



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**ESPEZAMIENTO DE SEIS TIPOS DE LODOS GENERADOS
POR COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN DEL AGUA CRUDA DE
UNA PLANTA POTABILIZADORA**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A

XÓCHITL SOTO VILLANUEVA



MÉXICO D.F 2009



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE:	I.Q Rodolfo Torres Barrera
VOCAL:	Dr. Víctor Manuel Luna Pabello
SECRETARIO:	Dra. Rosa María Ramírez Zamora
1^{er} SUPLENTE:	Dr. Alfonso Durán Moreno
2^{do} SUPLENTE:	Dr. José Agustín García Reynoso

LUGAR DONDE SE REALIZÓ LA TESIS:

Coordinación de Ingeniería Ambiental
Instituto de Ingeniería, UNAM
Circuito Escolar S/N, Ciudad Universitaria
Coyoacán, Distrito Federal, 04510
Tel. 5623 3600

ASESOR:

SUSTENTANTE:

Dra. Rosa María Ramírez Zamora

Xóchitl Soto Villanueva

DEDICATORIAS

Antes que nada deseo agradecer y dedicar este trabajo a cada una de las personas valiosas que hicieron posible este éxito, primero que nada a aquellos que sin ser de mi sangre decidieron formar parte de mi corazón y convertirse en parte de mi familia, compartiendo conmigo esos trabajos interminables de toda la noche, esos temibles exámenes, muchas de mis lágrimas y desesperaciones, y de mis más grandes alegrías, mis amigos, mis hermanos Abel, Gerson, Hugo , Ahiram, Rodrigo, Raúl, Berenice, Claudia , Janet , y Fabiola, a mis compañeros de carrera y facultad, que no son menos amigos y con quien tengo sin duda un buen recuerdo y experiencia de cada uno, con quienes compartí no sólo las aulas sino también los cuatro años más enriquecedores de mi vida.

David (Bicho), sé que ya no estás con nosotros, y que te vamos a extrañar toda la vida, sólo quiero que si aun puedes vernos sepas que, entre todos mis conocidos, siempre fuiste el ser al que más admiré, no sólo por tu genio, cultura e inteligencia, sino también por tu sabiduría y trato humano, este año he tenido muchos retos, uno de los más grandes fue aceptar que ya no estás entre nosotros, y aprender a amarte y extrañarte en medio del silencio que dejó tu piano, aun me debes un claro de luna, aunque te hayas ido sin saberlo, aun debo devolverte tu libro en cuanto lo termine, aun eres el niño al que más admiro, voy a tomar tu ejemplo, gracias por haber formado parte de nuestras vidas, también esta dedicatoria es para tus padres Olí y Héctor, muchas gracias por regalarnos a ese ángel hermoso al que Dios decidió recoger antes.

En esta carrera conocí también a personas, que sin conocerme, ni compartir conmigo otra cosa que el mismo cielo que nos cobija se convirtieron en ángeles que cubrieron mi existencia, el Sr. Pedro Lemus y la Sra. Rocío Nieto son sin duda dos de estas grandiosas personas, la Sra. Socorro Enríquez que sin conocerme, me abrió las puertas de su corazón y su vida.

Dedicado a mi mejor amigo, compañero y cómplice, con quien estudié aun cuando él no debía estudiar, quien durmió cansado mientras yo terminaba una práctica en su computadora, quien me ofreció su corazón y sus recursos morales y físicos, quien siempre me ofreció su ayuda incondicional, con quien pude llorar y desahogarme, para después seguir adelante, quien levantó mis ánimos cuando se encontraban más caídos y confió en mí aun cuando yo misma había perdido la confianza, con quien enfrenté mis peores y más grandes retos, y disfruté muchas de las más grandes alegrías a lo largo de estos años, y a quien seguramente dedicaré muchas otras de las grandes metas que alcance en la vida, supongo que a estas alturas ya no es necesario mencionar su nombre, porque todos saben a quién me

refiero, pero lo haré de todos modos, Hugo, Te amo, gracias por atreverte a enamorarte de un ser tan complicado.

Para Paola, mi mejor amiga, mi hermana, "Los amigos son los ángeles que pelean con tus peores demonios y salen victoriosos, son aquellos que te abrazan en tiempos de miedo y flaqueza, te cobijan en tiempos de frío, te sonríen en tiempos de tristeza, te alimentan con la hambruna y te abofetean cuando a tu corazón llega la estupidez"

Dedicado también a la mujer más valiente, trabajadora y fuerte que he conocido en mi vida, quien me ha apoyado moral y económicamente, quien me formó y educó como una gente de bien, quien cuidó de mí y de mi hijo por todo este tiempo, quien a pesar de enfermedad o carestía siempre estuvo para mí, y fue mi apoyo, mi ejemplo, la persona a quien amo y admiro, base y pilar de mi familia, fuente continua de crecimiento, de quien he aprendido muchas de las lecciones más valiosas que la vida me ha dado, mi madre, la Sra. Estela Villanueva Ponce.

Deseo agradecer y dedicar también este trabajo a ese angelito que ilumina mi vida, quien fue sin duda la motivación más grande de mis éxitos, la causa más terrible de mis desvelos, el más fuerte de mis esfuerzos y más grande de mis alegrías y sufrimientos, quien me ha mostrado el valor de la vida y el trabajo, me hizo fuerte, cambió mi vida, me enseñó a tener fe y esperanza, a trabajar sin cansancio, a llorar con el corazón en la mano, a luchar cuando las fuerzas se han ido, a tener coraje para mejorar, a amar a otra persona más de lo que me amo a mí misma, ese ser tan pequeño y tan grande al que le gusta el chocolate y los números se llama Rodrigo.

Finalmente el más grande de mis agradecimientos y dedicatorias, el agradecimiento para mi padre Dios, por regalarme tantas bendiciones, por darme fe aun en momentos desesperados, y enseñarme humildad y perseverancia a través del sufrimiento, a quien debo la vida que hoy me inunda a mí y a mis seres amados, gracias Dios por los ángeles que mandaste para acompañarme en la carrera de la vida, gracias Dios por tu amor, gracias Dios por la vida.

AGRADECIMIENTOS

Primero que nada deseo agradecer al Instituto de Ingeniería, lugar donde se desarrolló esta tesis por haber proporcionado sus instalaciones y recursos económicos para dicho propósito, a la Dra. Rosa María Ramírez Zamora, quien me hizo el enorme honor de asesorar la presente, compartiendo conmigo su experiencia y conocimiento, con quien abrí la puerta de la confianza y el trabajo, y sin duda una de las mujeres más distinguidas de nuestra comunidad Universitaria. Agradecer también a mis colegas y compañeros del Instituto, quienes con su esfuerzo y dedicación hicieron también posible este trabajo, a mis compañeros de cubículo Ivonne, Ana, Ricardo, Daniel, Bertha, Alejandro, y muy especialmente a Ariadna (alias Ari) y a Olguiux.

Sin duda este es el final de una carrera que emprendí no hace cinco años, sino casi desde el principio de mi vida, a lo largo de ésta he conocido a mucha gente valiosa, encontré miles de obstáculos y problemas, pero de cada uno, sin duda siempre encontré una mano amiga, ahora me toca recordar cada una de las instituciones partícipes de mi educación y a las cuales quiero agradecer, desde mis escuelas primarias hasta la casa madre que formó mis estudios Universitarios, La Universidad Nacional Autónoma de México a la que siempre estaré orgullosa de pertenecer, al haberme formado en sus aulas preparatorias, en la Escuela Nacional Preparatoria número 9 "Pedro de Alba" donde adquirí los conocimientos necesarios para poder ingresar a una carrera profesional, además de desarrollarme en otras áreas como el deporte y la cultura, y en la no menos meritoria Facultad de Química, la cual me ofreció no solo las herramientas para una vida profesional exitosa, sino también una de las mejores experiencias de mi vida.

Agradezco a mis profesores, quienes me enseñaron no sólo lo necesario para emprender una profesión exitosa dentro del campo de la Ingeniería sino también valores, y a quienes he tomado como ejemplo a seguir muy especialmente a la profesora. Xóchitl Mondragón Rueda, al Dr. Eduardo Marambio Dennett y al Profesor Alberto Rosas Pérez quienes se convirtieron en mis amigos dentro y fuera del aula.

“No debemos preocuparnos por vivir largos años, sino por vivirlos satisfactoriamente, porque vivir largo tiempo depende del destino, vivir satisfactoriamente, del alma”

“La vida es larga si es plena y se hace plena cuando el alma ha recuperado posesión de su bien propio y ha transferido a sí el dominio de sí misma”

(Séneca, cartas a Lucilio)

CONTENIDO

DEDICATORIAS

AGRADECIMIENTOS

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

SIMBOLOGÍA

RESUMEN

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA

1.2 PLANTA POTABILIZADORA “LOS BERROS”

OBJETIVOS GENERALES

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

2.1 GENERALIDADES DEL PROCESO DE COAGULACIÓN FLOCULACIÓN

2.1.1 DEFINICIÓN Y MECANISMO

2.1.2 REACTIVOS UTILIZADOS EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN

- a) Sales de Aluminio
- b) Sales de Hierro
- c) Coagulantes químicos orgánicos

2.1.3 PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS REMOVIDOS POR EL PROCESO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN

2.2 GENERALIDADES DE LODOS PROVENIENTES DE PLANTAS POTABILIZADORAS

2.2.1 DEFINICIÓN DE LODO

2.2.2 CIFRAS DE GENERACIÓN DE LODOS

2.2.3 LEGISLACIÓN AMBIENTAL PARA LODOS

2.2.3.1 NORMATIVIDAD NACIONAL: NOM -004-SEMARNAT-2002

2.2.3.2 NORMATIVIDAD INTERNACIONAL

NORMATIVA PARA LODOS EN LOS ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA

Parte 257

Parte 258

Parte 503

NORMATIVA PARA LODOS EN LA COMUNIDAD ECONÓMICA EUROPEA
Directiva 86/278/CEE

2.2.4 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS DE LODOS
PROVENIENTES DE PLANTAS POTABILIZADORAS

2.2.4.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Contenido de Sólidos Totales en base Seca (STS)

Contenido de Sólidos Volátiles (*S_v*)

Peso de los Componentes Contenidos (Especialmente en el caso de lodos orgánicos)

Tipos de humedad

La humedad libre

La humedad ligada

Prueba REF

2.2.4.2 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

Elementos y compuestos inorgánicos

Contenido de Nutrientes

Contenido de metales y metales pesados

Características microbiológicas

Microorganismos Indicadores

Microorganismos Patógenos

Bacterias Patógenas

2.2.5 TRATAMIENTO, DISPOSICIÓN Y APROVECHAMIENTO DE LODOS

2.2.5.1 TRENES DE TRATAMIENTO DE LODOS

Mezcla

Reducción de volumen

a) Acondicionamiento químico (Espesamiento)

b) Deshidratación

Estabilización Biológica

2.2.5.2 DISPOSICIÓN Y APROVECHAMIENTO DE LODOS

Disposición

Costos de disposición de lodos

Aprovechamiento de lodos

Tendencias de aprovechamiento en diferentes países

2.3 GENERALIDADES DEL ACONDICIONAMIENTO QUÍMICO-ESPESAMIENTO DE LODOS

2.3.1 TIPOS DE PROCESOS DE ESPESAMIENTO

Espesamiento por gravedad

Espesamiento por flotación

2.3.2 EQUIPOS Y TIEMPOS DE ESPESAMIENTO

2.3.3 VENTAJAS DEL ESPESAMIENTO DE LODOS

2.3.4 REACTIVOS UTILIZADOS PARA EL ESPESAMIENTO DE LODOS

2.3.4.1 AGENTES ORGÁNICOS UTILIZADOS EN EL ACONDICIONAMIENTO QUÍMICO DE LODOS-POLIELECTROLITOS

Tipos de polielectrolitos utilizados como espesantes de lodos

Polielectrolitos catiónicos

Polielectrolitos aniónicos

Polielectrolitos no-iónicos

Preparación y duración de los polielectrolitos

2.3.4.2 AGENTES INORGÁNICOS UTILIZADOS EN EL ACONDICIONAMIENTO QUÍMICO DE LODOS

2.3.5 FACTORES DE INFLUENCIA DEL PROCESO DE ESPESAMIENTO DE LODOS

Densidad de carga del floculante

Efecto de la carga del floculante

Efecto del pH

Efecto del peso molecular del polielectrolito

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1 MATERIALES Y REACTIVOS

3.1.1 AGUA CRUDA

3.1.2 COAGULANTES

3.1.3 FLOCULANTES

3.1.4 DÓISIS A APLICAR DE LAS SEIS COMBINACIONES COAGULANTE-FLOCULANTE SELECCIONADAS PARA GENERAR DIFERENTES LODOS

3.1.5 ESPESANTES

3.1.5.1 SELECCIÓN DE LOS ESPESANTES A SER EMPLEADOS EN LAS PRUEBAS DE ESPESAMIENTO

3.1.5.2 ESPESANTES SELECCIONADOS

3.1.6 LODO

3.2 SISTEMAS Y TÉCNICAS EXPERIMENTALES

3.2.1 GENERACIÓN DE LODOS

3.2.2 PRUEBAS DE ESPESAMIENTO DE LODOS

3.3 TÉCNICAS ANALÍTICAS

3.3.1 DETERMINACIÓN DE HUMEDAD Y SÓLIDOS TOTALES

3.3.2 PRUEBA REF –RESISTENCIA ESPECÍFICA A LA FILTRACIÓN

CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 INFLUENCIA DEL TIPO DE LODO EN EL PROCESO DE ESPESAMIENTO

4.2 INFLUENCIA DE LA DOSIS DE ESPESANTE EN EL PROCESO DE ESPESAMIENTO

4.3 INFLUENCIA DE LA CARGA DEL ESPESANTE SOBRE EL PROCESO DE ESPESAMIENTO DE LODOS

4.4 EVALUACIÓN DE FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA

4.4.1 MATRIZ DE DECISIÓN MULTICRITERIO

4.4.2 PARÁMETROS UTILIZADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA MDM

4.4.3 VIABILIDAD TÉCNICA: PRODUCCIÓN Y CALIDAD DE LODO

4.4.4 VIABILIDAD ECONÓMICA

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

GLOSARIO DE TÉRMINOS

ANEXO A-ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

ANEXO B –TÉCNICA REF – RESISTENCIA ESPECÍFICA A LA FILTRACIÓN

ANEXO C- REGISTRO FOTOGRÁFICO

ANEXO D DATOS EXPERIMENTALES

ANEXO E –MATRIZ DE DECISIÓN MULTICRITERIO

ANEXO F –MÉTODOS DE DESHIDRATACIÓN DE LODOS

**ANEXO G –PRECIOS DE LOS REACTIVOS PROPORCIONADOS POR LOS
PROVEEDORES**

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Tren de Tratamiento de la Planta Potabilizadora “Los Berros” (Cerón, 2006)

Figura 2. 1 Proceso de coagulación y floculación
(<http://archivosiiespanes/Ing%20Ambiental%20IIa%20Primarios.ppt>)

Figura 2. 2 Acción del Coagulante
(<http://archivosiiespanes/Ing%20Ambiental%20IIa%20Primarios.ppt>)

Figura 2. 3 Acción del Floculante
(<http://archivosiiespanes/Ing%20Ambiental%20IIa%20Primarios.ppt>)

Figura 2. 4 Clasificación de la humedad contenida en un lodo (Sandoval *et al.*, 2000).

Figura 2. 5 Curva termogravimétrica mostrando los diferentes tipos de humedad de un lodo (Sánchez *et al.*, 2000)

Figura 2. 6 Resistencia específica a la filtración de lodos residuales municipales (Degrémont, 2009).

Figura 2. 7 Curva típica para evaluar el efecto de la dosificación de coagulante sobre la resistencia específica (Ramalho Sette *et al.*, 1996)

Figura 2. 8 Etapas básicas para el manejo de desechos en las plantas potabilizadoras (Garcés, 2000)

Figura 2. 9 Trenes más comunes de tratamiento de lodos (Degrémont, 2009)

Figura 2. 10 Clasificación de métodos de deshidratación de lodos.

Figura 2. 11 Efecto de la concentración total de sólidos en costos totales de disposición. El espesamiento de lodos está incluido en el costo total unitario (Gaither *et al.*, 1984, actualizada a 2009, Sinnott, *et al.*, 2005; CEPCI obtenidos de <http://www.chcom/pci/>)

Figura 2. 12 Esquema ilustrativo del Espesamiento de lodos por flotación con aire disuelto (http://potablewater.iespanes/tratamiento_de_lodos.htm)

Figura 2. 13 Reducción de Volumen debida al espesamiento de lodos (Jeffrey *et al.*, 1997).

Figura 2. 14 Mecanismos de adsorción de polielectrolitos catiónicos y no-iónicos propuestos por Lee y Liu, (2001).

Figura 2. 15 Densidades de carga utilizadas de diferentes tipos de Polielectrolitos para distintas clases de lodos (Montgomery, 1989)

Figura 2. 16 Relación de velocidad de sedimentación y cantidad adicionada de polielectrolito para distintos pesos moleculares de floculante (Núñez, 2004)

Figura 3. 1 Etapas experimentales de este estudio

Figura 3. 2 Representación esquemática del número de pruebas de espesamiento realizadas para el lodo generado por la combinación Co/FI N1, y aplicando cuatro espesantes.

Figura 3. 3 Equipo piloto empleado para producir los lodos necesarios para las pruebas de espesamiento

Figura 3. 4 Técnica experimental de las pruebas de espesamiento de los seis tipos de lodos evaluados.

Figura 3. 5 Técnica analítica para determinar % de humedad y sólidos totales.

Figura 3. 6 Figura Esquemática del equipo para realizar prueba REF.

Figura 3. 7 Procedimiento de la prueba de Resistencia Específica a la Filtración (REF) de lodos.

Figura 4. 1 Comportamiento del valor de REF para los diferentes tipos de lodos a distintas dosis de espesante E1 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo, Carga catiónica 10%)

Figura 4. 2 Comportamiento del valor de REF para los diferentes tipos de lodos a distintas dosis de espesante E2 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo, Carga catiónica 20%)

Figura 4. 3 Comportamiento de valor de REF para los diferentes tipos de lodos a distintas dosis de espesante E3 (poliacrilamida, Carga catiónica 35%)

Figura 4. 4 Comportamiento de valor de REF para los diferentes tipos de lodos a distintas dosis de espesante E4 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo, Carga catiónica 55%)

Figura 4. 5 Estructura química del PoliDADMAC (Binghui, *et al.*, 2006).

Figura 4. 6 Valores de REF para el grupo 1 de lodo en función de la dosis aplicada de espesante E1 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo, Carga catiónica 10%)

Figura 4. 7 Valores de REF para el grupo 1 de lodos en función de la dosis aplicada de espesante E2 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo, Carga catiónica 20%)

Figura 4. 8 Valores de REF para el grupo 1 de lodos en función de la dosis aplicada de espesante E3 (poliacrilamida, Carga catiónica 35%)

Figura 4. 9 Valores de REF para el grupo 1 de lodos en función de la dosis aplicada de espesante E4 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo, Carga catiónica 55%)

Figura 4. 10 Valores de REF para el grupo 2 de lodos en función de la dosis aplicada de espesante E1 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo, Carga catiónica 10%)

Figura 4. 11 Valores de REF para el grupo 2 de lodos en función de la dosis aplicada de espesante E2 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo, Carga catiónica 20%)

Figura 4. 12 Valores de REF para el grupo 2 de lodos en función de la dosis aplicada de espesante E3 (poliacrilamida, Carga catiónica 35%)

Figura 4. 13 Valores de REF para el grupo 2 de lodos en función de la dosis aplicada de espesante E4 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo, Carga catiónica 55%)

Figura 4. 14 Valores de REF en función de la carga catiónica de espesante para un lodo generado por la Combinación Co/FI N 1 (Clorhidrato de aluminio-poliDADMAC/poliamida)

Figura 4. 15 Valores de REF en función de la carga catiónica de espesante para un lodo generado por la Combinación Co/FI N2 (Policloruro de aluminio/copolímero de acrilamida-ácido acrílico)

Figura 4. 16 Valores de REF en función de la carga catiónica de espesante para un lodo generado por la Combinación Co/FI N3 (Clorhidróxido de aluminio-poliDADMAC/poliDADMAC)

Figura 4. 17 Valores de REF en función de la carga catiónica de espesante para un lodo generado por la Combinación Co/FI N4 (Polihidróxicloruro de aluminio/poliamina)

Figura 4. 18 Valores de REF en función de la carga catiónica de espesante para un lodo generado por la Combinación Co/FI N5 ($Al_2(SO_4)_3$ libre de Fe/poliDADMAC)

Figura 4. 19 Valores de REF en función de la carga catiónica de espesante para un lodo generado por la Combinación Co/FI N6 ($Al_2(SO_4)_3$ estándar /poliamina)

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Características de coagulantes (Malpica, 2002)

Tabla 2. 2 Ejemplos de Floculantes Orgánicos sintéticos aniónicos, catiónicos y no iónicos (extraído de <http://archivosiiespanes/Ing%20Ambiental%20IIa%20Primarios.ppt>)

Tabla 2. 3 Límites máximos permisibles de metales pesados en biosólidos y lodos (NOM-004-SEMARNAT-2002)

Tabla 2. 4 Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos (NOM-004-SEMARNAT-2002)

Tabla 2. 5 Aprovechamiento de Biosólidos (NOM-004-SEMARNAT-2002)

Tabla 2. 6 Criterios Microbiológicos para biosólidos clase A (US EPA/503/5).

Tabla 2. 7 Criterios microbiológicos para biosólidos clase B.

Tabla 2. 8 Resultados de % humedad y sólidos totales de lodos de la planta potabilizadora Los Berros (Sandoval *et al.*, 2001).

