0	0	
0		0		3	0	0				0	0	
0		0		2	0	0				0	0	
0		0		4	0	0				0	0	
DIRECTO	10 <sup>1</sup>	10 <sup>2</sup>	DIRECTO	10 <sup>1</sup>	DIRECTO	10 <sup>1</sup>	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>	DIRECTO	10 <sup>1</sup>	DIRECTO
50	2		7	0	INC	23	0	0	0	INC	10	8
INC	5		INC	63	INC	83	4	0	0	INC	54	9
84	20		23	4	INC	38	2	0	0	40	7	7
78	17		39	10	INC	69	1	0	0	72	14	6

INC	34		30	10	INC	25	2	0	0	INC	35	6
90	22		32	12	INC	48	3	0	0	70	10	5
INC	10		24	1	INC	30	1	0	0	INC	12	6
40	1		3	0	INC	20	0	0	0	52	10	5
32	4		6	0	INC	30	2	0	0	32	12	4
50	12		12	2	INC	20	2	0	0	15	0	5
40	12		15	4	INC	30	2	0	0	18	0	6
38	11		18	5	INC	35	3	0	0	22	3	5
26	16		16	3	INC	29	2	0	0	26	5	5
30	20		25	4	INC	22	3	0	0	23	7	4
19	14		21	4	INC	29	3	0	0	29	2	4
23	21		19	6	INC	19	2	0	0	27	6	4
<b>DIRECTO</b>												
<b>O</b>	<b>10<sup>1</sup></b>	<b>DIRECTO</b>	<b>10<sup>1</sup></b>	<b>DIRECTO</b>		<b>10<sup>1</sup></b>				<b>DIRECTO</b>		<b>DIRECTO</b>
85	0	48	4	68		7				78		2
INC	8	67	3	38		10				52		6
82	10	33	0	70		16				43		7
28	3	18	2	62		10				14		4
72	4	12	2	84		12				42		1
43	7	18	4	72		22				10		3
38	2	22	1	INC		12				42		4
30	0	15	1	68		4				4		3
24	2	20	1	70		3				6		3
25	3	6	0	50		5				10		4
19	0	4	0	48		10				10		2
29	2	7	0	46		6				18		3
24	3	6	1	54		8				12		3
23	5	6	0	32		6				21		3
22	2	7	2	56		5				19		3
28	21	5	1	45		3				18		3

Fuente: Laboratorio de Microbiología – Cervecería Leona S.A.

## Anexo F. Ficha técnica polímero 9901 (NALCO)

# NALCO" 9901 PUL.

### Floculante Aniónico Polvo

### BENEFICIOS DEL PRODUCTO

NALCO 9901-PULV es un floculante en polvo de alto peso molecular y carga moderadamente aniónica, diseñado para mejorar la remoción de sólidos suspendidos en procesos de clarificación y deshidratación. Con su uso se obtienen los siguientes beneficios:

- Rápida separación líquido / sólido.
- Mejora la deshidratación del lodo.
- Mejora la eficiencia de clarificadores y espesadores de lodos.
- Aprobación NSF

### USOS PRINCIPALES

**NALCO 9901-PULV** es particularmente efectivo en clarificación primaria en donde promueve la formación de flocs grandes, fuertes, de rápida sedimentación. Puede también ser usado como acondicionador de lodos en aplicaciones de deshidratación en los que se usen filtros de vacío, filtros de correa, centrifugas o lechos de secado.

**NALCO 9901-PULV** puede ser usado en aplicaciones potables hasta 5.0 ppm

### DOSIS

Clarificación----- 0.05 - 1.00 ppm  
Sedimentadores----- 0.05 - 3.00 ppm  
primarios  
Espesadores de lodo----- 0.5 - 2.0 lb /ton  
Deshidratación de lodo ----- 0.1 – 3.0  
lb/ton (base seca)

La dosis es altamente dependiente de la aplicación y del sistema. Su representante de Ondeo Nalco puede determinar la dosis y método de aplicación óptimos para su sistema.