Tabla 2. 9 Contenido de metales de dos lodos provenientes de plantas potabilizadoras y su comparación con los límites máximos de metales establecidos por la Norma oficial mexicana correspondiente (Pavón *et al.*, 2005)

Tabla 2. 10 Características de los lodos generados y almacenados de la planta potabilizadora “Los Berros”, Sistema Cutzamala, junio 2005 (Parcialmente reproducido de Ramírez *et al.*, 2005)

Tabla 2. 11 Polielectrolitos orgánicos sintéticos usados en el tratamiento de agua (Montgomery, 1989; Dentel; 1989).

Tabla 2. 12 Distintos pesos moleculares de polielectrolitos (Montgomery, 1989)

Tabla 3.1 Coagulantes seleccionados para generar los lodos empleados en las pruebas de espesamiento

Tabla 3.2 Floculantes seleccionados para generar los lodos empleados en las pruebas de espesamiento

Tabla 3. 3 Ecuaciones para el cálculo de volumen de lodos para cada combinación coagulante floculante (Extraídas de Ramírez *et al.*, 2009).

Tabla 3.4 Combinaciones y dosis de Coagulante-Floculante empleadas para generar los seis lodos utilizados en las pruebas de espesamiento

Tabla 3. 5 Especificaciones de los espesantes proporcionados por la empresa 1.

Tabla 3. 6 Especificaciones de los productos espesantes proporcionados por la empresa 2

Tabla 3. 7 Espesantes empleados en las pruebas de espesamiento de lodos de la PPLB.

Tabla 3. 8 Intervalo seleccionado de dosis (mL reactivo/100 mL de lodo) de espesantes a aplicar en las pruebas de espesamiento de los seis lodos a evaluar

Tabla 3. 9 Intervalo seleccionado de dosis de espesantes a aplicar en las pruebas de espesamiento de los seis lodos a evaluar

Tabla 3. 10 Volumen de agua cruda necesaria para cada combinación Coagulante-floculante y número de corridas experimentales necesarias para generar el volumen necesario a utilizar en las pruebas de Espesamiento

Tabla 3. 11 Tiempos y velocidades de agitación para la generación del volumen necesario de lodos para realizar las pruebas de espesamiento

Tabla 4. 1 Codificación de tipos de lodo generados a partir de seis combinaciones aplicadas de coagulante-floculante al agua cruda de presas

Tabla 4. 2 Contenido de sólidos totales en los seis tipos de lodos sometidos a estudio

Tabla 4. 3 Carga catiónica reportada por los proveedores para cada espesante

Tabla 4. 4 Mejores Resultados de REF y % de Humedad y su combinación Coagulante-Floculante-Espesante

Tabla 4. 5 Ponderaciones Utilizadas en la MDM.

Tabla 4. 6 Matriz de decisión multicriterio aplicando únicamente aspectos técnicos para la selección de la mejor combinación Co/FI/E

Tabla 4. 7 Calificaciones asignadas de acuerdo al costo para la MDM

Tabla 4. 8 Matriz de decisión multicriterio aplicando únicamente aspectos económicos para la selección de la mejor combinación Co/FI/E

Tabla 4. 9 Matriz de Decisión Multicriterio de factibilidad técnico-económica para la selección de la mejor combinación Co/FI/E

SIMBOLOGÍA

Al	Aluminio
Al(OH) ₃	Hidróxido de Aluminio
Al ₂ (SO ₄) ₃	Sulfato de Aluminio
CaCO ₃	Carbonato de Calcio
CaO	Óxido de Calcio
CaSO ₄	Sulfato de Calcio
CC	Carga Catiónica
CEPCI	Chemical Engineering Plant Cost Index
Co	Coagulante
Co/FI/E	Coagulante-Floculante- Espesante
Cr	Cromo
DWW	Domestic Waste Water
E	Espesante
EXW	Ex Works (Libre en Fábrica)
Fe	Hierro
FI	Floculante
m ³ /s	metros cúbicos por segundo
MDM	Matriz de Decisión Multicriterio
ND	Dato No Disponible
NMP	Número más probable
NMX	Norma Mexicana
NOM	Norma Oficial Mexicana
NSF	National Sanitation Foundation
poliDADMAC	Cloruro de polidialildimetilamonio
PPLB	Planta Potabilizadora "Los Berros"
%p/p	% peso/peso
PTAP	Planta de Tratamiento de Agua Potable
SEMARNAT	Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales
spp	Se refiere a que incluye a todas las especies de salmonella
SS	Sólidos Totales en base seca
ST	Sólidos Totales
Std.	Estándar
STS	Sólidos Totales en base seca
SV	Sólidos Volátiles
TF	Tiempo de Filtración
TRAC	Tanque de Recepción de Aguas Crudas
UFC	Unidades Formadoras de Colonias
UNT	Unidades Nefelométrías de Turbiedad

RESUMEN

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo de tesis es determinar el mejor tipo de lodo de coagulación-floculación y de espesante, respectivamente para su manejo y aplicación en una planta potabilizadora, de entre seis tipos de lodos y cuatro de espesantes.

Este manuscrito se constituye de cinco capítulos principales: Capítulo 1 Introducción; Capítulo 2 Marco Teórico; Capítulo 3 Metodología Experimental; Capítulo 4 Resultados y Discusión; y Capítulo 5 Conclusiones y Recomendaciones.

En la Introducción se plantea principalmente la problemática asociada a la producción y manejo por espesamiento de lodos provenientes del proceso de clarificación del agua cruda en plantas potabilizadoras.

En el Marco Teórico, se presentan conceptos como el proceso fisicoquímico que produce lodos en una planta potabilizadora, la definición de lodo y sus distintas clasificaciones, las características físico-químicas del mismo, las normatividades que lo regulan nacional e internacionalmente, el proceso de acondicionamiento (espesamiento) y los reactivos más empleados en dicho proceso, así como sus características.

En la metodología experimental se presentan los materiales y reactivos, sistemas y técnicas experimentales y técnicas analíticas que se aplicaron en este estudio. La metodología experimental de este trabajo se dividió en cuatro etapas principales: 1) Selección de los reactivos químicos a ser empleados en las pruebas de espesamiento de lodos; 2) Realización de pruebas para la generación del volumen de lodos necesario para las pruebas de espesamiento de los seis lodos a evaluar; 3) Realización de pruebas de espesamiento de los seis lodos y 4) Caracterización de los lodos antes y después de espesamiento (determinación de

humedad (H), sólidos totales (ST), y de la Resistencia Específica a la Filtración (REF)). Los lodos utilizados en este trabajo se produjeron a partir del agua cruda de la planta potabilizadora Los Berros (PPLB) y aplicando de manera separada seis combinaciones de coagulante/floculante: 1) Clorhidrato-Al-poliDADMAC/ Poliamina; 2) Policloruro de Aluminio/ Copolímero de acrilamida- ácido acrílico; 3) Clorhidróxido-Al-poliDADMAC/ PoliDADMAC; 4) Polihidróxi-cloruro de aluminio / Poliamina; 5) $Al_2(SO_4)_3$ libre de Fe /PoliDADMAC y 6) $Al_2(SO_4)_3$ estándar/ Poliamina. Estas seis combinaciones se seleccionaron con base en los resultados obtenidos en un estudio anterior (Ramírez *et al.*, 2009) que fue realizado para evaluar mejores reactivos químicos, alternativos al sulfato de aluminio (actualmente utilizado en la planta potabilizadora Los Berros).

Dentro de los principales resultados se encuentran que, por una parte, los lodos que presentaron menor valor de REF (lo cual indica una mayor facilidad de espesamiento), tanto con espesante como sin este reactivo, fueron los generados a partir de las combinaciones de coagulante-floculante (Co/FI) No. 1 y No. 3. En contraste, el lodo con mayor valor de REF (menor facilidad para ser espesado) y mayor contenido de humedad fue el obtenido con la combinación No. 4. Por otra parte, se determinó también que espesantes (E) con medianos valores de carga catiónica (carga catiónica de 35% y 55%) permitieron obtener mejores resultados de espesamiento con las dosis más bajas evaluadas en este estudio (valores de entre 0.3 y 0.5 kg de polielectrolito o espesante/ton de lodo). También, se muestran los resultados del estudio de factibilidad técnica y económica, empleando una matriz de decisión multicriterio.

Finalmente, en el Capítulo 5 y con base en los resultados antes mencionados se concluye que la mejor combinación obtenida de Co/FI/E, fue la formada por el clorhidrato de Al-poliDADMAC/poliamina/copolímero de acrilamida-cloruro de metilo (55% de carga catiónica) con una dosis de espesante de 0.3 kg de polielectrolito por tonelada de lodo.

1 INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA

El tratamiento de agua superficial por coagulación-floculación en plantas potabilizadoras implica la generación de residuos o lodos. El volumen de dichos lodos representa del 0.3 al 3% del agua tratada, el cual se genera como resultado de la aplicación de reactivos adicionados para la remoción de sólidos suspendidos, coloides y bacterias presentes en el agua cruda (Sandoval *et al.*, 1998).

Actualmente, en general en las plantas potabilizadoras en México, estos lodos son bombeados y almacenados en presas o dispuestos en terrenos sin ningún tratamiento (Ramírez *et al.*, 2005).

Las características y el volumen del lodo generado en plantas potabilizadoras dependen del origen del agua cruda (presa, río, lago, etc.) y del tipo de reactivos químicos usados. Estos parámetros también dependen de la época del año en que se realice el tratamiento (Sánchez *et al.*, 2000).

A finales del 2007 en México, se reportaron 541 plantas potabilizadoras en operación, y que en conjunto representan un gasto de alrededor de 86.39 m³/s de agua. De estas plantas, 184 instalaciones aplican un tratamiento de clarificación convencional para potabilizar 58.25 m³/s de agua en México (SEMARNAT, 2008).

Estas plantas emplean algún tipo de coagulante, siendo el sulfato de aluminio el más utilizado, para remover los sólidos suspendidos que contiene el agua (Sandoval *et al.*, 1998). Considerando un valor medio de producción de lodos del 0.7% por metro cúbico de agua tratada, reportado por Sandoval *et al.*, (1998), y utilizando los datos de agua tratada por clarificación convencional para el año 2007 (SEMARNAT, 2008), se estimó que en el país se generaron para ese año alrededor de 0.41 m³/s ó 35,231 m³/día de lodos. En la planta potabilizadora “Los

Berros”, la más grande del país con un caudal promedio tratado de $15 \text{ m}^3/\text{s}$, se estima una producción de lodos de alrededor de $0.10 \text{ m}^3/\text{s}$ ó $9,072 \text{ m}^3/\text{día}$, lo cual corresponde 25.75% de los lodos producidos por clarificación convencional. Una vez producidos, estos lodos deben ser manejados y puestos a disposición adecuadamente. Una manera para su mejor manejo y transporte, en término de costos, son su espesamiento y deshidratación, antes de ser puestos a disposición, o en el mejor de los casos, ser aprovechados.

El espesamiento de lodos puede ser definido como el proceso destinado a remover una parte del agua remanente en estos residuos. El objetivo básico de dicho espesamiento es reducir el volumen de líquido del lodo, que será manejado y tratado en procesos subsecuentes con vistas a una disposición final o aprovechamiento (Turovskii y Mathai, 2006). Una remoción de agua permite obtener un menor volumen a ser manejado y, por lo tanto, esto se traduce en menores costos de transporte. Lo anterior es muy importante debido a que el tratamiento y transporte de un lodo puede representar hasta una tercera parte de los costos totales en una planta potabilizadora. Existen diferentes métodos de reducción de agua que se aplican solos o combinados como son: el espesamiento, la deshidratación, la atomización.

El espesamiento y deshidratación de un lodo ofrece diferentes ventajas, las cuales pueden reducir costos, dichas ventajas son mencionadas a continuación (Sette y Lora, 1993).

- 1- Amortigua las fluctuaciones de flujo y concentración de lodo.
- 2- El espesamiento del lodo con un polielectrolito mejora la deshidratación del mismo, acorta el tiempo de sedimentación (Bolto, *et al.*, 2007).
- 3- La reducción del volumen reduce los costos del bombeo de lodo y del área de disposición final.

Con pocas excepciones (Sandoval *et al.*, 1998, 2000 y 2002), no hay reportes publicados y que estén relacionados con la influencia de la estructura molecular de los espesantes empleados en lodos provenientes de plantas potabilizadoras.

Considerando lo anterior se planteó realizar un estudio con el agua cruda de la planta potabilizadora Los Berros, la cual es la más grande del país y presenta un tren de tratamiento de coagulación-floculación. A continuación se presenta una descripción de esta planta potabilizadora.

1.2 PLANTA POTABILIZADORA “LOS BERROS”

La planta potabilizadora “Los Berros” (PPLB), forma parte del sistema Cutzamala, Estado de México, que suministra agua potable a las ciudades de Toluca y México, D. F.

La planta potabilizadora Los Berros es la más grande de México, al tratar el 17.36% del total de agua potabilizada en el país y el 89.72% del agua potabilizada en el Edo. De México (SEMARNAT, 2008). Esta instalación procesa un promedio de 15 m³/s de agua proveniente de las presas Valle de Bravo, Villa Victoria, Colorines y Chilesdo. Este flujo se distribuye en cinco módulos denominados: B, C, D, E y F, cada uno de los cuales está a su vez constituido por un tanque hidráulico de mezcla rápida (canales Parshall), cuatro floculadores hidráulicos, cuatro sedimentadores de alta tasa y ocho filtros de arena. Al final, el agua tratada en los cinco módulos es almacenada en un cárcamo, de donde es enviada a su distribución (Cerón., 2006). Es importante mencionar que, los sedimentadores cuentan con equipos de recolección en continuo de los lodos que se generan en los mismos, los cuales son enviados a espesadores en los que se adiciona un espesante o polielectrolito catiónico y posteriormente se envían de manera consecutiva a un cárcamo de bombeo, presa y tarquinas de lodos. Sin embargo, los lodos crudos y espesados contienen un alto contenido de humedad, respectivamente de 99% y 98%.

El tren de tratamiento de agua y de lodos en la planta potabilizadora “Los Berros” se ilustra en la figura 1.1 (Cerón, 2006).



Figura 1. 1 Tren de Tratamiento de la Planta Potabilizadora “Los Berros” (Cerón, 2006).

El sulfato de aluminio, empleado actualmente como coagulante en la planta potabilizadora Los Berros (PPLB), genera lodos formados principalmente por hidróxido de aluminio ($\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$). Estos hidróxidos contienen grandes cantidades de agua retenida en su estructura, lo que genera una suspensión voluminosa de lodo con valores bajos de concentración de sólidos y de propiedades de deshidratación (CEPIS, 1976). En el estudio realizado por Ramírez et al., (2005) se determinó que para optimizar el espesamiento de lodos de la PPLB y para realizar de manera factible la implementación de las opciones de valoración de estos residuos, era altamente recomendable iniciar acciones o cambios en las condiciones de operación de los procesos instalados para la reducción del contenido de humedad en los lodos de los espesadores; por otro lado, el sulfato de aluminio ha incrementado significativamente su costo de adquisición, generando así una desventaja más en su uso, lo cual crea la necesidad de encontrar coagulantes y floculantes alternativos.

Ante dicha problemática, Ramírez *et al.*, (2009) realizaron un estudio con el fin de encontrar otras opciones de coagulantes, diferentes al sulfato de aluminio, y de floculantes. En ese estudio se seleccionaron, con base en pruebas de laboratorio, las seis mejores combinaciones de estos dos tipos de reactivos, de las cuales se obtienen distintos volúmenes de lodo cada uno de ellos con distintas características de espesamiento y deshidratación. Estos parámetros influyen significativamente en los costos de tratamiento y, por lo tanto, es necesario determinar la mejor opción de lodo y espesante a manejar en la planta.

Con base en lo anterior, en este estudio se plantearon los objetivos que se presentan a continuación.

OBJETIVOS GENERALES

1. Determinar en laboratorio el mejor tipo de lodo de coagulación-floculación, desde el punto de vista técnico-económico, para su espesamiento y manejo en la planta potabilizadora de Los Berros, de entre un total de seis tipos diferentes de lodos.
2. Determinar en laboratorio el mejor tipo y dosis de espesante, de entre cuatro diferentes tipos de reactivos, para el espesamiento del mejor tipo de lodo a espesar determinado para la planta potabilizadora de Los Berros.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ⊕ Evaluar a nivel de laboratorio la influencia de la dosis de espesante (polielectrolito catiónico) aplicado en el proceso de espesamiento de seis tipos de lodos, generados a partir de seis combinaciones diferentes de coagulante- floculante.
- ⊕ Evaluar a nivel de laboratorio la influencia del valor de la carga catiónica del polielectrolito empleado en el proceso de espesamiento de seis tipos diferentes de lodos.
- ⊕ Evaluar a nivel de laboratorio la influencia del tipo de lodo aplicado sobre su espesamiento con polielectrolitos catiónicos, de entre un grupo de seis tipos diferentes de lodos.
- ⊕ Seleccionar la mejor combinación de Coagulante-Floculante-Espesante, de entre todas las evaluadas en este estudio, con base en una matriz de factibilidad técnico-económica.

2 MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

2.1 GENERALIDADES DEL PROCESO DE COAGULACIÓN FLOCULACIÓN

La mayor cantidad de lodos obtenidos en una planta potabilizadora de agua superficial es producida en la etapa de coagulación, floculación, que consiste en la remoción de partículas finas de tipo coloidal mediante la adición de reactivos químicos que realizan la desestabilización y aglomeración de estas partículas. Estos lodos se separan del agua en las etapas de sedimentación y/o filtración (<http://cabierta.uchile.cl/revista/15/articulos/pdf/edu4.pdf>,2009). A continuación se presentan las generalidades de los procesos de coagulación-floculación.

2.1.1 DEFINICIÓN Y MECANISMO

Los coloides, que constituyen una parte del color y turbiedad del agua, poseen una estabilidad que hace difícil que sedimenten por procesos naturales (pueden tardar hasta 755 días en sedimentar). Debido a lo anterior es necesaria la aplicación de aglomerantes o coagulantes para su desestabilización y agrupación, consiguiendo así una partícula de mayor tamaño y peso, la cual sí puede sedimentar por acción de la gravedad

Descripción del proceso

La coagulación comienza en el mismo instante en que se agrega reactivo al lodo y dura solamente fracciones de segundo, básicamente consiste en una serie de reacciones físicas y químicas entre el coagulante y la superficie de las partículas del lodo. La floculación es la etapa de transporte que provoca el crecimiento de las partículas aglomeradas.

Esto implica la formación de puentes químicos entre partículas de modo que se forme una malla de coágulos, la cual sería tridimensional y porosa. Así se formaría, mediante el crecimiento de partículas coaguladas, un floc suficientemente grande y pesado como para sedimentar (Degrémont, 2009).

Estos procesos son ilustrados en las Figuras 2.1, 2.2 y 2.3

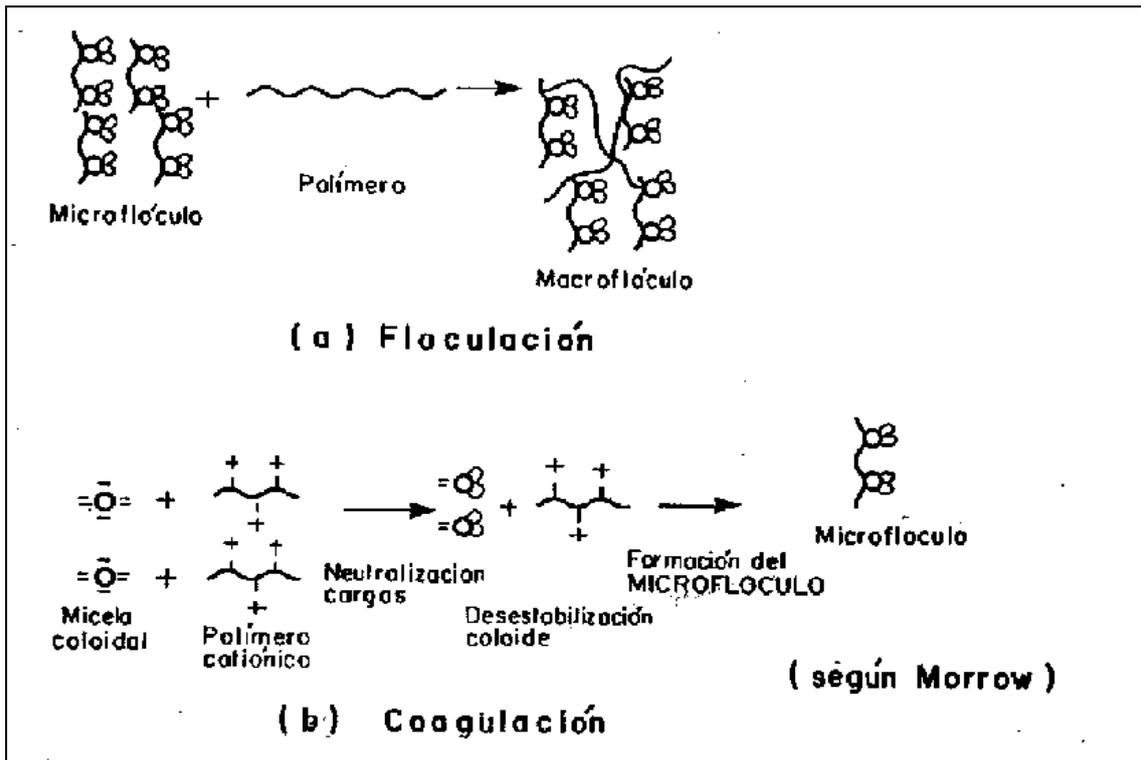


Figura 2. 1 Proceso de coagulación y flocculación
 (<http://archivosia.iespana.es/Ing%20Ambiental%20IIa%20Primarios.ppt>).

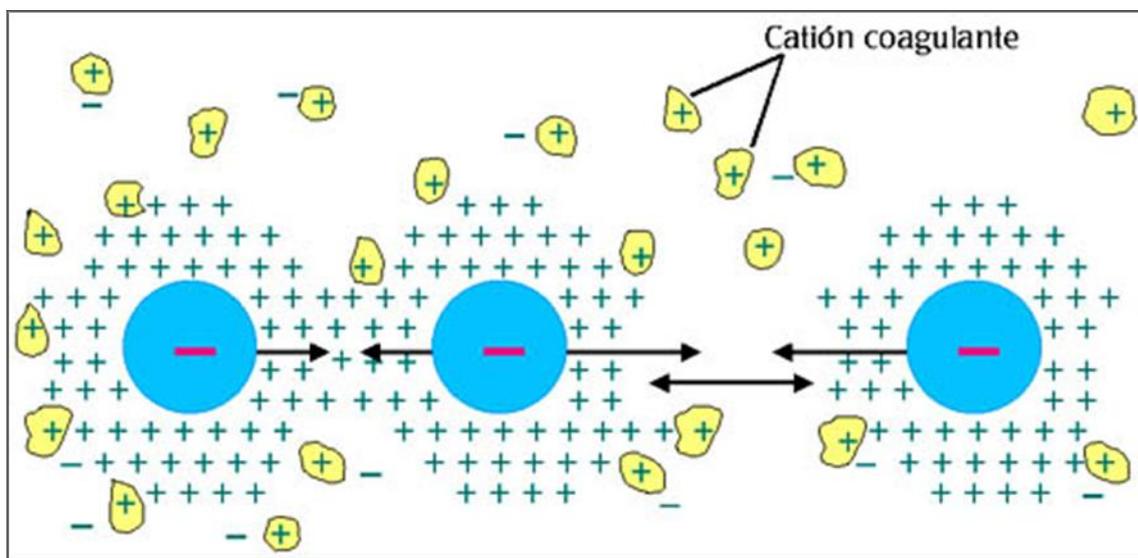


Figura 2. 2 Acción del Coagulante
 (<http://archivosia.iespana.es/Ing%20Ambiental%20IIa%20Primarios.ppt>).

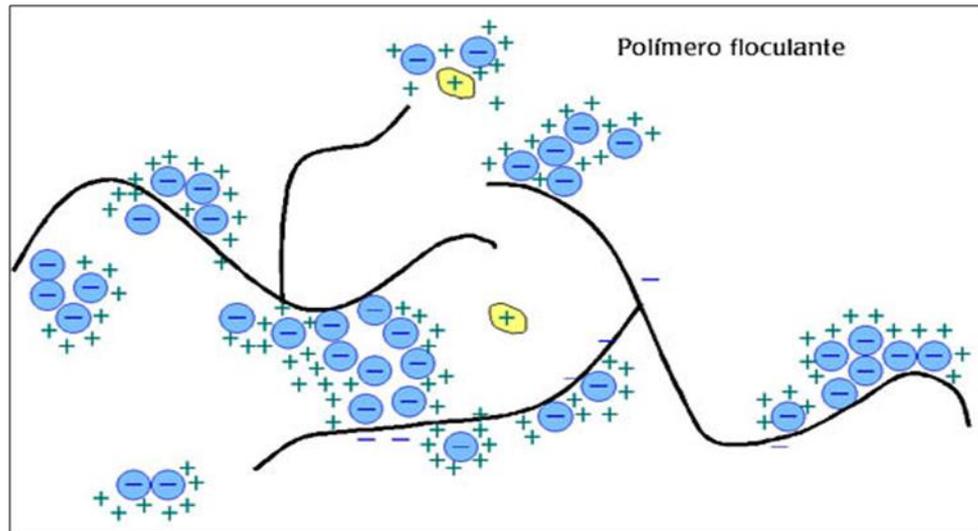


Figura 2. 3 Acción del Floculante

(<http://archivosia.iespana.es/Ing%20Ambiental%20IIa%20Primarios.ppt>).

2.1.2 REACTIVOS UTILIZADOS EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN

Los principales coagulantes utilizados son sales metálicas de aluminio y de hierro, como sulfato de aluminio (Alumbre, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$), cal, sulfato férrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$), sulfato ferroso ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) y cloruro férrico (FeCl_3) (Cheremisinoff, 1995).

El coagulante utilizado dependerá de las características del agua a tratar, para determinar el más indicado, así como la dosis y condiciones de la coagulación es necesario realizar una prueba de jarras.

La adición de sales coagulantes como el sulfato de aluminio, sulfato férrico o cloruro férrico, producen cationes poliméricos tales como $[\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}]^{7+}$ y $[\text{Fe}_3(\text{OH})_4]^{5+}$ cuyas cargas positivas neutralizan las cargas negativas de los coloides permitiendo que las partículas se unan formando aglomerados pequeños denominados flóculos (Benefield *et al.*, 1982).

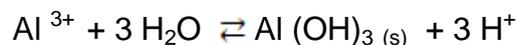
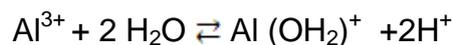
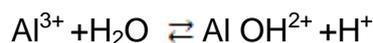
a) Sales de Aluminio

Dentro de las sales de aluminio, la más utilizada es el sulfato de aluminio o alumbre, ya sea líquido o sólido ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$). Este compuesto permite la remoción de color, turbiedad y mediante englobamiento en los flóculos formados, remueve parcialmente las bacterias, virus y en general

microorganismos. Las dosis empleadas varían de 15 a 200 g/m³, es un reactivo corrosivo y ácido, conviene evitar derrames y contacto con la piel. Existen varios tipos de alúmina disponibles como la “alúmina activada” que contiene 9% de silicato de sodio, esto mejora la coagulación en algunas aguas; también existe la “alúmina negra”, la cual contiene carbón activado (Malpica, 2002).

Los policloruros poseen fuerte poder de coagulación y floculación, su intervalo de pH es muy amplio, desde 5.5 a 10. Son indicados para aplicarse en aguas de baja conductividad y turbiedad, han de usarse preferentemente sin diluir, dosis máximas de 100 g/m³ como producto 100%, no necesitan coadyuvante. Los policlorosulfatos poseen elevada velocidad de decantación y el intervalo de pH de trabajo es amplio (6-9), por lo que no necesitan coadyuvante (Company, 1989).

Cuando esta sal se agrega al agua se disuelve rápidamente. Los iones SO₄⁻² se dispersan en el líquido. Los iones de aluminio, sin embargo reaccionan con el agua para hidrolizarse. En su forma más simple el ion de aluminio está rodeado por tres moléculas de agua y tiene tres cargas positivas (Al (H₂O)₃³⁺ o Al³⁺). Bajo las condiciones de pH utilizadas en los procesos de tratamiento de agua, los iones de aluminio trivalente se hidrolizan inmediatamente para formar diferentes especies como las siguientes (Dennis G. *et al.*, 2005).



Los iones AlOH²⁺ son monoméricos, aunque son menores a +3, son coagulantes más efectivos para coloides negativos ya que son adsorbidos en la superficie de algunos sólidos. Los iones como el Al₇ (OH)₁₇⁴⁺ puede formar polímeros debido a que tienen gran cantidad de iones aluminio, los cuales probablemente son adsorbidos fuertemente en la mayoría de los coloides negativos y son buenos coagulantes. Nótese que el ambiente es ácido; los protones son liberados en la solución, por lo tanto las especies de aluminio que

se forman cuando se utiliza alumbre del pH del agua y de la cantidad e reactivo agregada (Dennis G. *et al.*, 2005).

La alúmina actúa de dos formas diferentes. En la mayoría de los casos la alúmina se agrega para precipitar en forma de $Al(OH)_{3(s)}$. Esto cubre al colide de una capa gelatinosa además de proveer mayores puntos de contacto acelerando el proceso de floculación hasta agregados de mayor tamaño. Esto es necesario cuando el agua es de baja turbiedad. Esta forma de coagulación, en la cual se forman cantidades considerables de hidróxido de aluminio, es conocida como coagulación de barrido (Dennis G. *et al.*, 2005).

Un segundo mecanismo de coagulación es por medio de la adsorción de los monómeros y polímeros de aluminio con carga positiva sobre coloides negativos neutralizando así, la carga original de estas partículas volviéndolas inestables para poder formar agregados, este tipo de coagulación sólo se practica en agua con turbiedad alta ya que sólo se adiciona poca cantidad de sólidos al agua. (Malpica, 2002).

Los lodos formados por coagulación de barrido son gelatinosos, además de ser difíciles de deshidratar; aquellos lodos formados durante la coagulación por adsorción son más compactos y de fácil deshidratación (Malpica, 2002).

b) Sales de Hierro

Las sales de hierro más empleadas son: el cloruro de hierro que puede ser hierro trivalente o divalente (es mejor trivalente, debido a su mayor solubilidad). El rango de pH es de 4-11, se encuentra como cristales hidratados cafés o amarillos, cristales anhidros verde oscuro o en solución al 35-15%. El sulfato férrico es un líquido amarillo que se encuentra en forma anhidra y en forma hidratada, rango de pH de 3.5 a 11 y dosis de 15 a 160g/m³ de reactivo comercial. El sulfato ferroso (sólido verdoso) que es la fuente más económica de hierro, se usa hidratado, sin embargo es necesario aplicar alcalinidad adicional para obtener un producto de solubilidad más conveniente (Malpica, 2002).

Los compuestos de hierro tienen condiciones de pH en el proceso de coagulación y características de flóculo similares a aquellas utilizadas para el

sulfato de aluminio. A pesar de que los compuestos de hierro son a menudo más baratos, estos compuestos son más corrosivos además de que producen un efluente con alto contenido en este metal.

En la tabla se resumen las características que presentan diversos productos químicos que se emplean como coagulantes.

Tabla 2. 1 Características de coagulantes (Malpica, 2002).

Producto Químico	pH		Dosis (g/L)	Recomendaciones
	Intervalo	Óptimo		
Cloruro férrico	5-11	5.5	0.06	Oxidar SH ₂ a pH alto
Sulfato ferroso	8.5-11	9	0.06-0.13	
Sulfato férrico	5-11	8-8.5	0.06	Evitar sobredosificación
Sulfato de alúmina	5-5.8	6-8.5	0.13-0.16	Normalmente se usa cal
Cloruro de aluminio	5.32		0.13	

c) Coagulantes químicos orgánicos

Los coadyuvantes de la coagulación o floculantes pueden ser también minerales (como la sílice activada, la bentonita, algunas arcillas, carbonato de calcio precipitado y el carbón activo en polvo) u orgánicos (proteínas, ácidos nucleicos, ácido péptico, ácido algínico y algunos polisacáridos, polímeros).

Esto incluye usos como coagulantes primarios, los polímeros, en contraste con compuestos de aluminio y hierro, no producen flóculos voluminosos. Esto es especialmente ventajoso en aquellas aplicaciones donde se requiere poco volumen de fóculo, por ejemplo cuando se usan filtros granulares medianos para la remoción de partículas. (Malpica, 2002).

Para que un polímero sea útil como desestabilizante químico, debe adsorberse sobre las partículas a remover. Por lo tanto, existe una relación directa entre la concentración de partículas a desestabilizar y la concentración necesaria de polímero para desestabilizarlas.

Los polímeros actúan de dos maneras, ambas requieren de la adsorción del polímero en las partículas suspendidas. Primero, cuando el polímero y las partículas tienen carga opuesta (por ejemplo un polímero catiónico y un organismo cargado negativamente), la adsorción del polímero neutraliza la carga de las partículas, para este caso el peso molecular no es un factor de importancia, por lo que se utilizan polímeros pequeños (Malpica, 2002).

El segundo mecanismo sucede cuando los efectos de las cargas no son significativos. En este segundo caso, los polímeros deben servir como puentes entre partículas que se repelen, por lo tanto es necesario utilizar polímeros de cadena lo suficientemente larga para formar dichos puentes, es decir, se necesitan polímeros de alto peso molecular.

Cabe mencionar, que cuando la turbiedad es elevada se requieren de dosis altas de polímero. En el caso en que la turbiedad es baja, los polímeros no son recomendados como coagulantes efectivos debido a que no existe una probabilidad alta de contacto en el tanque de floculación con tiempos de retención razonable para producir agregados más largos (Malpica, 2002).

El uso exitoso de los polímeros en el tratamiento de agua requiere de una dispersión del polímero de forma uniforme, así como de una selección apropiada del tipo y dosis del polímero. Según el mecanismo predominante, esta selección se verá influenciada de diferentes maneras por las propiedades fisicoquímicas tanto de las partículas como de la solución.

Cuando los coagulantes por sí solos no reducen el potencial zeta lo suficiente como para lograr una remoción satisfactoria de coloides, se utilizan los llamados coadyuvantes, es decir, ayudantes de floculación son en general macromoléculas de cadena larga. La ventaja radica en que cuando las partículas no pueden aproximarse por las fuerzas de repulsión, la gran longitud de cadena polimérica permite unir coloides entre sí mediante puentes, en

condiciones en las cuales no hubiera habido normalmente coagulación. Esta reacción es rápida el 85% del polímero se adsorbe en aproximadamente 10 segundos. La cantidad de polímero utilizado es de 0.1 a 1 mg/L (Malpica, 2002).

Los polielectrolitos no iónicos como poliacrilamidas cuyo peso molecular está entre 1 y 30 millones, los aniónicos que son una coexistencia de grupos que permiten la adsorción provocando la extensión del polímero y los catiónicos, en los cuales la carga eléctrica neta es positiva. Algunos ejemplos de floculantes sintéticos orgánicos se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2. 2 Ejemplos de Floculantes Orgánicos sintéticos aniónicos, catiónicos y no iónicos (extraído de <http://archivosia.iespana.es/Ing%20Ambiental%20IIa%20Primarios.ppt>).

Floculantes Orgánicos Sintéticos		
Aniónicos	Catiónicos	No- iónicos
Poliacrilamidas	Poliacrilamidas	Óxido de etileno polimerizado
Ac. Poliacrílicos	Polietileniminas	Poliacrilamidas
Polimetacrilatos	Polivinilpiridinas	
Poliestireno Sulfonado	Polidialidimetilamonio	
Ácidos polivinilsulfónicos		
Derivados de la celulosa		

Existen algunas sustancias que ayudan a la floculación de distintas maneras, ya sea modificando el pH del agua (hidróxido de sodio), transformando los coloides hidrofílicos en hidrofóbicos (ejemplo: cloro), neutralizando cargas eléctricas de los coloides (ejemplo: sulfato de magnesio) o sirviendo de material soporte y medio adsorbente (arcillas, sílice activada).

2.1.3 PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS REMOVIDOS POR EL PROCESO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN

Por medio de los procesos de coagulación-floculación es posible obtener un efluente con bajos niveles de turbiedad, libre de partículas en suspensión o en estado coloidal que no sedimentan o sedimentan tan lentamente que alargará

el tiempo de tratamiento. La coagulación-floculación permite la remoción de sólidos en aguas con gran contenido en sólidos.

Las partículas que contaminan el agua y que pueden ser removidas por coagulación floculación son:

- Partículas de origen inorgánico: arcillas, óxidos y sales
- Partículas de origen orgánico: ácidos húmicos y fúlvicos coloidales, microorganismos
- Contaminantes tóxicos: metales pesados, pesticidas y virus

El grado de clarificación del agua depende de la cantidad de reactivos y el proceso en sí. Este método es capaz de remover del 80 al 90% del total de materia suspendida, del 50% al 55% de materia orgánica total y de un 80% a un 90% de microorganismos.

El tratamiento de coagulación puede ser combinado con adsorción con carbón activado, para un tratamiento biológico más eficiente de compuestos orgánicos. Los valores del parámetro de DQO pueden mejorar hasta un 80% con esta combinación en comparación con tratamiento biológico convencional (Malpica, 2002).

2.2 GENERALIDADES DE LODOS PROVENIENTES DE PLANTAS POTABILIZADORAS

2.2.1 DEFINICIÓN DE LODO

Como resultado del tratamiento de aguas se genera una suspensión, con gran cantidad de sólidos, llamada “lodos”. Estos lodos se producen ya sea por la concentración de sólidos originalmente presentes en el agua, o por la formación de nuevos, que se producen como resultado de la transformación de sólidos disueltos y coloidales del agua (Metcalf y Eddy, 2000).

Por otra parte, la NOM-004-SEMARNAT-2002 (La cual establece las especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes en lodos y biosólidos, con el fin de posibilitar su aprovechamiento o disposición final y proteger el medio ambiente y la salud humana) define a los lodos como: “sólidos con un contenido variable de humedad, provenientes del desazolve de

los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, que no han sido sometidos a un proceso de estabilización”.

2.2.2 CIFRAS DE GENERACIÓN DE LODOS

En la potabilización por clarificación de aguas superficiales (ríos, lagos, presas, etc.), se generan significativas cantidades de lodos que, en caso de no darles una adecuada disposición final, contribuyen de manera importante a la contaminación del ambiente, afectando suelo, agua y aire (Arteaga y Cusidó-1999).

En Francia, por ejemplo, en 384 plantas potabilizadoras con una producción total de agua tratada de 1.2×10^9 m³/año, se generan 63 800 ton/año (base seca) de lodos (Adler, 2002). En España la obtención de agua potable para consumo humano proviene en más del 80% de los casos de la potabilización de aguas superficiales; se producen anualmente 120 mil toneladas de materia seca de este residuo en 215 estaciones de potabilización de aguas superficiales, que producen 1.35×10^9 m³/año de agua potable (Armenter et al., 2003)

En México, a finales del 2007, se reportaron 541 plantas potabilizadoras en operación, y que en conjunto representan un gasto de alrededor de 2.72×10^9 m³/año de agua. De estas plantas, 184 instalaciones aplican un tratamiento de clarificación convencional para potabilizar 1.84×10^9 m³/año de agua en México (SEMARNAT, 2008).

Considerando un valor medio de producción de lodos del 0.7% por metro cúbico de agua tratada, reportado por Sandoval *et al.*, (1998), y utilizando los datos de agua tratada por clarificación convencional para el año 2007 (SEMARNAT, 2008), se estimó que en el país se generaron para ese año alrededor de 1.29×10^7 m³ de lodos. En la planta potabilizadora “Los Berros”, la más grande del país con un caudal promedio tratado de 15 m³/s, se estima una producción de lodos de alrededor de 3.31×10^6 m³/año, lo cual corresponde 25.75% de los lodos producidos por clarificación convencional, sin embargo se desconoce el volumen de lodo espeso que se produce y por lo tanto, del que se dispone (Sandoval *et al.*, 2002)

En cuanto a datos o cifras de generación de lodos, la información es escasa y en algunos casos prácticamente nula o inexistente.

Los datos registrados de generación de lodos presentan grandes variaciones entre sí debido a una serie de razones, como las siguientes (Degrémont, 2009):

1. Algunas cifras de producción de lodos se estiman sobre la base de la población, mientras que otros están en función de la población equivalente.
2. Algunas cifras se presentan en términos de lodos producidos, mientras que otros están en términos de lodos removidos.
3. Algunos tipos de lodos, tales como los lodos de fosas, no pueden ser incluidos pero a veces se incluyen en algunos reportes.
4. Los sistemas de tratamiento no están siempre bien definidos. Una zanja de oxidación, por ejemplo, se podrá operar con o sin región anóxica, y esto influirá en la cantidad de sólidos producidos.
5. Existen distintos sistemas de alcantarillado, algunos de éstos con una alta cantidad de fugas en secciones específicas.
6. La medición de la producción de lodos en una planta de tratamiento no es una cuestión simple y las cifras pueden variar significativamente, las mejores conjeturas pueden realizarse con información aportada por parte de los operadores.

2.2.3 LEGISLACIÓN AMBIENTAL PARA LODOS

2.2.3.1 NORMATIVIDAD NACIONAL: NOM -004-SEMARNAT-2002

Esta norma oficial mexicana establece las especificaciones y los límites máximos permisibles de contaminantes en los lodos y biosólidos provenientes del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, con el fin de posibilitar su aprovechamiento y disposición final y proteger el medio ambiente y la salud humana.

Para que los biosólidos y lodos considerados en esta norma puedan ser aprovechados, deben cumplir con las especificaciones establecidas en las

Tablas 2.3, 2.4 y 2.5 establecidas en la NOM-004-SEMARNAT-2002. Esta norma clasifica a los biosólidos con base en dos criterios: 1) en función de su contenido de metales pesados como tipo excelente y bueno, y 2) en función de su contenido de patógenos y parásitos, como clase A, B y C.

Los límites máximos permisibles de metales pesados se presentan en la Tabla 2.3, los límites máximos permisibles de patógenos y parásitos de los lodos y biosólidos se enlistan en la Tabla 2.4, el aprovechamiento de los biosólidos se establece en función del tipo y clase como se establece en la Tabla 2.5 y su contenido de humedad hasta el 85%.

Tabla 2. 3 Límites máximos permisibles de metales pesados en biosólidos y lodos (NOM-004-SEMARNAT-2002).

CONTAMINANTE (Determinados en forma total)	EXCELENTES mg/kg en base seca	BUENOS mg/kg en base seca
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1200	3000
Cobre	1500	4300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2800	7500

Tabla 2. 4 Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos (NOM-004-SEMARNAT-2002).

CLASE	INDICADOR BACTERIOLÓGICO DE CONTAMINACIÓN	PATÓGENOS	PARÁSITOS
		Coliformes Fecales NMP/g en base seca	<i>Salmonella spp.</i> NMP/g en base seca
A	Menor de 1000	Menor de 3	Menor de 1 (a)
B	Menor de 1000	Menor de 3	Menor de 10
C	Menor de 2 000 000	Menor de 300	Menor de 35

(a)Huevos de helmintos viables

NMP número más probable.

Tabla 2. 5 Aprovechamiento de Biosólidos (NOM-004-SEMARNAT-2002).