### DESCRIPCION GENERAL

**NALCO 9901-PULV**, floculante de alto peso molecular, aniónico, es un producto en polvo, de olor insignificante. Para las propiedades típicas

físicas y químicas, refiérase a la Hoja de Datos de Seguridad.

### PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN

Se recomienda una concentración máxima de 0.5% para soluciones de **NALCO 9901-PULV**, preparadas como se describe a continuación:

- Adicione al tanque de preparación agua limpia hasta que el nivel de agua cubra la propela del agitador. Empiece la agitación y continúe agregando agua, la cual debe estar entre 50 y 120 °F (10 - 50 °C).
- Abra completamente la válvula de agua de suministro del dispersor de polímero y alimente la cantidad requerida (previamente pesada) a través del embudo dispersor.
- Continúe llenando el tanque con agua hasta el nivel deseado y cierre las líneas de llenado de agua y dispersor de polímero.
- Continúe la agitación por 30 - 40 minutos más. Luego apague el mezclador.



**Anexo G. Datos de Producción de Agua Potable (Enero – junio de 2004)**

DESCRIPCIÓN	SALIDA DE PURGAS DE CLARIFICACIÓN AGUA POTABLE					
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO
	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
<b>CLARIFICADOR POZO</b>	4303	981	3607	5525	6141	7615
<b>CLARIFICADOR RÍO</b>	3296	2775	4460	4516	6482	7510
<b>TOTAL</b>	<b>7599</b>	<b>3756</b>	<b>8067</b>	<b>10041</b>	<b>12623</b>	<b>15125</b>

*Fuente: fichas de manejo PTAP Cervecería Leona S.A.*

**BALANCE DE LODOS DE PURGAS**

- Caudal de Lodos (Máximo de purgas mensual): se toma un caudal de 15000 m<sup>3</sup>/mes = 500 m<sup>3</sup>/ día
- Q (Agua Cruda) = 150 L/s \* 86.4 = 12960 m<sup>3</sup>/ día

**Agua de Entrada**

**Carga de sólidos = Q (agua cruda) \* Concentración de sólidos**

Carga de sólidos = (12960 \* 200) / 1000

Carga de sólidos = 2592 Kg. Sólidos secos por día.

**Agua de Salida**

Carga de sólidos = (12960 \* 40) / 1000

Carga de sólidos = 518 Kg. Sólidos secos por día.

**Carga de sólidos removida**

- **C. S. R** = 2592 – 518 = 2073.6 Kg/día (base seca)

-Concentración de sólidos en el lodo = 4000 mg/L (0.4 g/100 ml)

Caudal de purgas

- - **Q (purgas de lodo) = 518 m<sup>3</sup>/ día** (Valor aproximado a los 500 m<sup>3</sup>/ día)

De este modo se pudo comprobar que el balance de lodos concuerda con el dato de caudal obtenido a través de las fichas de manejo de los clarificadores.

## Anexo H. Cálculo de la bomba para transportar el lodo desde el tanque de homogenización hasta el tanque espesador

Cálculo de la Bomba:

Potencia de la Bomba:  $P = \frac{Q \times \gamma \times H_T}{76\eta}$ , donde:

$$\eta = 60 \%$$

Q (Caudal de purgas de lodos) = 0.35 m<sup>3</sup>/min.

$H_T = H_E + H_F$ , donde:  $H_E = 6$  m

$$H_F = \frac{fL}{D} \times \frac{V^2}{2g}, \quad H_F = \frac{0.05 \times 43}{0.10} \times \frac{1}{19.6} \cong 1m$$

$H_T = 7$  m + 1.3 (30% Factor de seguridad) = 9 m

$$P = \frac{(0.35/60) \times 9800 \times 9}{76(0.6)} = 11.28HP$$



## Anexo I. Criterios de diseño del cono espesador

Caudal de lodos (caudal máximo de purgas mensual\*) = 15000 m<sup>3</sup>/mes

Caudal diario = 500 m<sup>3</sup>/d

Frecuencia de purgas: Cada 10 minutos \* 1 minuto

Caudal de lodos crudos: 0.35 m<sup>3</sup>/min.