TIPO	CLASE	APROVECHAMIENTO
EXCELENTE	A	<ul style="list-style-type: none"> ⊕ Usos Urbanos con contacto público directo durante su aplicación. ⊕ Los usos establecidos para clase B y C.
EXCELENTE O BUENO	B	<ul style="list-style-type: none"> ⊕ Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación. ⊕ Los usos establecidos para la clase C.
EXCELENTE O BUENO	C	<ul style="list-style-type: none"> ⊕ Usos forestales. ⊕ Mejoramiento de suelos. ⊕ Usos agrícolas.

2.2.3.2 NORMATIVIDAD INTERNACIONAL

NORMATIVA PARA LODOS EN LOS ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA

La *United States Environmental Protection Agency* (USEPA) desarrolló el reglamento “Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge” en 1993 publicado en el capítulo 40 del CFR (Code of Federal Regulations). El cual en sus partes 257,258 y 503 menciona que:

Parte 257

Establece Reglas para los sólidos generados en instalaciones industriales y para lodos sépticos combinados con lodos industriales.

Parte 258

Establece Condiciones para la disposición de Residuos Sólidos en Rellenos Sanitarios Municipales

- ϕ Niveles Máximos de Contaminantes
- ϕ Necesidades de Impermeabilización
- ϕ Características físicas de los lodos.

Parte 503

Los tres puntos principales del apartado 503 están referidos a las prácticas convenientes para la eliminación de patógenos, concentraciones específicas de metales, y reducción de la atracción de vectores.

Para este propósito, los biosólidos se clasificaron en dos categorías de acuerdo a su grado de tratamiento como calidad excepcional y calidad no-excepcional.

En función del contenido de patógenos, los lodos son clasificados como Clase A o Clase B (En las tablas 2.6 y 2.7 se presentan los límites permisibles de patógenos para los biosólidos clase A y clase B), y describe procesos específicos para reducir los patógenos a estos niveles.

Los biosólidos de la clase A contienen niveles minuciosos de patógenos. Para alcanzar la certificación de la clase A, los biosólidos deben ser sometidos a un proceso de estabilización mediante procesos térmicos, digestión o aumento de

pH, para reducir el contenido de patógenos por debajo de los niveles permisibles.

Los biosólidos de la clase A pueden ser utilizados en actividades relacionadas con contacto humano como en el uso en céspedes y jardines al público

Los biosólidos clase B tienen estándares menos rigurosos en relación con el tratamiento y contenido de bacterias y patógenos. Los requisitos de la clase B aseguran que los patógenos se hayan reducido hasta niveles que protegen la salud pública y el ambiente e incluyen ciertas restricciones para su aplicación en suelos agrícola con diferentes tipos de cultivos, suelos para pastura de animales y para el contacto público.

- **Aplicación de Lodos En Terreno.**
Incluye toda forma de aplicación al terreno para uso benéfico a tasas agronómicas (tasas requeridas para proveer la cantidad de nitrógeno necesaria para los cultivos o vegetación, minimizando la cantidad que pasa más allá de la zona de raíces).
- Establece prácticas de manejo para la aplicación de lodos en suelos, concentraciones límites y tasas de aplicación de químicos, y requerimientos de tratamiento y uso diseñados para controlar y reducir patógenos y vectores.
- **Reducción de Patógenos y Vectores.**
- **Análisis de Riesgo** para identificar compuestos químicos en los biosólidos que presenten mayor riesgo a la salud pública, animales, plantas y organismos del suelo, bajo los escenarios más probables de exposición.

Tabla 2. 6 Criterios Microbiológicos para biosólidos clase A (US EPA/503/5)

PARÁMETRO	CONCENTRACIÓN LÍMITE
COLIFORMES FECALES	< 1000 NMP/g en base seca ST
HUEVOS DE HELMINTOS	1 huevo de helminto/4g en base seca de ST
SALMONELLA SP	3 NMP/ 4g en base seca de ST

Tabla 2. 7 Criterios microbiológicos para biosólidos clase B

PARÁMETRO	CONCENTRACIÓN LÍMITE
COLIFORMES FECALES	Media geométrica de 7 muestras menor o igual a $2 \cdot 10^6$ NMP o UFC/g en base seca de ST
HUEVOS DE HELMINTOS	ND
SALMONELLA SPP	ND

NORMATIVA PARA LODOS EN LA COMUNIDAD ECONÓMICA EUROPEA

Directiva 86/278/CEE

Actualmente no hay legislación de la comunidad de la Comunidad Europea referida específicamente a lodos producidos por el tratamiento de agua potable, pero esta clase de lodos está englobada dentro de los lodos de esta regulación. La Comunidad Europea (CE) promovió en 1986 una directiva relativa a la protección del medio ambiente, en particular de los suelos, en la utilización de lodos de depuradoras aplicados en agricultura. Esta directiva fue modificada en 1991 y en 2003 por la directiva 91/692/CEE y por el reglamento (CE) no. 807/2003.

Tiene como objetivo regular la utilización de los lodos de plantas depuradoras en la agricultura para evitar efectos nocivos en los suelos, la vegetación, los

animales y el ser humano, fomentando al mismo tiempo su correcta utilización.

Entre otras reconoce que:

Los lodos pueden presentar propiedades agronómicas útiles y por consiguiente resulta justificado fomentar su uso en la agricultura, siempre que lo sea correctamente;

La utilización de los lodos de depuradoras no debe perjudicar la calidad de los suelos y de la producción agrícola, debido a que considera:

- Límites para concentraciones de metales pesados en el suelo (cadmio, cobre, níquel, plomo, zinc, mercurio).
- Prohibición de la utilización de los lodos cuando la concentración de dichos metales supere dichos valores límite.
- Evitar que los valores límites se superen a consecuencia de una utilización de lodos: límites en el aporte a los suelos cultivados (límites en los lodos y en las tasas de aplicación).
- Los países miembros han introducido modificaciones a la Directiva 86/278/EEC, particularmente en algunos casos proponiendo límites más exigentes para los metales pesados.
- La Directiva 86/278/EEC no incluye ninguna mención específica a patógenos, aún cuando algunos países han impuesto límites (Francia, Italia, Dinamarca, Austria, Luxemburgo).
- Indica que los lodos deben haber sido sometidos a tratamiento cuando sobrepasa los límites permisibles de metales y patógenos.

2.2.4 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS DE LODOS PROVENIENTES DE PLANTAS POTABILIZADORAS

Los lodos, en tanto que biosólidos, presentan características físicas, químicas y microbiológicas que son necesarios determinar antes de seleccionar su destino, de acuerdo a la NOM-004-SEMARNAT-2002 que establece las especificaciones y los límites máximos permisibles de contaminantes en los lodos y biosólidos provenientes distintas fuentes, entre ellas, las plantas

potabilizadoras, con el fin de posibilitar su aprovechamiento y disposición final y proteger el medio ambiente y la salud humana.

Además, es necesario determinar valores para los parámetros que establecen el espesamiento, acondicionamiento y deshidratación de los lodos de las plantas potabilizadoras, ya que son etapas intermedias esenciales para su transporte y disposición final (Garcés *et al.*, 2000).

2.2.4.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Éstas se han dividido en macropropiedades y micropropiedades. Las pruebas que definen las propiedades del lodo pueden coadyuvar en la selección de un proceso de deshidratación y determinar la relativa facilidad de filtración, además son útiles para precisar las dosis de acondicionamiento requeridas.

Los factores físicos que caracterizan la naturaleza de un lodo son (Degrémont, 2009):

Contenido de Sólidos Totales en base Seca (STS)

Expresado en gramos por litro o en porcentaje en peso y es determinada por secado a 105°C a peso constante. En el caso de lodo líquido es generalmente aproximado al contenido de sólidos suspendidos, determinado por filtración o centrifugación.

$$C_1 = \frac{\text{mg de sólidos secos}}{\text{L de lodo}} = \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Cuando las concentraciones son muy elevadas se puede expresar la relación del peso de sólidos y el peso de la muestra (Malpica, 2002).

$$C_2 = \frac{\text{g de sólidos secos}}{\text{g de lodo}} = \frac{\text{g}}{\text{g}}$$

Contenido de Sólidos Volátiles (Sv)

Expresado en porcentaje en peso del contenido de sólidos totales en base seca. Es determinado por gasificación en un horno en un intervalo de 500-600 °C.

Peso de los Componentes Contenidos (Especialmente en el caso de lodos orgánicos)

C y H para evaluar el grado de estabilización o deducir el valor calorífico neto.

N y P para evaluar el valor agrícola de los lodos.

Otros contenidos (ejemplo: metales pesados) En el caso de lodos inorgánicos, el Fe, Mg, Al, Cr, sales de calcio (carbonatos y sulfatos, y contenidos de sílica son a menudo usuales.

Tipos de humedad

La concentración en materia seca de un lodo “deshidratado”, suele estar alrededor del 20 % (algo mayor si se emplean filtros prensa en la fase final del proceso), es decir que el mayor constituyente de un lodo es agua, siendo esto así, influye en gran medida en la energía necesaria para el secado o deshidratación del lodo y es por esto importante conocer las diversas formas en las que se encuentra ésta.

El grado de humedad de un lodo se divide en dos categorías: humedad libre y humedad ligada. La humedad libre no está asociada con los sólidos que forman los lodos y se elimina fácilmente. La humedad ligada es clasificada en tres tipos: intersticial, superficial y químicamente ligada. La proporción entre la humedad libre y humedad ligada es de suma importancia en la deshidratación de un lodo (Sánchez *et al.*, 2000). La clasificación de la humedad en un lodo se encuentra descrita en la figura 2.4.

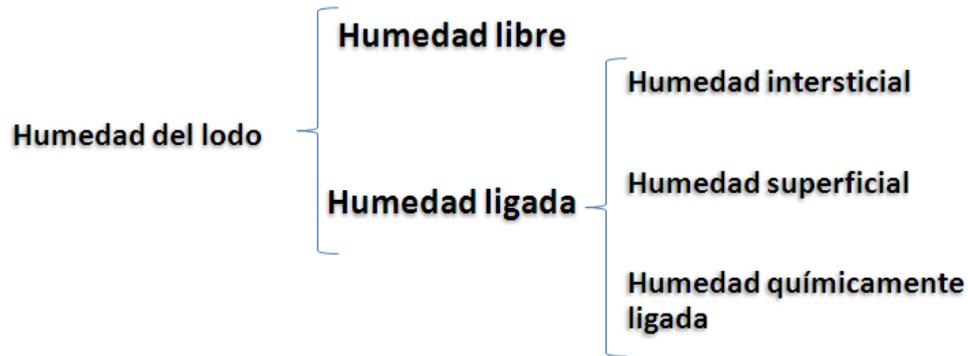


Figura 2. 4 Clasificación de la humedad contenida en un lodo (Sandoval *et al.*, 2000)

Coackley y Allos (1962) estudiaron mediante curvas termogravimétricas las características de secado de algunos lodos. Las curvas muestran que la pérdida de agua (manifestada como pérdida de peso de la muestra de lodo) durante el secado térmico sigue tres etapas: una primera etapa en la que la velocidad de secado o pérdida de agua es constante y dos etapas siguientes en las que las velocidades de secado disminuyen, como se muestra en la Figura 2.5 (Sánchez *et al.*, 2000).

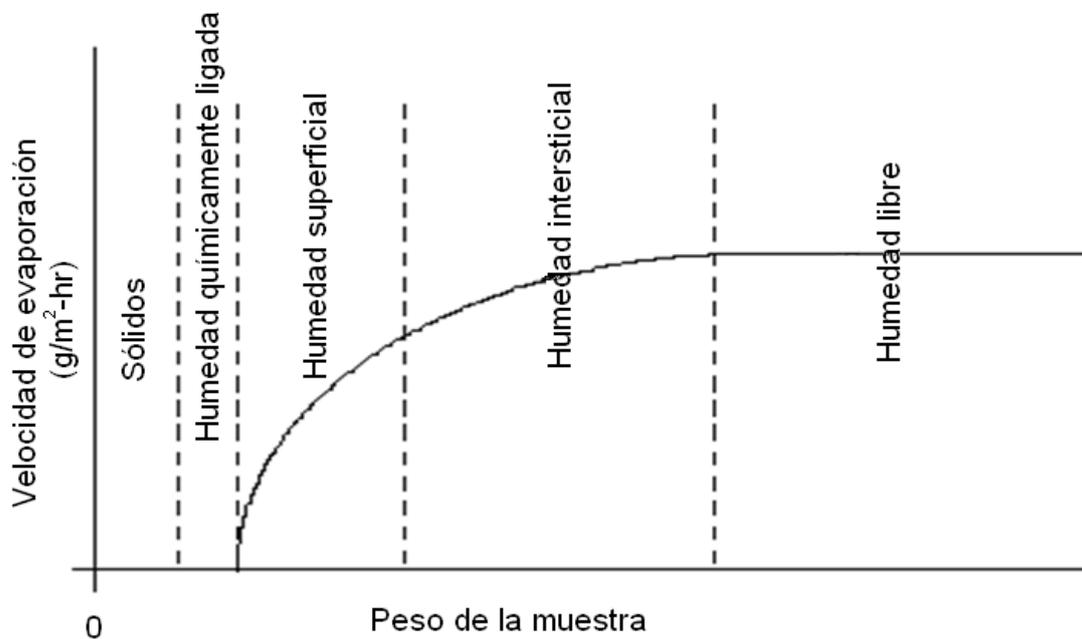


Figura 2. 5 Curva termogravimétrica mostrando los diferentes tipos de humedad de un lodo (Sánchez *et al.*, 2000).

La humedad libre, constituye la mayor parte del lodo y termodinámicamente se comporta como agua pura (en la curva anterior es la representada en el periodo de deshidratación a velocidad constante), puede ser removida por espesamiento o acondicionamiento (Sánchez *et al.*, 2000).

La humedad ligada, representa una pequeña proporción del agua contenida en un lodo (menos de la tercera parte), no obstante su masa es mayor que la de la parte sólida del lodo, la humedad ligada no se comporta como agua pura (Sánchez *et al.*, 2000).

La humedad intersticial es la que se remueve en el primer periodo de disminución de la velocidad de secado. Esta humedad está ligada dentro de la estructura del flóculo por tensión superficial, pasando a humedad libre, la cual se destruye. Este tipo de humedad se remueve por compactación y deformación de los flóculos (Sánchez *et al.*, 2000).

La humedad superficial se remueve en el segundo periodo de disminución de la velocidad de secado; el agua está ligada a la superficie de las partículas por adsorción y puede ser eliminada por deshidratación mecánica. A diferencia de la humedad intersticial, en la cual el agua se puede remover al desaparecer el confinamiento físico que la atrapa, en el caso de la humedad superficial el agua no puede moverse tan fácilmente ya que está adherida a la superficie de la partícula (Sánchez *et al.*, 2000).

La humedad químicamente ligada, está fijada a los sólidos por uniones químicas, siendo necesaria una fuerte energía para su separación, generalmente son utilizados potentes procesos térmicos tales como secado o incineración (Sánchez *et al.*, 2000).

Sandoval *et al.*, (2001) determinaron los contenidos de humedad y sólidos suspendidos totales de lodos formados a partir de sulfato de aluminio, provenientes de la planta potabilizadora “Los Berros”, sistema Cutzamala, Estado de México. Los resultados obtenidos en ese estudio se muestran en la tabla 2.8.

Tabla 2. 8 Resultados de % humedad y sólidos totales de lodos de la planta potabilizadora Los Berros (Sandoval *et al.*, 2001)

SST (g/L)	Humedad libre (%)	Humedad Intersticial (%)	Humedad Superficial (%)	Humedad químicamente ligada (%)
1.175	93.68	6.52	0.67	0.13
2.735	83.81	12.24	3.65	0.30

Generalmente la humedad contenida en los lodos provenientes de plantas potabilizadoras no está asociada a las partículas sólidas e incluye agua que no es afectada por fuerzas de capilaridad, por lo que puede ser eliminada por espesamiento, acondicionamiento o por aplicación de una tensión mecánica frágil.

Por otro lado, los factores que caracterizan el comportamiento de un lodo durante la deshidratación se derivan de las técnicas de deshidratación, tales como: 1) La capacidad para ser espesados, la caracterización de la filtrabilidad medida mediante la Resistencia específica a la Filtración (REF), 2) La compresibilidad de un lodo bajo el efecto de un aumento de presión, 3) La determinación de un máximo de sequedad bajo una presión dada y 4) centrifugabilidad (Sandoval *et al.*, 2002).

Prueba REF

La resistencia específica a la filtración es definida como la resistencia que opone a la filtración una cantidad de lodo depositada en un área de la superficie filtrante. Esta prueba tiene gran utilidad para comparar las características de filtración de distintos lodos provenientes de plantas potabilizadoras y determinar las necesidades de tratamiento para producir una torta que ofrezca mínima resistencia y optimizar el funcionamiento de la deshidratabilidad del lodo.

La prueba consiste en la filtración en laboratorio de un volumen (V) dado de lodo bajo una presión de vacío hasta que la torta es formada y no se puede filtrar más, posteriormente se quiebra como resultado de una caída de presión

(ΔP). Un aparato sencillo de embudo Buchner es el método más utilizado para determinar la REF.

La REF tiene ventajas sobre otras pruebas, una de ellas es la independencia de la concentración de los sólidos en el lodo y otra es la facilidad de aplicación a cualquier tipo de lodo. El cálculo de la REF está dado por la siguiente ecuación:

$$r = \frac{2PA^2b}{\mu c}$$

Donde:

r = Resistencia específica a la filtración (cm/g)

P = Presión de vacío aplicada (dina/cm² = g/cm s²)

A = Área del papel filtro (cm²)

b = Pendiente de la línea (t/V) vs V(s/cm⁶)

μ = Viscosidad del filtrado (poise = g/cm s)

c = Concentración de sólidos totales por volumen de filtrado (g/cm³)

Las variables que afectan al proceso de extracción del agua son:

- 1) La concentración de sólidos del lodo.
- 2) La viscosidad del lodo y del filtrado.
- 3) La compresibilidad del lodo, que está relacionada con la naturaleza de las partículas.
- 4) La composición química y física de las partículas (por ejemplo: pH, alcalinidad, carga superficial y tamaño de partícula).

La REF se ve afectada por el porcentaje de materia coloidal hidrófila en el lodo, la Figura 2.6 muestra relativamente las "zonas" características de lodo fresco y digerido.

La resistencia específica de los lodos es teóricamente independiente de la mayoría de las condiciones de deshidratación, que es característica de la cuestión en sí, independientemente de su concentración.

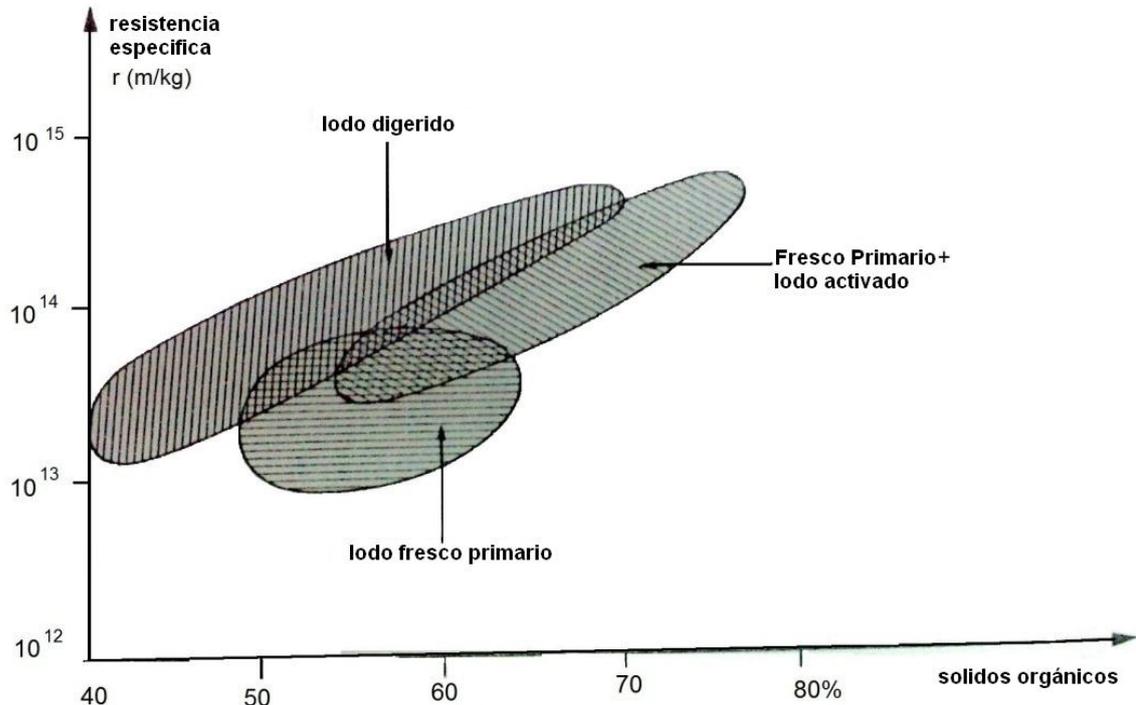


Figura 2. 6 Resistencia específica a la filtración de lodos residuales municipales (Degrémont, 2009)

Lodos con resistencia específica menor a 1×10^{12} m/kg, son considerados de fácil deshidratación, mientras que lodos con resistencia mayor que 10×10^{12} presentan pobres características de deshidratación (Ramírez *et al.*, 2009).

Determinar la dosificación óptima de coagulante a partir del gráfico de resistencia específica a la filtración en función de la dosificación de coagulante. La dosificación óptima corresponde al mínimo de la curva de resistencia específica, como se muestra en la figura 2.7.

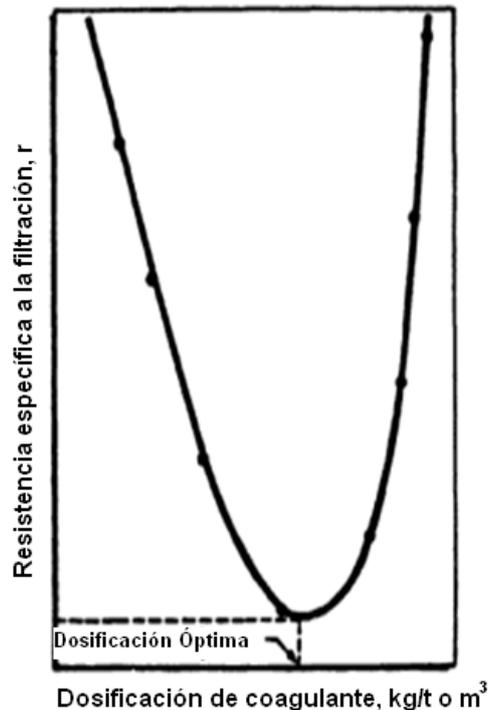


Figura 2. 7 Curva típica para evaluar el efecto de la dosificación de coagulante sobre la resistencia específica (Ramalho Sette *et al.*, 1996).

Estudios realizados por Sandoval *et al.*, (2002) han reportado intervalos de valores de REF para lodo al cual no se aplica ningún espesamiento de $1.0 \cdot 10^{12}$ g/cm a $3.0 \cdot 10^{12}$ g/cm, para lodo acondicionado con polímero de entre $7.0 \cdot 10^{10}$ g/cm a $4.3 \cdot 10^{11}$ g/cm.

2.2.4.2 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

Las características químicas de un lodo pueden dividirse, según el tipo de parámetro analizado en orgánicas e inorgánicas. Entre estas características se pueden mencionar parámetros como pH, materia orgánica (medida como DBO, DQO y COT), contenido de metales pesados y no pesados, además de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo (Espejel, 2007)

Elementos y compuestos inorgánicos

Contenido de Nutrientes

A continuación se presentan algunas de las características químicas de los lodos de manera sintetizada

El lodo puede ser utilizado para mejorar el suelo, porque es muy importante conocer el contenido en nitrógeno, fósforo y potasio para determinar su valor como fertilizantes. El porcentaje de éstos en el lodo, así como la fracción orgánica, es indicativo de su valor como fertilizante (Malpica, 2002).

Los macronutrientes (nitrógeno, fósforo, potasio) y los micronutrientes (hierro, magnesio, cobre, cromo, selenio y zinc) contribuyen al crecimiento de las plantas. Se puede decir que los nutrientes que tienen los biosólidos, sirven como un reemplazo parcial a los caros fertilizantes químicos (Metcalf y Eddy, 2000).

Contenido de metales y metales pesados

Pavón *et al.* (2005) caracterizó dos tipos de lodo (generados de manera separada partir de FeCl_3 y $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, como coagulantes) de acuerdo a los parámetros: contenidos de hierro, aluminio, manganeso, calcio, magnesio, zinc, cobre, níquel, plomo, entre otros parámetros. Para ello se utilizaron dos tipos de lodo, uno extraído de una planta potabilizadora localizada en Ixtapan de la Sal, Estado de México en la que el coagulante utilizado es sulfato de aluminio (25 mg/L) y otro obtenido de la potabilizadora del Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA) ubicada en San Cayetano, Estado de México en la cual se utiliza cloruro férrico (25mg/L).

Finalmente, dicho estudio determinó que no existe presencia de metales pesados superiores a los marcados en la NOM-004-SEMARNAT-2002, por lo tanto los lodos no significan un riesgo hacia el ambiente por su contenido en metales como arsénico, cadmio, cromo, mercurio, níquel, plomo y zinc, pero en la cuantificación de aluminio y hierro los valores son muy altos y por lo tanto esto si puede representar un daño a los ecosistemas. Dichos resultados se presentan en la tabla 2.9.

Tabla 2. 9 Contenido de metales de dos lodos provenientes de plantas potabilizadoras y su comparación con los límites máximos de metales establecidos por la Norma oficial mexicana correspondiente (Pavón *et al.*, 2005).

Metal	Lodo con Al	Lodo con Fe	NOM-004-SEMARNAT-2002	
	mg/kg en base seca		mg/kg en base seca	
			Bueno	Excelente
Arsénico	0.025 ± 0.002	<0.0015	75	41
Cadmio	0.059 ± 0.001	0.724 ± 0.002	85	39
Cromo	0.463 ± 0.021	0.082 ± 0.010	3000	1200
Cobre	1.5 ± 0.2	3.2 ± 0.3	4300	1500
Plomo	50±12	184 ± 15	840	300
Mercurio	0.0075±0.0002	0.009 ± 0.0004	57	17
Níquel	102±32	45 ± 14	420	420
Zinc	76±5	29 ± 1	7500	2800
Aluminio	19,600 ± 30	400 ± 23	NA	NA
Hierro	317.5 ± 1.2	37,000 ± 62	NA	NA
Manganeso	760 ± 13	470 ± 11	NA	NA
Calcio	3,190 ± 20	2,780 ± 32	NA	NA
Magnesio	2,180 ± 10	2,190 ± 12	NA	NA

NA: No Aplica

Características microbiológicas

Las características microbiológicas son aquellas debidas a microorganismos nocivos a la salud humana. Los parámetros microbiológicos que se encuentran regulados para el aprovechamiento de lodos y biosólidos son básicamente coliformes fecales, Salmonella y huevos de helmintos. La NOM-004-DEMARNAT-2002 define estos parámetros, establece los límites máximos permisibles y las técnicas para la cuantificación de patógenos y parásitos en sólidos y biosólidos. La caracterización microbiológica de los lodos dependerá de la composición del agua tratada y de la eficacia de remoción de los diferentes procesos de tratamiento (Espejel, 2007).

Microorganismos Indicadores

Microorganismos Patógenos

Los patógenos en lodos presentan un riesgo a la salud humana ya que si los lodos son mal manejados, los lixiviados contienen microorganismos patógenos que pueden alcanzar los mantos freáticos. Otra forma de contaminación podría ser a través de cuerpos que alcancen organismos receptores de agua que abastecen poblaciones. Cuando el lodo es aplicado a suelo agrícola existe el riesgo potencial de que permanezcan adheridos en algunos tejidos vegetales que sean consumidos crudos. Existen cuatro grupos básicos de patógenos: Virus, bacterias, protozoarios, helmintos parásitos (Malpica, 2002).

Bacterias Patógenas

Dos bacterias son las de mayor importancia en lodos, las especies de Salmonella y la bacteria patógena oportunista *Pseudomas aeruginosa*, aunque de acuerdo a la NOM-004-SEMARNAT-2002 aplicable a lodos en México solamente se considera la primera de estas bacterias.

Ramírez *et al.* (2005) presenta dentro de una caracterización completa realizada a los lodos generados en la planta potabilizadora “Los Berros, los contenidos de parámetros microbiológicos que se muestran en la tabla 2.10.

Tabla 2. 10 Características de los lodos generados y almacenados de la planta potabilizadora “Los Berros”, Sistema Cutzamala, junio 2005 (Parcialmente reproducido de Ramírez *et al.*, 2005).

Parámetro	Lodos de sedimentadores y espesadores	Lodos de tarquinas y presa de lodos
FÍSICOQUÍMICOS		
Humedad (%)	95.96 ± 3.17	86.18 ± 2.43
METALES		
Aluminio (mg/kg)	82,336.33 ± 6391.29	88,392.22 ± 5039.32
Fierro (mg/kg)	142.17 ± 31.45	194.33 ± 22.68
Manganeso (mg/kg)	40.58 ± 14.10	17.15 ± 2.20
Calcio (mg/kg)	22.83 ± 13.36	5.81 ± 6.37
Magnesio (mg/kg)	106.18 ± 29.96	177.94 ± 212.47
Potasio (mg/kg)	278.00 ± 63.36	372.89 ± 52.29
Sodio (mg/kg)	314.53 ± 86.26	222.09 ± 42.64
MICROBIOLÓGICOS		
Coliformes fecales (NMP/g)	28,400.00 ± 45981.52	3,666.67 ± 1802.78
Salmonella (NMP/g)	23.00	416.67 ± 515.06
Huevos de helminto (HH/2g)	0.60 ± 0.89	3.44 ± 1.01

De acuerdo a los datos reportados por Ramírez *et al.* (2005) y aplicando la NOM-004- SEMARNAT-2002, los lodos provenientes de la planta potabilizadora “Los Berros” podrían ser clasificados como clase C en cuanto a límites máximos permisibles para patógenos y parásitos por lo que solamente podrían ser aprovechados en usos forestales, mejoramientos de suelos y usos agrícolas.

Toxicidad

Castañeda (1998) evaluó de manera particular la toxicidad de los lodos que genera la planta potabilizadora “Los Berros” utilizando tres metodologías: prueba de toxicidad aguda con *Daphnia magna* (pulga de agua), prueba de toxicidad crónica con *Panagrellus redivivus* (nemátodo de sedimento) y prueba de toxicidad sobre la elongación de raíz con *Lactuca sativa* (Lechuga romana), sus resultados señalan que los lodos generados por la planta potabilizadora presentan una toxicidad baja.

2.2.5 TRATAMIENTO, DISPOSICIÓN Y APROVECHAMIENTO DE LODOS

2.2.5.1 TRENES DE TRATAMIENTO DE LODOS

Todos los lodos requieren algún tipo de acondicionamiento o espesamiento, deshidratación y estabilización o incineración, o la combinación de uno o varios de estos procesos, antes de ser vertidos en el ambiente (Sandoval *et al.*, 2002).

El objetivo principal en el tratamiento de los lodos de plantas potabilizadoras es producir un lodo con una concentración de sólidos que pueda facilitar su manejo y disposición. Para reducir el volumen total de lodos a disponer se puede aplicar alguna de las siguientes alternativas (Sandoval *et al.*, 2002):

- Acondicionamiento químico.
- Tanques de espesamiento.
- Deshidratación.
- Lechos de Secado
- Lagunas.
- Filtros prensa.
- Filtros a vacío.

- Centrifugación.

La práctica usual de las plantas potabilizadoras que tratan las aguas superficiales, por medio de los procesos de coagulación-floculación-sedimentación y filtración, es remover los lodos acumulados en los sedimentadores y en los filtros descargándolos directamente a cursos superficiales (Garcés *et al.*, 2000).

La recuperación del agua utilizada en el lavado de los filtros aumenta la cantidad de agua producida y disminuye, significativamente, el volumen de los lodos a tratar (Garcés *et al.*, 2000).

Estos lodos tienen un gran volumen, el cual está compuesto principalmente por agua, y son tixotrópicos, es decir, tienen características gelatinosas en reposo pero líquidas en movimiento.

Además, son compresibles y resistentes al espesamiento y deshidratación, especialmente aquellos generados con aguas de baja turbiedad (Garcés *et al.*, 2000).

Su DBO varía entre 30 y 300 mg/L, su DQO entre 30 y 5.000 mg/L y la razón DQO/DBO es del orden de 15:1, indicando una baja proporción de materia orgánica biodegradable. La fracción de sólidos volátiles es alrededor del 30% de los sólidos totales. La remoción del lodo puede ser manual (intermitente) o mecanizada (continua), con accionamiento manual o automático (Garcés *et al.*, 2000).

El manejo de los lodos provenientes de las plantas potabilizadoras convencionales considera, típicamente, cinco etapas, las cuales se ilustran en la figura 2.8.

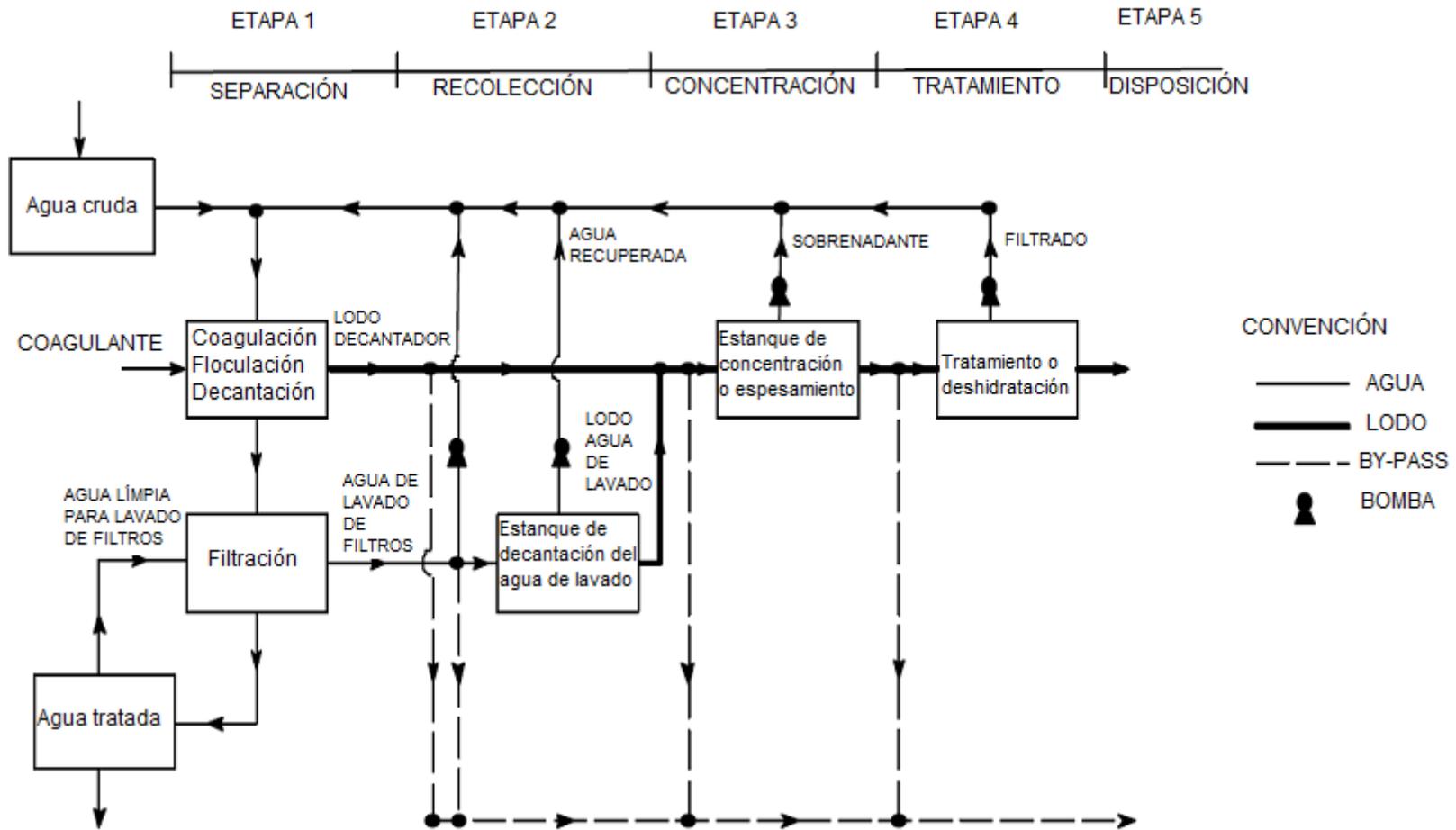


Figura 2. 8 Etapas básicas para el manejo de desechos en las plantas potabilizadoras (Garcés, 2000).

El mejor método de tratamiento para un lodo puede variar de acuerdo a la cantidad de lodo residual disponible, a su velocidad de fermentación y secado de los lodos y a factores económicos (costo de la tierra, mano de obra, energía, reactivos, la amortización de la inversión, necesidades de salud, etc.). Sin embargo, los objetivos finales serán los mismos en todos los casos (Degrémont, 2009):

La Figura 2.9 muestra los trenes de tratamiento más usuales para lodos (Degrémont, 2009).

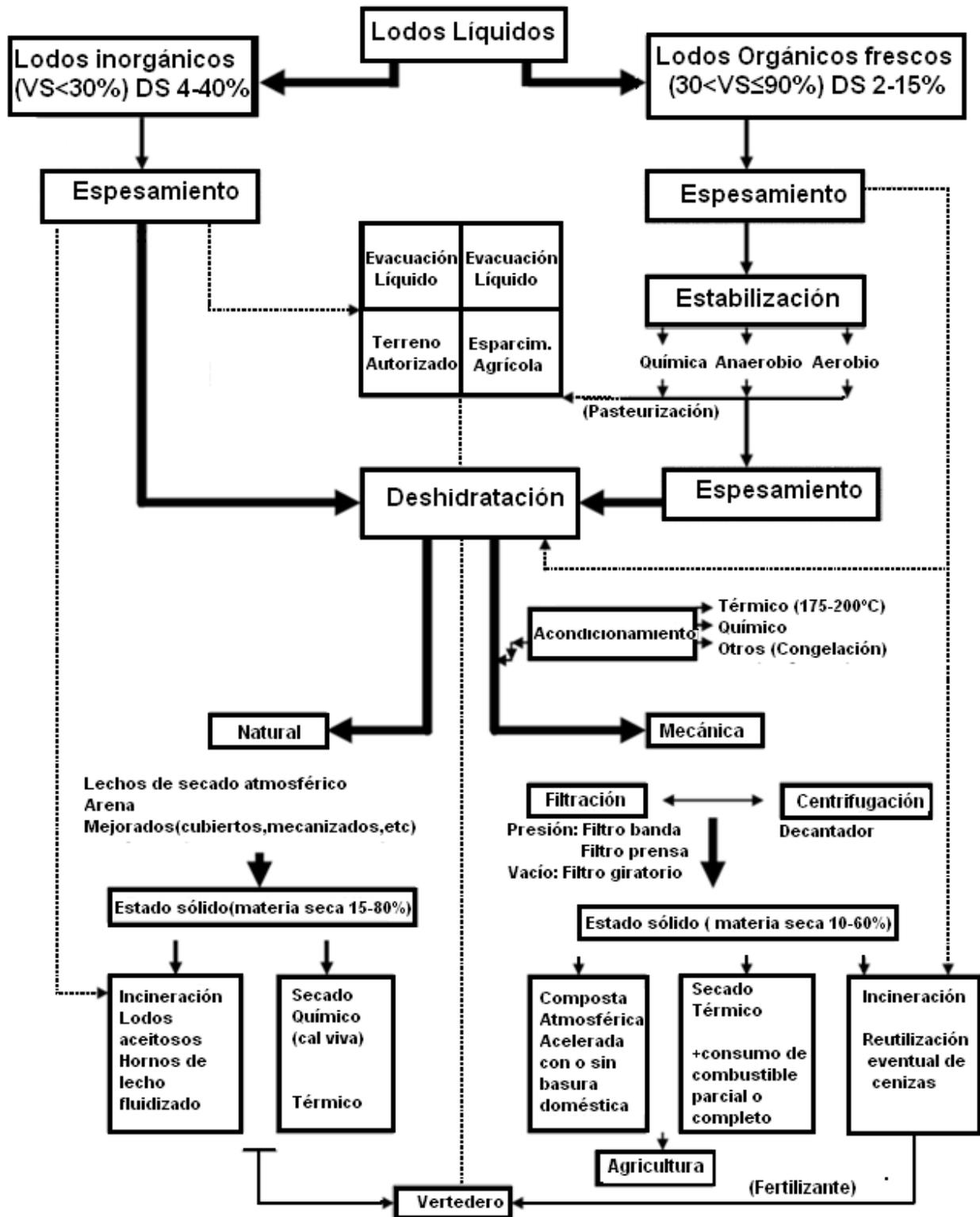


Figura 2. 9 Trenes más comunes de tratamiento de lodos (Degrémont, 2009).

Mezcla

Los lodos que se originan en las plantas potabilizadoras, se colectan a través de las purgas de los decantadores, donde generalmente precipitan por gravedad, y en el lavado de los filtros.

Dado que estos lodos se extraen de forma intermitente y las concentraciones son bastante diferentes, es aconsejable enviarlos a un depósito de mezcla y almacenamiento, donde se homogenice la concentración y a la vez se disponga de un volumen tal, que permita el funcionamiento continuado de la planta de lodos.

Hay que tener en cuenta que si las concentraciones de sólidos totales (expresadas en % de materia seca) que llegan a las fases de espesamiento de la planta de lodos son muy variables, el rendimiento de ésta se verá muy afectado, siendo por tanto muy favorable la mezcla previa en el depósito de homogeneización de las aguas de lavado de filtros y purgas de decantadores, programando ambos caudales a fin de obtener una concentración de la mezcla lo más constante posible.

Reducción de volumen

Esto puede lograrse ya sea por un simple espesamiento (cuando el producto puede alcanzar el 10% o incluso el 20% en casos muy excepcionales de grado de sequedad, pero no lo suficiente como para ser seco eliminado con pala) o por deshidratación, por desagüe natural, por medios mecánicos o por calentamiento o, por último, por incineración.

a) Acondicionamiento químico (Espesamiento)

Antes de proceder a la eliminación, o estabilización de los lodos que se han separado del agua es conveniente (rentable) proceder al espesamiento de los lodos; lo que permite reducir al mínimo el volumen para facilitar su manejo, transporte y almacenamiento.

El acondicionamiento de lodos se refiere a un conjunto de operaciones biológicas, químicas y físicas encaminadas a variar su volumen y obtener un producto que sea aprovechable o fácilmente eliminable (Bautista, 2004).

En la práctica, una energía floculante adicional es necesaria para modificar las fuerzas cohesivas internas del lodo, para “romper” la estabilidad coloidal y para aumentar artificialmente el tamaño de las partículas. En el caso de lodos hidrofílicos, parte de la humedad ligada debe ser liberada y se transforma en agua libre.