1. Carga de Sólidos de Diseño: 60 - 80 Kg/m<sup>2</sup>-d

2. Concentración de sólidos: 0.4% (4000 mg/L)

3. Concentración de sólidos esperada: 6.5% (65000 mg/L) máximo en el lodo espesado

### CÁLCULOS:

$$\text{ÁREA DE ESPESAMIENTO}^{61}: A = \frac{\text{Carga de Sólidos Aplicada}}{\text{Carga de Sólidos de Diseño}}$$

Carga de Sólidos Aplicada = Caudal de lodos x Concentración de Sólidos

Carga de Sólidos Aplicada (Kg/d) = 0.35 m<sup>3</sup>/min. \* 4000 mg/L \* (60 \* 24) / 1000

Carga de Sólidos Aplicada = 2000 Kg/d

$$\text{Área de espesamiento} = 2000 / 70 = 29 \text{ m}^2$$

Los tanques de espesamiento generalmente se diseñan con geometría rectangular o circular; la selección de una u otra dependen más del criterio del proyectista. Para este caso en particular se selecciona una geometría de tanque circular, por criterio operacional y de diseño, en el que la forma circular del tanque facilita su limpieza y se evita la formación de depósitos de lodos en las esquinas como ocurriría en un tanque rectangular.

$$\text{Diámetro del tanque} = \left[ 4 \times \frac{29}{\pi} \right]^{\frac{1}{2}} = 6 \text{ m}$$

---

\* Se trabaja con el máximo caudal para prever la máxima capacidad del tanque y evitar realizar un dimensionamiento que no supla las necesidades de caudal.

<sup>61</sup> ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Tratamiento de Aguas Residuales. Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá. 1999.

Recalculando el Área = 28 m<sup>2</sup>

De acuerdo con criterios de diseño de tanques espesadores por gravedad se selecciona una profundidad de tanque entre 2 y 5 m. Se adopta una profundidad de 2 m, para efectos constructivos.

H = 2 m

**VOLUMEN DE LA ZONA DE CLARIFICACIÓN DEL TANQUE:**

V = ÁREA DE ESPESAMIENTO \* H

V = 28 \* 2 = 56 m<sup>3</sup>

**TIEMPO DE RETENCION HIDRÁULICO:**

T = V / Q LODOS

T = 56 / 0.35 m<sup>3</sup>/min. = 160 min. (2.6 horas)

**ZONA DE LODOS:**

Profundidad zona de lodos = 0.5 m (por criterios operacionales)

Pendiente = Profundidad zona de lodos / Diámetro

Pendiente = 0.5 m / 6 m = 1 : 12

**Este valor permite determinar que se contaría con un tanque de pendiente 1:12, para lo cual se haría necesario la instalación de un sistema de puente barredor de lodos para evitar que el lodo se pegue a las paredes y para facilitar la remoción del mismo hacia el fondo del tanque.**

**CARGA HIDRÁULICA SUPERFICIAL:**

**C.H.S. = CAUDAL DE LODOS / ÁREA DE ESPESAMIENTO**

C.H.S. = 0.35 m<sup>3</sup>/min. \* (60 \* 24) / 28 m<sup>2</sup> = 18 m/d

Valores recomendados para floc de Aluminio (10 - 24 m/d)

**CARGA HIDRÁULICA SOBRE EL VERTEDERO**

CRITERIO: 1.7 - 2.1 L/s-m (Floc de alumbre)

Longitud mínima del vertedero = Caudal de lodos / Carga hidráulica vertedero

Longitud mínima del vertedero = 0.35 m<sup>3</sup>/min. \* (1/60) \* 1000 / 2.0 L/s-m

Longitud mínima del vertedero = 2.9 m

Seleccionando un vertedero perimetral, se tiene:

Longitud de vertedero = Pi \* Diámetro = 3.1416 \* 6 = 18.8 m

## TUBERIA DE ENTRADA AL ESPESADOR (PROVENIENTE DEL TANQUE DE RECEPCIÓN DE PURGAS DE LODOS)

CRITERIO: Velocidad de flujo

Velocidad = 1 m/s

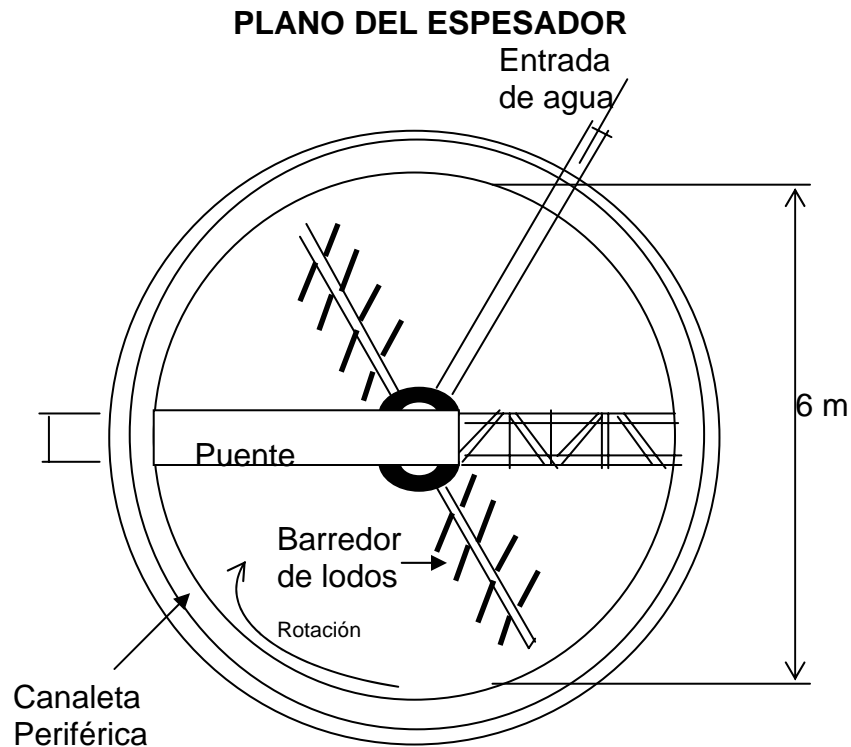
Área de flujo de la tubería: caudal de lodos / Velocidad

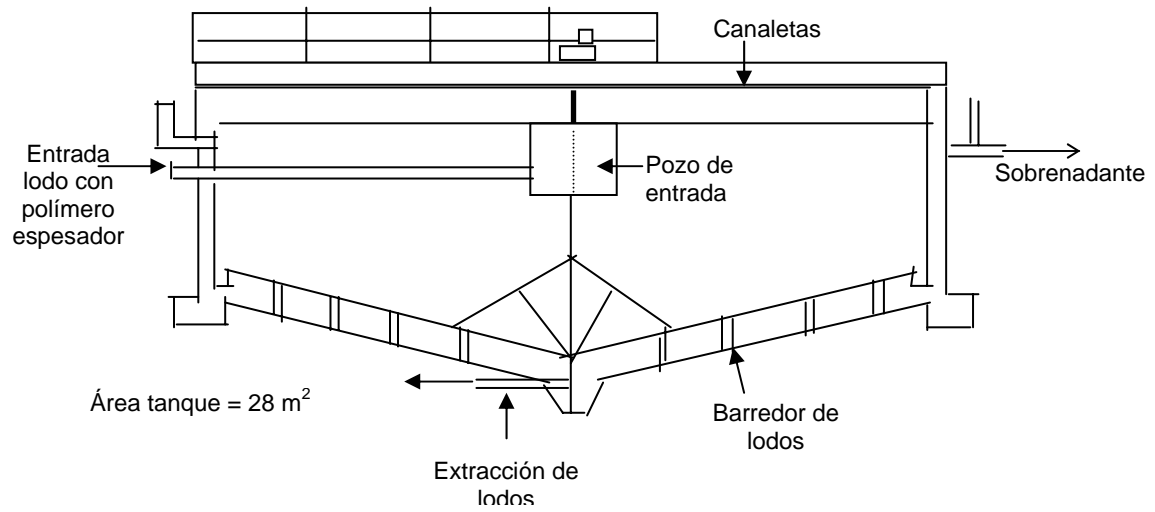
Área de flujo =  $0.35 \text{ m}^3/\text{min} * (1/60) \text{ s} / 1 \text{ m/s} = 0.006 \text{ m}^2$