El lodo obtenido, para poder “palearse”, es necesaria que sufra una deshidratación adicional. El acondicionamiento es esencial para preparar el lodo para varios equipos. Es muy común encontrar dificultades en los procesos usados para la reducción de líquido en el lodo. Estas dificultades están estrechamente relacionadas con la materia coloidal hidrofílica (o a veces hidrofóbica) o suspensiones de lodos que son principalmente formadas.

De los distintos procesos, el tratamiento térmico es por mucho el más eficaz en la reducción de partículas hidrofílicas; la floculación química, cuando hace uso de electrolitos minerales, y sobre todo cal, también reduce el agua ligada, pero en menor medida.

El acondicionamiento, que está destinado a hacer los lodos drenables, filtrables o centrifugables, usa procesos físicos, térmicos o químicos o una combinación de ambos. El acondicionamiento adecuado del lodo es la base de una operación eficiente en una planta de deshidratación.

El acondicionamiento de lodos provenientes de plantas potabilizadoras sólo se aplica a lodos de hidróxidos y desechos de retrolavado de filtros, cuyo objetivo es remover el agua, aumentar la compresibilidad y minimizar el atascamiento en la operación de los filtros prensa. Cuando el acondicionamiento se usa para separar agua y sólidos, los polielectrolitos son los elementos más empleados (Sandoval *et al.*, 2001).

b) Deshidratación

Es una de las etapas más importantes debido a que permite disminuir significativamente el costo de disposición al reducir considerablemente el volumen de lodos que se debe manejar. Esta fase consiste en separar una gran parte del agua que contienen los lodos, los principales procesos de deshidratación son la filtración a presión o la centrifugación.

Los métodos más comunes utilizados para la deshidratación de los lodos de las plantas potabilizadoras se clasifican de la siguiente forma (Garcés *et al.*, 2000):

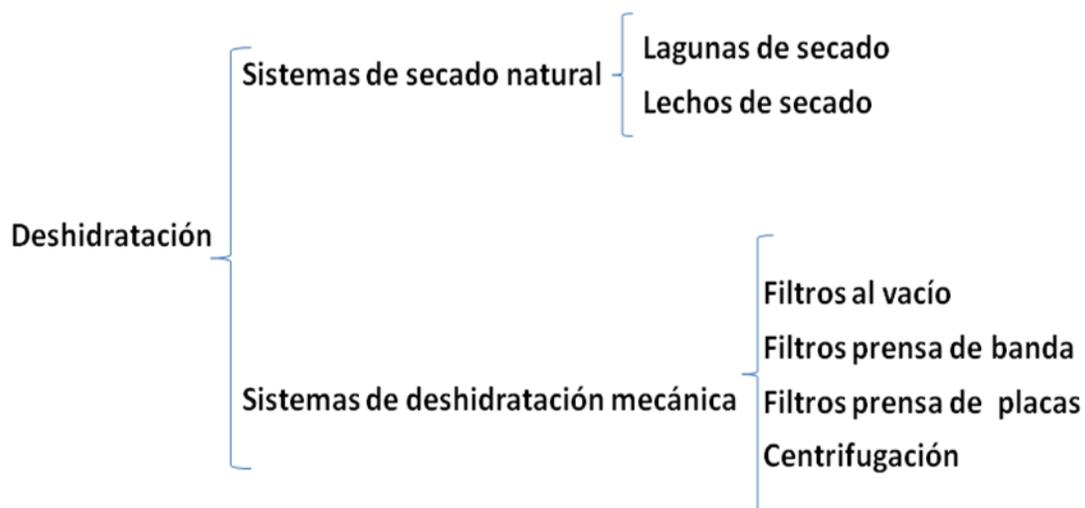


Figura 2. 10 Clasificación de métodos de deshidratación de lodos

Estos métodos se explican más ampliamente en el anexo F.

Estabilización Biológica

Consiste en reducir su actividad biológica (tendencia a la putrefacción) y su contenido de microorganismos causantes de enfermedades, puede lograrse por: digestión anaerobia, estabilización aerobia, estabilización química, pasteurización, calentamiento e incineración como etapa final (Garcés *et al.*, 2000).

El tratamiento de lodos provenientes de plantas potabilizadoras es más simple que sus similares de aguas residuales debido al menor contenido de materia orgánica degradable, lo cual, generalmente, elimina una etapa de estabilización biológica (Garcés *et al.*, 2000).

2.2.5.2 DISPOSICIÓN Y APROVECHAMIENTO DE LODOS

Los lodos provenientes de plantas potabilizadoras que cumplan con los parámetros establecidos en la norma NOM 0004-SEMARNAT-2002, podrán ser clasificados como residuos no peligrosos para su aprovechamiento y disposición final, pueden considerarse para su destino final los vertederos controlados o el relleno de terrenos (Cerón, 2006).

El mayor costo en la gestión de estos lodos, es su transporte y vertido.

El agua clarificada del proceso de tratamiento de lodos puede ser recuperada y enviada al inicio del tren de tratamiento en la planta potabilizadora (Garcés *et al.*, 2000).

Algunos lodos, dado su elevado contenido en arcillas, podrían emplearse en la fabricación de determinados productos cerámicos, tales como ladrillos, bases para baldosas y azulejos, etc., siempre que el contenido en materia orgánica sea bajo. Algunos estudios mencionan la tendencia de distintos países para aprovechar los lodos provenientes de plantas de tratamiento de agua como son la fabricación de cerámicos, cemento y ladrillos (Espejel, 2007; Cerón, 2006).

Disposición

La práctica usual de las plantas potabilizadoras que tratan las aguas superficiales en México, por medio de los procesos de coagulación-floculación sedimentación y filtración, es remover los lodos acumulados en los sedimentadores y en los filtros, descargándolos directamente a cursos superficiales (Garcés, 2000).

La disposición final del lodo del tratamiento de agua se realiza mediante dos métodos:

1. Relleno sanitario.
2. Aplicación en suelo.

La determinación del tipo de método de disposición usado va a depender de las características de los lodos, la legislación aplicable y los costos (Ramírez *et al.*, 2005).

En general, los gastos de transporte suponen un porcentaje importante de los costos totales de explotación, (cerca a 1/3 del total).

Costos de disposición de lodos

El espesamiento de lodos, tienen sus desventajas, al añadir costos adicionales tratándose de un proceso de separación mecánica, sin embargo estos costos son compensados al minimizar los costos de transportación de éstos.

La figura 2.11 muestra las comparaciones de los costos en el intervalo de 3% (lodo no espesado) a 8% de lodo seco, para viajes de 100km y 200km y rendimientos de 150 y 300 toneladas de lodo seco por día.

Dicha figura contiene una actualización a enero del 2009 de los datos presentados por Gaither, *et al.*, (1984).

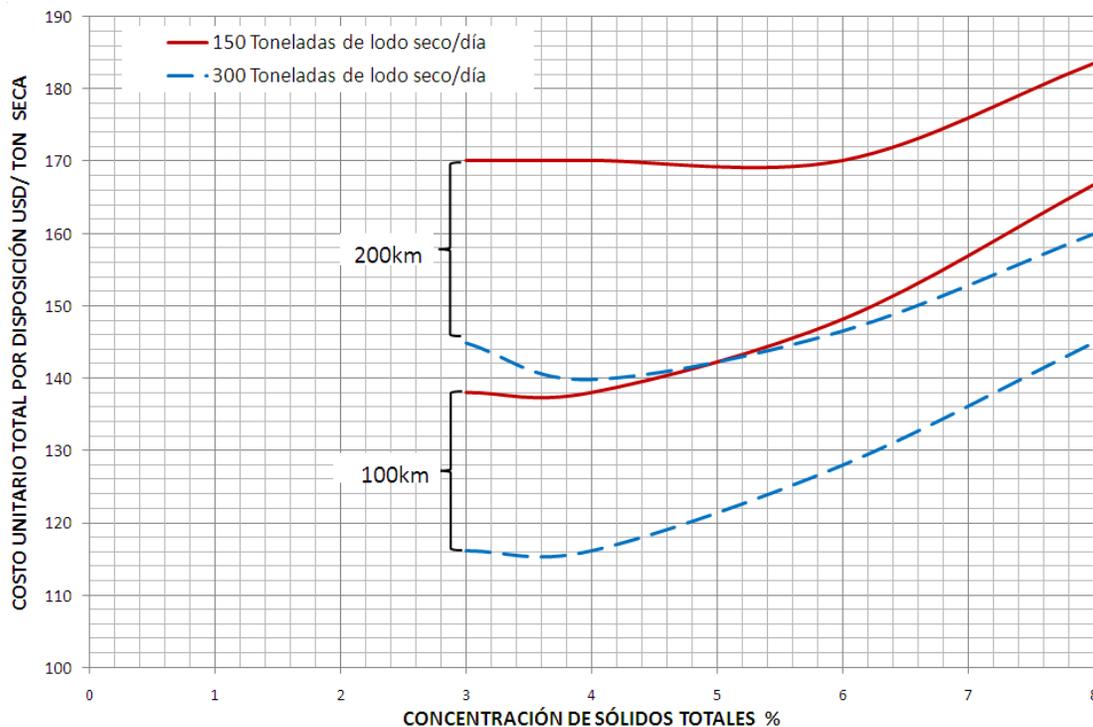


Figura 2. 11 Efecto de la concentración total de sólidos en costos totales de disposición. El espesamiento de lodos está incluido en el costo total unitario (Gaither *et al.*, 1984, actualizada a 2009, Sinnott, *et al.*, 2005; CEPCI obtenidos de <http://www.che.com/pci/>).

Sin embargo, la figura 2.11 es meramente ilustrativa, ya que los costos serán influidos por muchos factores específicos en cada sitio, tales como la construcción, los gastos de funcionamiento y las propiedades físicas y químicas de los lodos, por lo cual los costos pueden variar notablemente de un sitio a otro.

Aprovechamiento de lodos

El aprovechamiento de los lodos implica su uso en cualquier actividad que represente un beneficio. El uso de lodos como mejoradores o acondicionadores de los suelos aplicados a terrenos agrícolas es una alternativa que ha tomado gran importancia en las últimas dos décadas. Sin embargo, los lodos de plantas potabilizadoras contienen altas concentraciones de aluminio el cual tiene la propiedad de fijar el fósforo en el suelo, evitando que sea aprovechado por las

plantas y ocasionando disminución en la producción agrícola, por lo que no es considerada como una opción viable para suelos agrícolas (Ramírez *et al.*, 2005).

Se han abierto líneas de investigación enfocadas a la reutilización de los lodos con altas concentraciones de aluminio aprovechando sus propiedades y características para ser incorporado como materia prima en la manufactura de diferentes materiales o para su aplicación en suelos forestales. Las alternativas que principalmente se mencionan son (Ramírez *et al.*, 2005).

- a) Envío de los lodos a disposición controlada después de su deshidratación (60-70% de humedad).
- b) Reutilización de los lodos como mejoradores o acondicionadores de suelo agrícola.
- c) Reutilización de los lodos para la fabricación de material cerámico de construcción (ladrillos), aplicando el proceso de elaboración convencional (mezcla, extrusión, conformado, secado y cocción).
- d) Reutilización de los lodos como agentes floculantes en el tratamiento de aguas residuales, para aprovechar su alto contenido en aluminio.
- e) Reutilización de los lodos para la producción de concretos y morteros.
- f) Reutilización de los lodos con alto contenido de alúmina para producir materiales adsorbentes o bases de soporte para catalizadores.

Tendencias de aprovechamiento en diferentes países

En la actualidad se han encontrado gran variedad de aplicaciones para el aprovechamiento de lodos provenientes de diferentes fuentes. Particularmente, para el caso de los lodos de las plantas de tratamiento de agua se ha observado que, con base en las necesidades de cada lugar, se sigue una tendencia hacia una línea de investigación en particular (Ramírez *et al.*, 2005). A continuación se presentan una descripción de los estudios analizados por Ramírez *et al.*, (2005).

Por ejemplo, en países europeos como Reino Unido, España y Portugal se han reportado casos de reutilización de los lodos producidos en plantas potabilizadoras

para producir básicamente materiales cerámicos, cemento y ladrillos. Estas técnicas incluyen el uso del lodo deshidratado, secado y en algunos casos de lodo incinerado. Aunque en países europeos como Francia se consideran como principales opciones la aplicación en suelos forestales y con mezclas de lodos biológicos en suelos agrícolas. (Adler, 2002). En otros países europeos como Alemania y los Países Bajos se realizan investigaciones para la aplicación de los lodos en el tratamiento de aguas residuales, incluyendo la supresión de la formación del sulfuro del hidrógeno y la remoción de fosfatos de la solución.

En Estados Unidos y Canadá los estudios se han enfocado en mayor grado a la recuperación de metales de los lodos y a la aplicación de lodos deshidratados como mejoradores de suelo en zonas agrícolas y para restauración de áreas erosionadas (Dayton y Basta, 2001, Meunier *et al.* 2002 y MENV, 2003). Los métodos potenciales para reducir el volumen de lodos producidos incluyen la adopción de las técnicas tales como filtración de membrana que evitan adición de coagulantes químicos (Ramírez *et al.*, 2005).

En Australia occidental, los lodos producidos en las plantas de potabilización de agua son aplicados en suelos forestales como brechas corta-fuego. El aluminio del lodo no permite el crecimiento de hierbas indeseadas que a la larga pudieran contribuir a propagar los incendios forestales (water-corporation).

En Japón se ha estudiado la efectividad de recircular el lodo de las plantas potabilizadoras que utilizan policloruro de aluminio (PAC) como coagulante, mediante un proceso térmico y activación con ácido clorhídrico con la finalidad de recuperar el PAC y reutilizarlo en la coagulación (Ebie *et al.* 2000).

2.3 GENERALIDADES DEL ACONDICIONAMIENTO QUÍMICO-ESPEZAMIENTO DE LODOS

2.3.1 TIPOS DE PROCESOS DE ESPEZAMIENTO

El lodo de plantas potabilizadoras requiere de algún tipo de acondicionamiento químico para producir una efectiva separación líquido / sólido. Los polielectrolitos son eficientes como acondicionadores químicos. Los polielectrolitos tienen dos funciones en el acondicionamiento del lodo para deshidratación. La primera es desestabilizar las cargas de las partículas sólidas, para favorecer la aglomeración. La segunda función es aglomerar esas partículas en flocs, por medio de mecanismos de adsorción y formación de puentes entre las partículas y el polielectrolito (Escobar, 2002).

Por fenómenos de coagulación o floculación, el acondicionamiento químico de lodos conduce a la aglomeración de las partículas en forma de sistemas tridimensionales o "floc". Agentes floculantes orgánicos e inorgánicos son usados. Cada uno de ellos tiene características propias y especiales, especialmente en lo que se refiere a la disminución de partículas hidrofílicas, principalmente observadas en la presencia de cal y el tamaño de los floc formados (voluminosos con polielectrolitos).

Los reactivos inorgánicos parecen ser más viables para el secado por filtración al vacío y reactivos orgánicos para secado por centrifugación o por filtros prensa.

El espesamiento es la primera y más simple etapa en la reducción de volumen de un lodo, tiene lugar generalmente en decantadores, ya sea por gravedad o por flotación, el espesamiento por flotación asegura una mayor producción que el espesamiento por gravedad, pero requiere un mayor consumo de energía.

Espesamiento por gravedad

Suele realizarse en decantadores estáticos circulares o rectangulares provistos de rasquetas que arrastran el lodo precipitado hacia las arquetas de recogida y el agua decantada clarificada se extrae por los vertederos situados en la parte superior. A veces, los decantadores por gravedad pueden disponer de lamelas que al aumentar la superficie de decantación permiten reducir el volumen del decantador, obteniendo los mismos o mejores resultados en el espesamiento.

Espesamiento por flotación

El espesamiento por flotación, aprovecha la flotabilidad de las partículas (flóculos) cuando se les adhieren pequeñas burbujas de aire. Para la adherencia de estas burbujas de aire, basta con presurizar directamente la mezcla de lodos con aire, a una presión de 6 bares y descomprimir después a la entrada del flotador o también se puede presurizar directamente agua clarificada que se inyecta después en el propio lodo. El lodo flotado y espesado es retirado de la superficie mediante rastras superficiales. El espesamiento del lodo, fundamentalmente en la flotación, se ve favorecido mediante el empleo del poli electrolito adecuado. La Figura 2.12 ilustra el proceso de espesamiento antes descrito

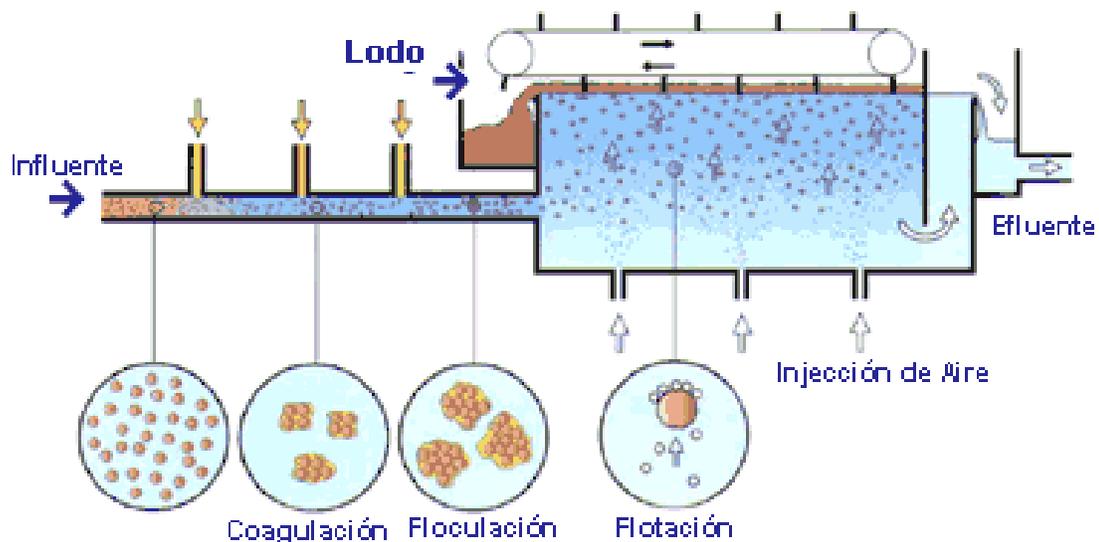


Figura 2. 12 Esquema ilustrativo del Espesamiento de lodos por flotación con aire disuelto (http://potablewater.iespana.es/tratamiento_de_lodos.htm).

La concentración de sólidos suspendidos totales (SST) del lodo en base seca, después de esta fase de espesamiento, suele estar en el intervalo del 3 - 4 % (30 - 40 g/L).

La concentración de SST del lodo, dependerá tanto del origen de éstos o los procesos de producción (purga de decantadores, lavado de filtros), de los reactivos y dosis de coagulación-floculación empleados y del tipo de equipo utilizado en los procesos de producción de los lodos.

2.3.2 EQUIPOS Y TIEMPOS DE ESPESAMIENTO

Aunque ciertos tipos de lodos pueden flocular en 1 ó 2 minutos con un muy buen equipo de mezclado y bajo ciertas condiciones de flujo, generalmente es preferible el uso de tanques de floculación en los cuales el lodo permanece de 5 a 10 minutos con el fin de que el flóculo se desarrolle de manera adecuada.

Estos tanques generalmente tienen dos compartimentos, uno para la sal metálica y el otro para la cal (Degrémont, 2009). Es importante aplicar tiempos totales de retención hidráulica en los espesadores de 15 a 30 minutos para que el lodo madure. Los agentes deben ser mezclados completamente con el lodo, y su difusión debe ser total.

Para evitar la destrucción de los flóculos formados, el transporte del lodo floculado debe ser limitado a cortas distancias por gravedad, o sólo necesariamente por desplazamiento lento con bombas (pistón-membrana) o por presión neumática intermitente (Degrémont, 2009).

2.3.3 VENTAJAS DEL ESPESAMIENTO DE LODOS

El espesamiento genera la ventaja de reducir el volumen de lodos de manera sustancial. En la figura 2.13 se ilustra que un lodo con 1% de sólidos que puede ser espesado hasta el 5%, permite obtener un 80% de reducción de volumen (tamaño 5%= 1/20). Una concentración de 20% de sólidos, la cual podría ser alcanzada por deshidratación mecánica, resulta en un 95% de reducción de

volumen, lo cual se traducirá en reducción de costos de almacenamiento, tratamiento y disposición (Jeffrey *et al.*, 1997).

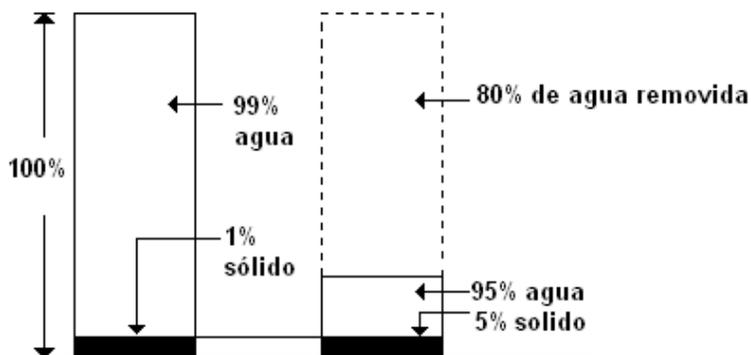


Figura 2. 13 Reducción de Volumen debida al espesamiento de lodos (Jeffrey *et al.*, 1997)

El espesamiento de lodos tiene importantes ventajas (Ramírez *et al.*, 2005):

- La reducción del volumen reduce los costos del bombeo de lodo y del área para la disposición final.
- Reduce los costos de acondicionadores químicos que deberían ser adicionados previo al desaguado del lodo, debido a la mayor concentración de sólidos.
- Amortigua las fluctuaciones de flujo y concentración de lodo.
- Muchas veces reduce los costos generales de tratamiento, tanto en el tamaño físico de las unidades, en la mano de obra y en el gasto de energía.

2.3.4 REACTIVOS UTILIZADOS PARA EL ESPESAMIENTO DE LODOS

2.3.4.1 AGENTES ORGÁNICOS UTILIZADOS EN EL ACONDICIONAMIENTO QUÍMICO DE LODOS-POLIELECTROLITOS

Para acondicionar lodos, lo más frecuente es emplear polielectrolitos, los cuales varían en composición estructural, peso molecular y densidad de carga. La adición de polielectrolitos es útil para espesamiento y en la deshidratación de lodos químicos en lagunas de secado, lechos de secado de arena, filtración a presión, filtración a vacío, filtros banda y centrifugación (Degrémont, 2009).

Tipos de polielectrolitos utilizados como espesantes de lodos

Los polielectrolitos se dividen en naturales y sintéticos según su origen. Según el signo de la carga en el momento de introducirlos en agua (negativo, positivo o neutro) se les clasifica en polielectrolitos aniónicos, catiónicos, y no iónicos respectivamente.

Polielectrolitos catiónicos

Estos polielectrolitos poseen una carga positiva, actúan como neutralizantes disminuyendo la carga de las partículas. Puesto que las partículas del agua residual están cargadas negativamente, se emplean polielectrolitos catiónicos, los que son considerados coagulantes primarios en esta aplicación (Metcalf y Eddy, 2000).

Otro tipo de mecanismo puede ser la de coagulación-formación de puentes, que resulta al emplear polielectrolitos catiónicos de alto peso molecular.

Floculantes catiónicos reticulados cuya principal aplicación es la deshidratación de lodos. Su reticulación permite formar un flóculo muy resistente capaz de soportar centrífugas de alta velocidad, mientras que su menor peso molecular disminuye la colmatación de los filtros de prensa.

Durante la floculación de un lodo pueden producirse problemas debido a adsorción secundaria sobre la misma partícula, ruptura del flóculo por tensiones cortantes o exceso de dosis de polielectrolito, lo que produce reestabilización. Por lo anterior es necesario *determinar la dosis óptima del polielectrolito*, que dependerá de la naturaleza y composición del lodo, del tipo y proceso a que se sometan los flóculos y del polielectrolito utilizado.

Los polielectrolitos catiónicos tienen dos propiedades importantes y casi únicas. En primer lugar, se absorben sobre sustratos cargados negativamente, y en

segundo lugar muchos de ellos tienen propiedades bactericidas. Aunque el flóculo es más pequeño y la sedimentación más lenta, cuando se utilizan conjuntamente con coagulantes metálicos tienen las siguientes ventajas: reducción en la dosificación de coagulante, atenuación de la interferencia que sobre la coagulación tienen ciertas sustancias y capacidad de flocular organismos vivos, tales como algas y bacterias.

Para la mayoría de los polielectrolitos catiónicos, la densidad de carga es cercana al 100%, pero el peso molecular es generalmente más bajo que el de los polielectrolitos aniónicos o el de los no-iónicos. (Sandoval *et al.*, 2001)

Polielectrolitos aniónicos

Poseen carga negativa al ser introducidos en un medio acuoso, actúan mediante la formación de puentes de unión entre las partículas, se adhieren a un número de puntos de adsorción de la superficie de las partículas presentes en el efluente sedimentado (Metcalf y Eddy ,2000).

Los polielectrolitos aniónicos varían en densidad de carga y peso molecular (Sandoval *et al.*, 2001).

El principal mecanismo de acción para aglomeramiento de las partículas es el puente intraparticular, en donde el polielectrolito forma una matriz porosa que permite la pérdida de agua por evaporación o filtración sin alterar la estructura química de las partículas presentes en el lodo

Mientras los polielectrolitos catiónicos utilizan un mecanismo de neutralización de carga, los aniónicos y no iónicos utilizan un mecanismo de reticulación.

Polielectrolitos no-iónicos

Poseen carga neutra al ser introducidos en un medio acuoso, al igual que los polielectrolitos aniónicos forman puentes de unión entre las partículas, adhiriéndose a puntos de adsorción de la superficie de las partículas presentes en el efluente sedimentado (Metcalf y Eddy 2000). Los polielectrolitos no iónicos no poseen densidad de carga, pero presentan altos pesos moleculares.

En la figura siguiente se presentan los mecanismos de adsorción que se han propuesto para polielectrolitos catiónicos y no-iónicos (Lee y Liu, 2001).

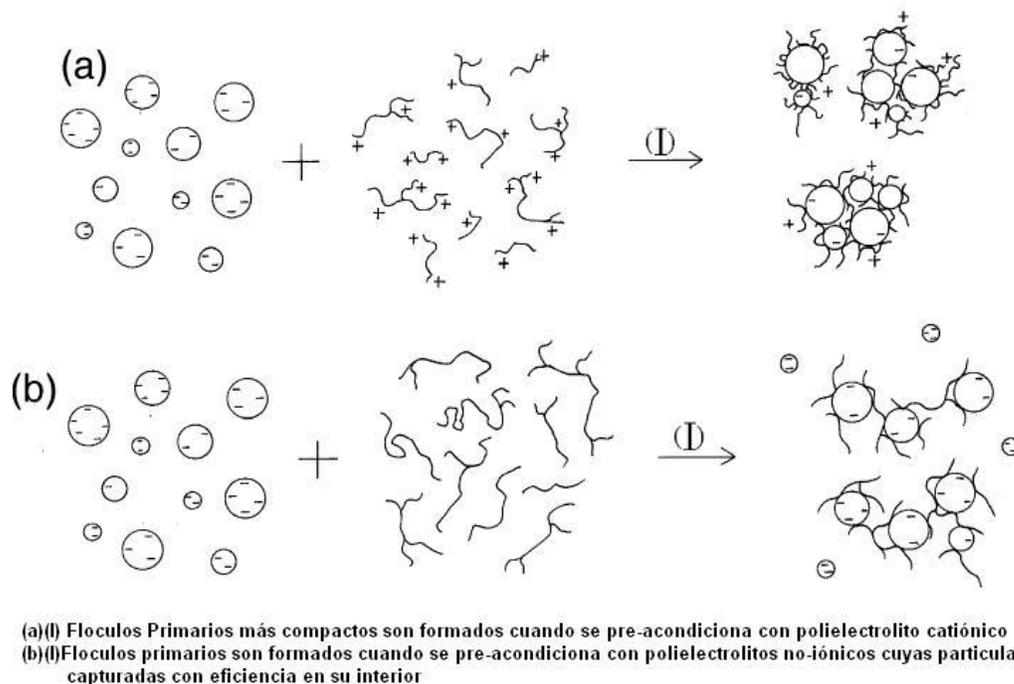


Figura 2. 14 Mecanismos de adsorción de polielectrolitos catiónicos y no-iónicos propuestos por Lee y Liu, (2001)

Preparación y duración de los polielectrolitos

Uso de polielectrolitos: Los polielectrolitos son suministrados en polvo o en forma de emulsiones muy viscosas. Éstos tienen que ser muy diluidos antes de ser suministrados. La concentración satisfactoria de la solución inicial generalmente está entre 0.3 y 1% con un óptimo de 0.5% de la mayoría de los productos (Degrémont, 2009).

La preparación de la relativamente concentrada y viscosa concentración inicial evita el almacenamiento de grandes cantidades de solución diluida y el uso de costosas bombas de dosificación. Además, las soluciones de polielectrolitos son deterioradas muy rápidamente por estar muy diluidas (soluciones al 0.1% duran de 1 a 2 días) (Degrémont, 2009).

La solución es preparada principalmente para dispersar los productos anhidros (esto no es necesario en el caso de líquidos viscosos donde el contenido es

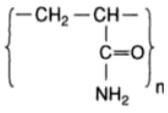
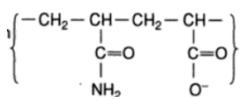
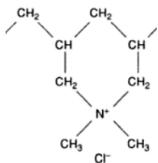
limitado de 15 a 20% del producto activo). Esta dispersión, se hace regularmente a mano, teniendo cuidado de evitar aglomeraciones. Esto es efectuado con dosificadores especiales o, en el caso de grandes flujos, por "jet spray" dosificadores del polvo. Cuando se inyecta el polielectrolito en forma, de preferencia debe ser bombeado desde el tanque de solución inicial, para dosificadores de tipo-pistón o bombas de desplazamiento de rotor de tipo excéntrico.

Para grandes plantas la solución puede ser preparada automáticamente en un silo usando un alimentador seco (o un sistema de bombeo usado para productos viscosos). La madurez de la solución inicial constituye la segunda etapa de preparación y requiere de una a muchas horas (en el caso de productos anhídridos), antes de su uso. La solución inicial es diluida sobre una base continua en el tubo de alimentación. Justo antes del punto de inyección dentro del lodo.

Con polielectrolitos, la floculación es generalmente inmediata; los flóculos formados son voluminosos y algo frágiles. Los puntos de inyección son por tanto usualmente localizados casi inmediatamente después de la unidad de deshidratación, siendo el mezclado violento pero de corta duración.

Los polielectrolitos líquidos son emulsionados en un disolvente orgánico que permite aumentar la concentración en activos del producto, lo cual los hace especialmente interesantes para aquellas aplicaciones donde el consumo de floculante es elevado.

Tabla 2. 11 Polielectrolitos orgánicos sintéticos usados en el tratamiento de agua (Montgomery, 1989; Dentel; 1989)

Tipo	Ejemplo	Peso Molecular ^a	Influencia del pH en la carga ^a	Dosis típicas ^a (mg/L)	Usos	Observaciones
No iónico	Poliacrilamida 	$10^3 - 5 \times 10^5$	Muy fuerte; (0) a pH intermedio, (-) a pH alto, (+) a pH bajo.	0.1 – 1.0	Floculante. Auxiliar en la filtración.	Incrementa la resistencia de los flóculos, disponible en polvo o emulsión, uso común como ayudante de filtración.
Aniónico	Poliacrilamida parcialmente hidrolizada 	$10^6 - 30 \times 10^6$	Fuerte; ligeramente (-) a pH intermedio, (0) o ligeramente (+) a bajo pH,	0.1 – 1.0	<ul style="list-style-type: none"> Floculante. Auxiliar en la filtración. acondicionador de lodo. 	Producido de la hidrólisis controlada de poliacrilamida, densidad de carga variable.
Catiónico	Cloruro de polidialildimetilamonio Poli(DADMAC) 	$> 30 \times 10^6$	Ninguna	0.5 – 10	<ul style="list-style-type: none"> Coagulante Remoción de color/turbiedad Acondicionador de lodo 	Uso más común como coagulante, se puede usar junto con coagulantes inorgánicos, resistente el cloro, disponible en forma líquida
Catiónico	Polietileniminas $- [CH_2 - CH_2 - NH -]_n -$	$> 30 \times 10^6$	Muy fuerte; (+) sólo a pH bajo, (0) a pH alto.	0.5 – 10	<ul style="list-style-type: none"> Coagulante Floculante 	Poco usado como coagulante, reacciona con el cloro, la densidad de carga depende del pH

2.3.4.2 AGENTES INORGÁNICOS UTILIZADOS EN EL ACONDICIONAMIENTO QUÍMICO DE LODOS

Electrolitos minerales catiónicos polivalentes y cal forman un floc de alta resistencia y estabilidad.

Las sales metálicas más efectivas y económicas para el espesamiento de lodos son (Degrémont, 2009):

Cloruro férrico, FeCl_3 a una concentración inicial de alrededor de 600g/L;

Sulfato de hierro, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$;

Clorosulfato férrico FeSO_4Cl ;

Sulfato ferroso $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$;

Y en menor grado varias sales de aluminio.

Algunos electrolitos anfóteros (los cuales se comportan como ácidos con respecto a las bases y viceversa) tienen una acción dual:

- Una acción coagulante: su carga es generalmente opuesta a la de las partículas de lodo;
- Una acción floculante: Forman hidróxidos complejos hidratados, como $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6(\text{OH})_3]_n$, los cuales juegan el papel de polielectrolitos minerales.

El electrolito más eficiente probado son las sales de hierro (principalmente las sales trivalentes). La introducción de cal (en una proporción de 5-10% de la lechada), después de la adición de la solución electrolítica, es siempre beneficiosa debido a:

- ❖ La precipitación de un número de sales orgánicas de calcio.
- ❖ La disminución de agua ligada (reducción de resistencia específica y compresibilidad con producción de una torta más seca y consistente).
- ❖ La introducción de una capa inorgánica densa, causando dilución del medio coloidal.

En el caso de lodos de hidróxidos hidrofílicos, solamente la cal es generalmente suficiente para mejorar la filtrabilidad del lodo a un nivel aceptable; pero en ocasiones necesita grandes cantidades de este reactivo:

alrededor de 50% del peso de SST (Sólidos Suspendidos Totales en base Seca), expresado como CaO.

En el caso de lodos hidrofílicos orgánicos, la cal es por lo regular usada en combinación con sales de hierro. Las proporciones son generalmente entre 3 y 12% FeCl_3 y entre 6 y 30% CaO en relación los sólidos en base seca en el lodo.

El cloruro férrico es uno de los agentes más ampliamente usados.

La cantidad de cloruro de hierro y cal requeridos incrementa con la materia volátil suspendida en el lodo.

Una gran proporción de los residuos de agentes adicionados en la deshidratación de sólidos se encuentran en estado sólido, esto como resultado de la precipitación de hidróxidos metálicos ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) y carbonato de calcio (CaCO_3). Al mismo tiempo, 20 al 40% de reactivos está dentro de la solución en forma de cloruros, en la fase líquida (filtrado).

De acuerdo a la disponibilidad y, con el fin de economizar en gastos de operación, otros agentes floculantes distintos al FeCl_3 pueden ser necesarios de ser utilizados, particularmente:

- ❖ Sulfato ferroso: Dosis de Fe^{2+} son a menudo el doble que las de Fe^{3+} y la eficiencia es limitada con lodos muy hidrofílicos. La ventaja de este reactivo radica en su bajo costo por el hecho de que es un subproducto de acero decapado y de la industria de titanio. Para incrementar la eficiencia, el sulfato ferroso es en ocasiones oxidado a sulfato férrico (usualmente con cloro gaseoso).
- ❖ Sales de Aluminio: Son mucho menos efectivas que las sales de hierro y frecuentemente obstruyen los filtros de tela; dan buenos resultados (usualmente en combinación con polielectrolitos) en filtros-prensa con ciclos de 12 a 24 horas.

2.3.5 FACTORES DE INFLUENCIA DEL PROCESO DE ESPESAMIENTO DE LODOS

Potencial zeta

Un factor importante que influye en la desestabilización de la carga de las partículas presentes en el lodo es el potencial zeta. Las propiedades de las partículas sólidas presentes en los distintos lodos son: tamaño, grado de hidratación, interacción entre ellas y carga electrostática; éstas inhiben el espesamiento y la deshidratación de los lodos debido a su composición química y estructura coloidal.

El potencial zeta es una medida de la estabilidad de una partícula e indica el potencial que se requiere para penetrar la capa de iones circundante en la partícula para desestabilizarla. Por lo tanto, el potencial zeta es la potencia electrostática que existe entre la separación de las capas que rodean a la partícula (Sandoval *et al.*, 2001). Los coagulantes proporcionan cargas de signo contrario al de los coloides para neutralizar ese potencial.

El lodo es una suspensión coloidal estable, por lo que el objetivo del acondicionamiento es ajustar las condiciones físicas y químicas hasta reducir la carga de la partícula, lo cual resulta en la liberación del agua y la agregación de las mismas.

Al utilizar un polielectrolito catiónico se neutralizan las cargas negativas de los coloides y se anula el potencial zeta; por el contrario, un aniónico y un no iónico no anulan las cargas. Sin embargo, existe una adsorción de radicales activos de la cadena del polielectrolito sobre las partículas, creándose una modificación en su superficie y en el potencial zeta, produciéndose una aglomeración mediante un mecanismo de reticulación (Sandoval *et al.*, 2001).

Densidad de carga del floculante

La densidad de carga representa la cantidad de carga positiva o negativa necesaria para obtener la mejor floculación a la dosificación más baja, la densidad de carga depende del tipo de lodo a tratar.

Para lodos municipales esta densidad de carga es función del contenido de materia orgánica del lodo, el contenido de materia orgánica está generalmente relacionado con el contenido de sólidos volátiles. Entre mayor contenido de sólidos volátiles existan en el lodo, mayor contenido de carga catiónica necesitará.

La figura 2.15 muestra las densidades de carga recomendada para lodos provenientes de distintas industrias.

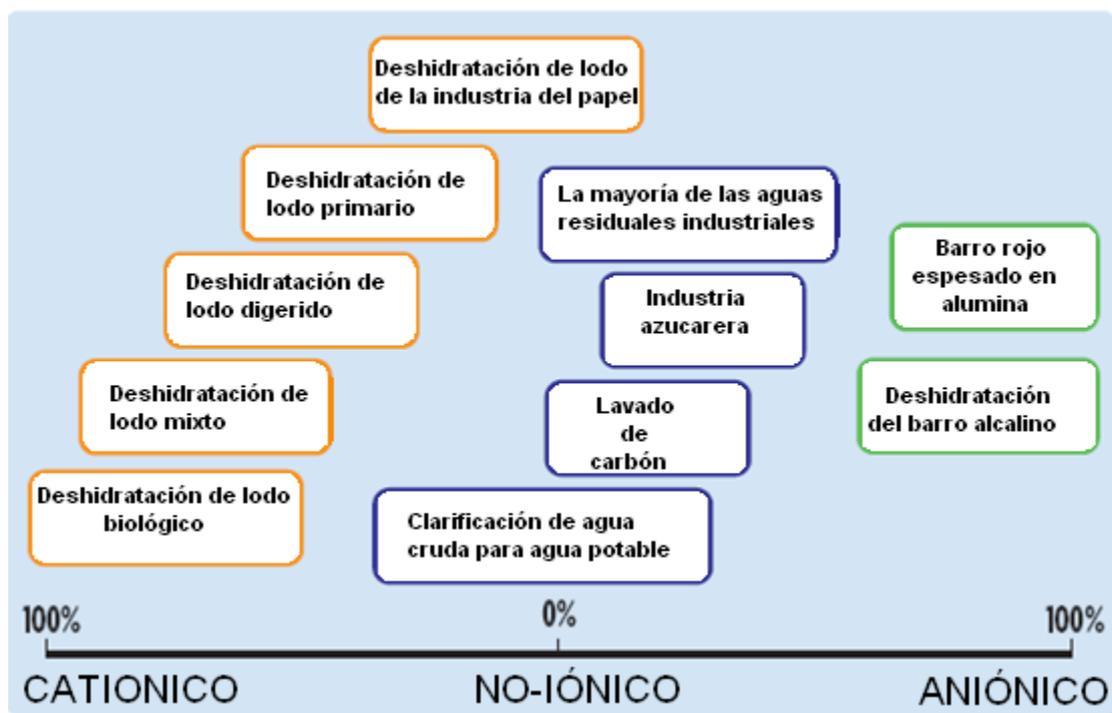


Figura 2. 15 Densidades de carga utilizadas de diferentes tipos de Polielectrolitos para distintas clases de lodos (Montgomery, 1989).

Efecto de la carga del floculante

La importancia de la optimización de la dosis de polielectrolito utilizada para el acondicionamiento de un lodo, antes de la deshidratación, radica principalmente en los cambios de las características del lodo, un polielectrolito inicialmente seleccionado puede ser ineficiente posteriormente. De esta forma, es fundamental que la optimización del polielectrolito sea realizada dentro de la centrífuga, para garantizar una eficiente y económica separación líquido / sólido.

Los polielectrolitos catiónicos son efectivos principalmente si los lodos tienen un alto contenido de materia orgánica coloidal (materia volátil/materia seca = 50-75%) y para los medianamente mineralizados, mientras que los polielectrolitos aniónicos son ampliamente usados con suspensiones con un importante contenido mineral (materia volátil/materia seca = 30-35%).

La combinación de polielectrolitos aniónicos y catiónicos, es a veces necesaria, cuando se requiere flocular una mezcla de lodos (e.g. lodo biológico + lodo hidróxido). Lodos con un alto contenido de proteínas (alrededor del 80% de materia volátil suspendida) frecuentemente requieren polielectrolitos fuertemente catiónicos y altos pesos moleculares.

Efecto del pH

Los polielectrolitos catiónicos son poliamidas que se hidrolizan en agua, de acuerdo a la siguiente ecuación:



Puesto que la hidrólisis de polielectrolitos catiónicos produce OH^- a pH altos, el equilibrio se desplaza preferentemente hacia la reacción de la izquierda y el polielectrolito se vuelve no iónico.

Los polielectrolitos aniónicos incorporan a su estructura un grupo carboxilo que en agua se ioniza del siguiente modo:



Un pH bajo desplaza el equilibrio hacia la reacción a la izquierda y transforma el polielectrolito aniónico en no iónico. Según esto generalmente se usan los polielectrolitos catiónicos a bajos pH y los aniónicos a altos pH. En caso contrario dejarían de funcionar, lo que ocurre es que se transforman en no iónicos, lo que hará variar en cierto modo su efectividad en el tratamiento concreto en el que se aplican. (WEF y ASCE, 1992).

Efecto del peso molecular del polielectrolito

Como una medida de la longitud del polielectrolito puede utilizarse el peso molecular (PM) y éste puede variar, como lo muestra la Tabla 2.12.

Tabla 2. 12 Distintos pesos moleculares de polielectrolitos (Montgomery, 1989).