Diámetro de la tubería =  $[0.006 * 4 / \pi]^{1/2} = 0.087 \text{ m} (3.3")$

Se adopta el diámetro comercial mayor al valor obtenido. Se adopta Diámetro = 4".  
CS.

Nota: El cálculo de la bomba para el transporte de estos lodos desde el tanque de recepción de purgas hasta el cono espesador, se encuentra consignado en el anexo I de esta misma sección.





## ANEXO J. Metodología EVA (Valor Económico Agregado)

El EVA es una medida de desempeño basada en valor, que surge al comparar la rentabilidad obtenida por una compañía con el costo de los recursos gestionados para conseguirla. Si el EVA es positivo, la compañía crea valor (ha generado una rentabilidad mayor al costo de los recursos empleados) para los accionistas. Si el EVA es negativo (la rentabilidad de la empresa no alcanza para cubrir el costo de capital), la riqueza de los accionistas sufre un decremento, destruye valor. (Tully, p. 45)

Según Stewart “el Valor Económico Agregado (EVA) es la única medida que da cuenta de todas las complejas interacciones envueltas en la creación de valor”.

El EVA es calculado mediante la diferencia entre la tasa de retorno del capital  $r$  y el costo del capital  $c^*$ , multiplicada por el valor económico en libros del capital envuelto en el negocio:

$$EVA = (r - c^*) \times capital$$

Pero,  $r$  es igual a:

$$r = UODI / capital$$

Donde UODI es la utilidad operacional neta antes de gastos financieros y después de impuestos.  $UODI = UON \times (1 - t)$

Para Stewart (p. 70) el Capital es una medida de todo el efectivo que ha sido depositado en una empresa, sin importar la fuente de financiación, el nombre contable o propósito del negocio, es como si la compañía fuera simplemente una cuenta de ahorros. No interesa si la inversión es financiada con capitalización o deuda, no interesa si el efectivo es empleado en capital de trabajo o activos fijos. Efectivo es efectivo y lo importante es qué tan bien lo manejan las directivas.

El capital empleado puede ser estimado sumando todas las deudas (de largo y corto plazo) al patrimonio líquido de los propietarios. Una forma alternativa es sustrayendo, del activo total, todos los pasivos corrientes en los que no se paguen intereses. (Roztocky & Needy, p. 4) Para la estimación del capital algunos autores recomiendan usar el capital final del período inmediatamente anterior, como capital inicial o simplemente equiparar el patrimonio contable al capital empresarial<sup>62</sup>.

---

<sup>62</sup> Archivos División Financiera Cervecería Leona S.A

## Anexo K. Soporte cálculos EVA

A continuación se presentan los soportes para los cálculos de la valoración económica del proyecto a través de la metodología EVA (Valor Económico Agregado)\* para el primer escenario evaluado, con el cual se obtuvo un índice de rentabilidad positivo (> 0) lo que quiere decir que en este caso el proyecto sería atractivo económicamente para la empresa.

### EVA OPTIMISTA

1. Se cuenta con unas variables como son lo ahorros proyectados, las inversiones requeridas y los gastos (polímero espesador, personal, mantenimiento y servicios de energía).

Inversiones Requeridas	
Tuberías	\$ 25.475.177
Accesorios	\$ 12.008.770
Bombas	\$ 26.200.000
Tanque Espesador	\$ 62.225.000
Sistema Barredor de Lodos	\$ 26.200.000
Sistema Dosificador	\$ 7.316.350
<b>Total</b>	<b>\$ 159.425.297</b>

Flujo de Caja	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5**
<b>Ahorros Proyectados</b>	<b>11.895.000</b>	<b>11.895.000</b>	<b>11.895.000</b>	<b>11.895.000</b>	<b>11.895.000</b>
<b>Inversiones</b>	\$ 37.483.947	\$ 88.425.000	\$ 7.316.350	\$ 26.200.000	\$ 0
<b>Gasto Polímero Espesador</b>	\$ 960.000	\$ 960.000	\$ 960.000	\$ 960.000	\$ 960.000
<b>Personal</b>	\$ 88.335	\$ 88.335	\$ 88.335	\$ 88.335	\$ 88.335
<b>Servicios (energía)</b>	\$ 3.249.979	\$ 3.249.979	\$ 3.249.979	\$ 3.249.979	\$ 3.249.979
<b>Mantenimiento</b>					
<b>Total</b>	<b>-\$ 29.887.261</b>	<b>-\$ 80.828.314</b>	<b>\$ 280.336</b>	<b>-\$ 18.603.314</b>	<b>\$ 7.596.686</b>

2. En el flujo de caja se hizo una proyección mes a mes de las variables ya mencionadas durante un periodo de cinco años, teniendo en cuenta que las inversiones y los gastos están en pesos corrientes con la inflación promedio del 6% anual. Cada una de las variables se analizaron de la siguiente forma:

\* Por sus siglas en inglés.

\*\* por motivos de espacio fue necesario recortar el cuadro del flujo de caja hasta el quinto mes; sin embargo es importante aclarar que se tuvieron en cuenta los 60 meses de los 5 años (tiempo estimado para la proyección).

- Los ahorros proyectados hacen referencia a los ahorros por cantidad de agua residual tratada al mes.
- Las inversiones se difieren a los 4 primeros meses: en el primer mes se comprarían las tuberías y los accesorios; en el segundo mes se comprarían las bombas y el tanque espesador; en el tercer mes se compraría el sistema dosificador y en el cuarto mes se compraría el sistema barredor de lodos.
- Los datos del cálculo del personal hace referencia a lo que se le pagaría a un empleado por 15 horas hombre mes a \$ 5.889 la hora<sup>63</sup>.
- Los datos de mantenimiento se determinaron basándose en la teoría que por ser equipos nuevos, en el primer año no se requeriría mantenimiento y éste se realizaría cada 6 meses después del primer año.
- En el total se observa que los resultados dan valores negativos en los primeros meses, debido a las inversiones realizadas, pero a partir del quinto mes los valores son positivos porque los ahorros proyectados son mayores que los gastos.

3. Para el cálculo de la depreciación se utilizó el método de la línea recta con inflación presentado a continuación:

***LINEA RECTA CON INFLACION***

Años	10
------	----

PER.	PAAG	Ajuste costo	Costo ajustado	Gasto Año	Ajuste depr.	Depre. Acumulada	Vr. Neto Libros
0		\$ -	\$ 159.425.297	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 159.425.297
1		\$ -	\$ 159.425.297	\$ 15.942.530	\$ -	\$ 15.942.530	\$ 143.482.767
2	7,0%	\$ 11.159.771	\$ 170.585.068	\$ 17.058.507	\$ 1.115.977	\$ 34.117.014	\$ 136.468.054
3	7,0%	\$ 11.940.955	\$ 182.526.023	\$ 18.252.602	\$ 2.388.191	\$ 54.757.807	\$ 127.768.216
4	7,0%	\$ 12.776.822	\$ 195.302.844	\$ 19.530.284	\$ 3.833.046	\$ 78.121.138	\$ 117.181.706
5	7,0%	\$ 13.671.199	\$ 208.974.043	\$ 20.897.404	\$ 5.468.480	\$ 104.487.022	\$ 104.487.022
6	7,0%	\$ 14.628.183	\$ 223.602.226	\$ 22.360.223	\$ 7.314.092	\$ 134.161.336	\$ 89.440.890
7	7,0%	\$ 15.652.156	\$ 239.254.382	\$ 23.925.438	\$ 9.391.294	\$ 167.478.067	\$ 71.776.315
8	7,0%	\$ 16.747.807	\$ 256.002.189	\$ 25.600.219	\$ 11.723.465	\$ 204.801.751	\$ 51.200.438
9	7,0%	\$ 17.920.153	\$ 273.922.342	\$ 27.392.234	\$ 14.336.123	\$ 246.530.108	\$ 27.392.234
10	7,0%	\$ 19.174.564	\$ 293.096.906	\$ 29.309.691	\$ 17.257.108	\$ 293.096.906	\$ -

La depreciación se considera como un costo con el que se disminuyen las utilidades y por ende los impuestos.

4. Por último se realizó una estimación del tiempo en el que se esperaría se recuperara la inversión, teniendo en cuenta la tasa de oportunidad de la empresa (que es de 19.80%) y una tasa periódica mensual del 1.517%.

<sup>63</sup> Fuente: División financiera – Cervecería Leona S.A.

## Recuperación de la Inversión

Ahorro Mes	\$ 21.680.772
<b>Total Inversión:</b>	<b>-159.425.297</b>

<b>ahorros/Costo</b>		<b>VPN</b>
Mes 1	\$ 21.680.772	\$ -136.005.494
Mes 2	\$ 21.680.772	\$ -115.282.117
Mes 3	\$ 21.680.772	\$ -94.868.382
Mes 4	\$ 21.680.772	\$ -74.759.663
Mes 5	\$ 21.680.772	\$ -54.951.403
Mes 6	\$ 21.680.772	\$ -35.439.112
Mes 7	\$ 21.680.772	\$ -16.218.368
Mes 8	\$ 21.680.772	\$ 2.715.186
Mes 9	\$ 21.680.772	\$ 21.365.840
Mes 10	\$ 21.680.772	\$ 39.737.821
Mes 11	\$ 21.680.772	\$ 57.835.293
Mes 12	\$ 21.680.772	\$ 75.662.359
	<b>260.169.264</b>	

En la segunda columna de esta gráfica se ubicaron los ahorros mes a mes y todo se trajo a valor presente comparado con la inversión. Cuando los valores se hacen positivos, es cuando se empezaría a recuperar la inversión, que en este caso sería a partir del octavo mes.



**Anexo L. Metodología para Digestión del Lodo Basada en el Numeral 3030 F del ESTÁNDAR METHODS. For the Examination of Water and Wastewater, 17<sup>th</sup> Edition, 1989.**

Procedimiento para la digestión de la muestra de lodo

1. Se cuenta con una muestra de lodo al cual se le ha retirado la mayor cantidad de agua posible a través de un embudo de decantación de 100 ml.
2. Este lodo se lleva a un volumen de 250 ml (con agua destilada) en un beacker.
3. A esta muestra se le adicionan 3 ml de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) concentrado y se somete a un calentamiento suave.
4. Cuando la muestra llegue a un volumen de aproximadamente 5 ml, se adicionan 5 ml más de  $\text{HNO}_3$  concentrado, se tapa el beacker con un vidrio de reloj y se continúa el calentamiento un poco más fuerte, hasta que el volumen queda aproximadamente en 5 ml. Se deja enfriar de un día para otro.
5. Se le adicionan 10 ml de ácido clorhídrico 1:1 y 15 ml de agua destilada por cada 100 ml de volumen esperado.
6. Se somete a ebullición durante 15 min., se deja enfriar de un día para otro y se pasa al siguiente punto.
7. Se filtra la muestra (en papel filtro) y se completa a volumen con agua destilada.