Peso Molecular	Valor (g/mol)
Bajo	$10^4 - 10^5$
Medio	$10^5 - 10^6$
Alto	$10^6 - 5 \times 10^6$
Muy Alto	$> 5 \times 10^6$

Aquellos polielectrolitos catiónicos de bajo a medio peso molecular, pueden ser utilizados como sustitutos de las sales de aluminio o hierro como coagulantes primarios, funcionando como neutralizantes de carga. Las dosis típicas se encuentran en el intervalo de 0.5 a 10 mg/L. Al igual que las sales de aluminio y hierro, una sobredosis puede causar la reestabilización de las partículas. Estos polielectrolitos son aplicados en la etapa de mezclado rápido y se comercializan como soluciones acuosas.

En cambio, los polielectrolitos que presentan de alto a muy alto peso molecular, permiten la formación de enlaces entre los microflóculos, flóculos y partículas macroscópicas, y son suministrados después del mezclado rápido. Estos polielectrolitos pueden ser catiónicos, aniónicos o no iónicos, y funcionan incrementando el tamaño de los flóculos y su resistencia. A menudo son llamados ayudantes de la coagulación. Las dosis pueden variar entre los 0.1 y 1.0 mg/L. Debido a su alta viscosidad son comercializados como polvos o emulsiones (Hendricks, 2006).

Para centrifugas, los espesantes de muy alto peso molecular proporcionan un gran rendimiento de desaguado, para filtros de prensa y filtros de banda, los floculantes de bajo peso molecular evitan la colmatación de las mallas, formando un floc de menor tamaño pero igualmente resistente, facilitando el prensado del lodo.

A mayor peso molecular, mayor longitud de cadena y mayor velocidad de sedimentación a igualdad de dosis de polielectrolito añadido (Monteagudo y Durán, 2000).

La figura 2.16 muestra la relación entre la velocidad de sedimentación de un lodo y la cantidad de polielectrolito adicionada para distintos pesos moleculares de polielectrolito, en ella es posible observar que las mayores velocidades de sedimentación se obtuvieron a bajas cantidades de polielectrolito con alto peso molecular.

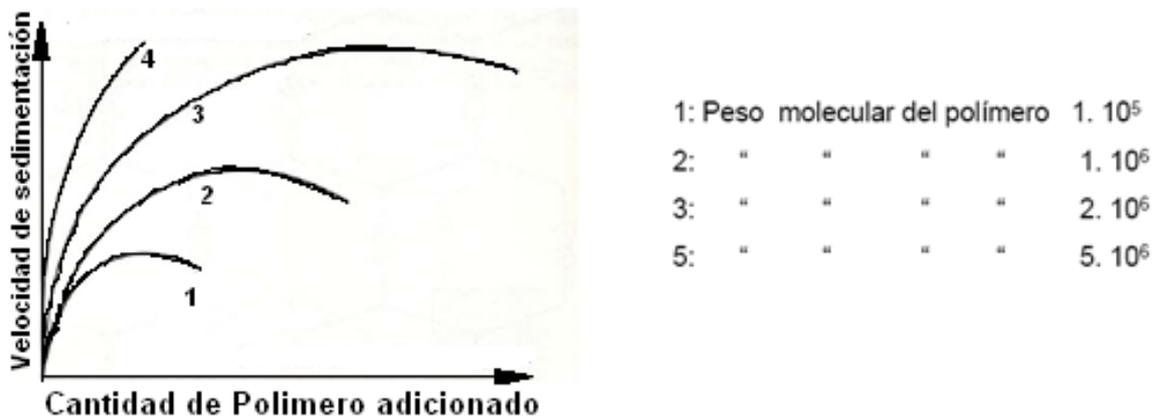


Figura 2. 16 Relación de velocidad de sedimentación y cantidad adicionada de polielectrolito para distintos pesos moleculares de floculante (Núñez, 2004).

3 **METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este trabajo se realizó un estudio de espesamiento con seis diferentes tipos de lodos producidos a partir del agua cruda de una planta potabilizadora y aplicando de manera separada seis combinaciones de coagulante y floculante. Estas seis combinaciones de coagulante-floculante fueron las mejores, desde el punto de vista técnico y económico, de acuerdo a los resultados reportados por Ramírez *et al.* (2009). En dicho estudio se seleccionaron esas combinaciones de reactivos para ser utilizadas en el proceso de clarificación del agua de la planta potabilizadora “Los Berros” (PPLB) del sistema Cutzamala, como reactivos químicos alternativos al sulfato de aluminio que actualmente se emplea en dicha planta.

Por cuestiones de confidencialidad del proyecto del cual forma parte este trabajo, no se mencionan los nombres comerciales de los coagulantes, floculantes y espesantes empleados en este estudio.

La metodología experimental de este trabajo se dividió en cuatro partes principales:

1. Selección de los espesantes a ser empleados en las pruebas de espesamiento de los seis lodos.
2. Realización de pruebas de coagulación-floculación-sedimentación para la generación del volumen de lodos necesario para las pruebas de espesamiento.
3. Realización de pruebas de espesamiento de los seis lodos.
4. Caracterización de los lodos antes y después de espesamiento.

Una descripción más detallada de dicha metodología se representa en la siguiente Figura.



Figura 3. 1 Etapas experimentales de este estudio.

3.1 MATERIALES Y REACTIVOS

3.1.1 AGUA CRUDA

Con el fin de tener la mayor cantidad de lodo posible por medio del procedimiento de coagulación-floculación, se seleccionó utilizar un agua con el mayor valor inicial de turbiedad (205 UNT), para producir el lodo de las pruebas de

espesamiento. Es importante mencionar que el valor de turbiedad de 205 UNT fue registrado en el influente de los últimos cinco años de operación de la planta potabilizadora Los Berros, estos datos fueron proporcionados por la CONAGUA para el periodo de 2004-2008. El agua utilizada en las pruebas de espesamiento se preparó mediante una mezcla del agua cruda que se colectó en el TRAC (Tanque de Recepción de Aguas Crudas) y en la presa Colorines (una de las presas que abastece la planta potabilizadora Los Berros (PPLB)). Este último punto de muestreo se seleccionó porque presenta la mayor turbiedad de las otras seis fuentes de abastecimiento, y sus coordenadas utilizando *Google earth* son: 19° 12' 21.49" N y 100° 08' 21.90" O. El agua colectada en los dos puntos de muestreo se mezcló debido a que el agua del TRAC tenía baja turbiedad (30 UNT) y la de la presa Colorines presentó una turbiedad inicial de 1,200 UNT, que rebasaba el valor inicial requerido para las pruebas (205 UNT).

3.1.2 COAGULANTES

Los coagulantes utilizados para la obtención del lodo necesario a utilizar en las pruebas de espesamiento, fueron los seleccionados por Ramírez *et al.* (2009), debido a que permitieron obtener un efluente que cumple con los valores límite de color y de turbiedad que estipula la norma mexicana para agua de consumo humano (NOM-127-SSA1-1994) y los costos de los reactivos fueron los más bajos de un grupo evaluado de 13 coagulantes.

La NSF (*National Sanitation Foundation*), en colaboración con la EPA (Agencia de Protección Medioambiental) y teniendo en cuenta tanto las necesidades de la industria como las de los usuarios finales, ha creado Normas, programas de certificación y pruebas para asegurar que los sistemas de tratamiento de agua potable cumplan estos propósitos.

La certificación NSF garantiza (mediante pruebas) que (http://www.nsf.org/business/newsroom/pdf/DWTU_Europe_Insert_ES.pdf):

- El sistema sea estructuralmente competente y no añada sustancias nocivas al agua.

- Que la Publicidad, la documentación y el etiquetado del producto no contengan información falsa o engañosa.
- Las instalaciones de producción sean sometidas a inspecciones imprevistas por NSF y que todos los modelos se vuelvan a probar periódicamente.

La Tabla 3.1 presenta los datos de los coagulantes utilizados, que cuentan con la certificación para uso en agua potable de la NSF y NMX

Tabla 3.1 Coagulantes seleccionados para generar los lodos empleados en las pruebas de espesamiento.

#	Sustancia activa	Carácter/PM	NSF	NMX	
1	Clorhidrato -Al poliDADMAC	Catiónico/bajo	Uso Máx. 167mg/L	Clorhidrato de Al	*****
				poliDADMAC	NMX-AA-136-SCFI-2007
2	Polihidróxi-cloruro de aluminio	Catiónico/bajo	Uso Máx. 250mg/L	NMX-AA-130-SCFI-2006	
3	Al ₂ (SO ₄) ₃	Catiónico/bajo	Uso Máx. 150mg/L	NMX-AA-122-SCFI-2006	
4					
5	Policloruro de Aluminio	Catiónico/bajo	Uso Máx. 150mg/L	NMX-AA-130-SCFI-2006	
6	Clorhidróxido-Al poliDADMAC (cloruro de polidialildimetilamonio)	Catiónico/bajo	Uso Máx. 100mg/L	Clorhidróxido-Al	NMX-AA-130-SCFI-2006
				poliDADMAC	NMX-AA-136-SCFI-2007

*PoliDADMAC: Cloruro de polidialildimetilamonio

3.1.3 FLOCULANTES

Los floculantes o coadyuvantes a la coagulación utilizados para la obtención del lodo necesario en las pruebas de espesamiento, fueron los seleccionados por Ramírez *et al.*, (2009). La Tabla 3.2 presenta dichos floculantes.

Tabla 3.2 Floculantes seleccionados para generar los lodos empleados en las pruebas de espesamiento.

#	Sustancia Activa	Carácter/PM	NSF	NMX
1	Copolímero de acrilamida ácido acrílico	Aniónico/bajo	En proceso de aprobación	NMX-AA-137-SCFI-2007
2	Poliamina	Catiónico/bajo	Uso Máx. 20mg/L	NMX-AA-135-SCFI-2007
3	PoliDADMAC	Catiónico/muy alto	Uso Máx. 25mg/L	NMX-AA-136-SCFI-2007
4	Poliamina	Catiónico/alto	Uso Máx. 20mg/L	NMX-AA-135-SCFI-2007

3.1.4 DOSIS A APLICAR DE LAS SEIS COMBINACIONES COAGULANTE-FLOCULANTE SELECCIONADAS PARA GENERAR DIFERENTES LODOS

Con base en las ecuaciones desarrolladas por Ramírez *et al.*, (2009) las cuales se presentan en la tabla 3.3, se calculó para cada combinación coagulante-floculante el volumen generado de lodo por litro de agua cruda tratada, esto con la finalidad de obtener un estimado del volumen de agua cruda requerida para generar el volumen de lodo necesario para llevar a cabo la prueba REF, lo cual se explica más ampliamente en el apartado 3.2 del presente escrito.

Los resultados de dichos cálculos se presentan en la tabla 3.4.

Tabla 3. 3 Ecuaciones para el cálculo de volumen de lodos para cada combinación coagulante floculante (Extraídas de Ramírez *et al.*, 2009)

Coagulante	Floculante	Modelo para Volumen de Lodos (mL/L)
Catiónico Clorhidrato -Al poliDADMAC	Catiónico PM alto Poliamina	$VLG = 2,18125 + 1,4375X_1 - 1,1375X_2 + 1,0625X_3 - 0,8125X_1X_3 - 0,1125X_2X_3$
Catiónico Policloruro de Aluminio	Catiónico PM bajo Copolímero de acrilamida ácido acrílico	$VLG = 13,5 + 16,125X_1 + 0,5X_2 - 5,75X_3 + 2,625X_1X_3 - 6,125X_2X_3$
Catiónico Clorhidróxido-Al poliDADMAC	Catiónico PM muy alto PoliDADMAC	$VLG = 1,7875 - 0,75X_1 - 0,225X_2 + 1,05X_3 - 0,05X_1X_3 - 0,875X_2X_3$
Catiónico Polihidróxi- cloruro de aluminio	Catiónico PM bajo Poliamina	$VLG = 12,625 + 15,625X_1 - 0,125X_2 - 4,75X_3 + 2,25X_1X_3 - 6,375X_2X_3$
Catiónico $Al_2(SO_4)_3$ libre de Fe	Catiónico PM muy alto PoliDADMAC	$VLG = 24,75 - 11,5X_1 + 0,5X_2 - 5,25X_3 - 0,5X_1X_3 - 1,25X_2X_3$
Catiónico $Al_2(SO_4)_3$ Estándar	Catiónico PM bajo Poliamina	$VLG = 23,4375 - 4,375X_1 - 0,875X_2 - 9,375X_3 + 2,375X_1X_3 - 2,125X_2X_3$

VLG= Volumen de Lodos Generado

Donde las variables son:

X_1 = Dosis de coagulante (mg/L)

X_2 = Dosis de floculante (mg/L)

X_3 = Turbiedad Inicial (UNT)

Las tres variables en valor codificado de -1 a 1, correspondiendo -1 a las dosis y turbiedades más bajas y 1 a las dosis y turbiedades más altas.

Tabla 3.4 Combinaciones y dosis de Coagulante-Floculante empleadas para generar los seis lodos utilizados en las pruebas de espesamiento.

Turbiedad del Agua Cruda 205 UNT		Dosis (mg producto comercial/L _{agua cruda})		Volumen teórico de lodos a Producir (mL de lodo producido/L _{agua cruda})
Coagulante	Floculante	Coagulante	Floculante	
Catiónico Clorhidrato - Al poliDADMAC	Catiónico PM alto Poliamina	9.73	0.3	4.29
Catiónico Policloruro de Aluminio	Catiónico PM bajo Copolímero de acrilamida ácido acrílico	125.97	0.86	30.99
Catiónico Clorhidróxido- Al poliDADMAC	Catiónico PM muy alto PoliDADMAC	2.47	1.51	3.66
Catiónico Polihidróxi-cloruro de aluminio	Catiónico PM bajo Poliamina	105.38	0.86	18.15
Catiónico $Al_2(SO_4)_3$ libre de Fe	Catiónico PM muy alto PoliDADMAC	148.02	1.67	17.7
Catiónico $Al_2(SO_4)_3$ Std.	Catiónico PM bajo Poliamina	148.01	0.84	14.89

3.1.5 ESPESANTES

3.1.5.1 SELECCIÓN DE LOS ESPESANTES A SER EMPLEADOS EN LAS PRUEBAS DE ESPESAMIENTO

La selección de los espesantes de lodos se realizó en tres etapas, las cuales son descritas a continuación.

Primera Etapa. Identificación de productos espesantes y Pruebas de selección de la carga iónica e intervalos de dosis de los espesantes a ser utilizados en las pruebas de espesamiento

En esta etapa se contactaron dos empresas (denominadas 1 y 2), con la finalidad de que nos proporcionaran productos que tuvieran buenos resultados en el espesamiento de lodos de plantas potabilizadoras.

Las tablas 3.5 y 3.6 muestran los productos propuestos por ambas empresas.

Tabla 3. 5 Especificaciones de los espesantes proporcionados por la empresa 1.

ESPESANTE	CARÁCTER IÓNICO	APARIENCIA	DENSIDAD DE CARGA	PROPIEDADES TÍPICAS
Poliacrilamida	Aniónico	<i>Líquido opaco</i>	Alta (40%)	Peso molecular alto Concentración de ingrediente activo = 29 % Viscosidad Brookfield = 1200 cps Gravedad específica = 1.04 Concentración máxima de operación = 5 g/L
Poliacrilamida	Aniónico	<i>Polvo blanco</i>	Alta (40)	Peso molecular muy alto Viscosidad Brookfield @ 5 g/L= 1740 cps Viscosidad Brookfield @ 2.5 g/L= 680 cps Viscosidad Brookfield @ 1.0 g/L= 285 cps Gravedad específica = 0.80 Concentración recomendada de operación = 3 g/L, máx. = 5 g/L
Poliacrilamida	Catiónico	<i>Polvo blanco</i>	Baja (10%)	Peso molecular alto Viscosidad Brookfield @ 5 g/L= 510 cps Viscosidad Brookfield @ 2.5 g/L= 230 cps Viscosidad Brookfield @ 1.0 g/L= 100 cps Gravedad específica = 0.80 Concentración recomendada de operación = 4 g/L, máx. = 10 g/L
Poliacrilamida	Catiónico	<i>Polvo blanco</i>	Media (20%)	Peso molecular medio Viscosidad Brookfield @ 5 g/L= 510 cps Viscosidad Brookfield @ 2.5 g/L= 230 cps Viscosidad Brookfield @ 1.0 g/L= 100 cps Gravedad específica = 0.80 Concentración recomendada de operación = 5 g/L, máx. = 10 g/L
Poliacrilamida	Catiónico	<i>Líquido viscoso</i>	Media (20%)	Peso molecular alto Concentración de ingrediente activo = 39 % Viscosidad Brookfield = 1200 cps Gravedad específica = 1.04 Concentración máxima de operación = 10 g/L
Poliacrilamida	Catiónico	<i>Polvo blanco</i>	Media (40%)	Peso molecular medio Viscosidad Brookfield @ 5 g/L= 510 cps Viscosidad Brookfield @ 2.5 g/L= 250 cps Viscosidad Brookfield @ 1.0 g/L= 90 cps Gravedad específica = 0.85 Concentración recomendada de operación = 4 g/L, máx = 10 g/L
Poliacrilamida	Catiónico	<i>Líquido viscoso</i>	Alta (40%)	Peso molecular alto Concentración de ingrediente activo = 46.5 % Viscosidad Brookfield = 1200 cps Gravedad específica = 1.04 Concentración máxima de operación = 10 g/L
Poliacrilamida	Catiónico	<i>Polvo blanco</i>	Muy alta (55%)	Peso molecular muy alto Viscosidad Brookfield @ 5 g/L= 580 cps Viscosidad Brookfield @ 2.5 g/L= 280 cps Viscosidad Brookfield @ 1.0 g/L= 100 cps Gravedad específica = 0.80 Concentración recomendada de operación = 4 g/L, máx = 15 g/L
Poliacrilamida	Catiónico	<i>Líquido viscoso</i>	Muy alta (80%)	Peso molecular alto Promedio de sólidos no volátiles = 47.5 % Viscosidad Brookfield = 1200 cps Gravedad específica = 1.04 Concentración máxima de operación = 10 g/L

Tabla 3. 6 Especificaciones de los productos espesantes proporcionados por la empresa 2.

FLOCULANTE	TIPO	PROPIEDADES TÍPICAS	APLICACIONES Y BENEFICIOS	DOSIS
Poliacrilamida (PAM) seca	Aniónico	Polvo granular blanco. pH de solución al 0.5% ,25° C = 5.0-7.0 Grado de carga = 33-50 %	Auxiliares de coagulación. Sedimentación por gravedad Deshidratación mecánica Remoción de fósforo	Eficaz a bajas dosis. Concentración de soluciones madres entre 0.5 %. Y 2%
Poliacrilamida (PAM) seca	Aniónico	Polvo granular blanco. pH de solución al 0.5% ,25° C = 5.0-7.0 Grado de carga = 7-20 %	Minimiza las necesidades de espacio de almacenamiento Elimina o reduce el uso de sales inorgánicas. Altas velocidades de sedimentación.	
Poliacrilamida (PAM) seca	Catiónico	Polvo granular blanco pH de solución al 0.5% ,25° C = 3.0-5.0 Grado de carga = 2- 55 % Alto peso molecular	Deshidratación en filtros banda, centrífugas y filtros prensa. Flotación por medio de aire disuelto. Espesado.	
Poliacrilamida (PAM) seca	Catiónico	Polvo granular blanco pH de solución al 0.5% ,25° C = 3.0-5.0 Grado de carga = 10 - 55 % Alto peso molecular	Clarificación del agua. Minimiza las necesidades de espacio de almacenamiento Mejora la producción de sólidos en la torta.	
Poliacrilamida en emulsión (PAM)	Catiónico	Líquido opaco Rango extenso de pesos moleculares y cargas. Densidad específica a 25 °C = 1.00-1.06 Punto de congelación = -18 °C	Deshidratación de lodos por medio de filtros-banda, centrífugas, filtros prensa. Ayudantes de coagulación. Flotación por medio de aire disuelto. Sedimentación por gravedad. Deshidratación mecánica. Espesado. Clarificación del agua. Rango de carga catiónica muy amplio. Fácil manejo. Mejora la producción y los sólidos de la torta.	

Segunda Etapa. Pruebas Preliminares

Preselección de los espesantes a ser empleados en las pruebas de espesamiento.

Para lograr definir el número de productos y el carácter iónico de los espesantes a evaluar, se realizaron pruebas preliminares con algunos productos. La evaluación de los espesantes se efectuó con la colaboración de un representante de la empresa 1, llevándose a cabo dichas pruebas en un equipo de jarras portátil proporcionado por la misma. Se adicionaron a 50 mL de lodo generado por cada una de las 6 combinaciones Co/FI, volúmenes de entre 1 a 11 mL de los espesantes preseleccionados, posteriormente, se mezclaron repetidas veces de manera manual para realizar homogeneizar y, al cabo de un minuto, se suspendió la agitación y se observó la calidad del lodo espesado. Con base en las recomendaciones del representante de la empresa número 1, de tener flóculos de lodos bien compactados sin mostrar apelmazamiento, se preseleccionaron los mejores espesantes de estas pruebas. Para lograr seleccionar la carga iónica y la dosificación de los espesantes se realizó un barrido de diferentes cargas catiónicas.

Adicionalmente, se hizo un barrido de dosificaciones de todos los espesantes de carácter catiónico proporcionados por la Empresa 1 y por la Empresa 2, con el fin de establecer el intervalo de dosificaciones para evaluación en las pruebas de espesamiento.

Tercera Etapa: Definición de criterios de selección de espesantes a aplicar en las pruebas definatorias de espesamiento de lodos

Los criterios de selección de espesantes fueron:

1) **Peso Molecular**, se seleccionaron aquellos productos que presentaran un alto peso molecular; debido a que según las pruebas de preselección estos reactivos fueron los más adecuados para el espesamiento, lo cual concuerda con los resultados reportados en bibliografía (Sandoval *et al.*, 2001; 2002).

2) **Carácter Iónico**, fueron preferidos productos espesantes que presentaran carga catiónica, debido a que, al establecer en las pruebas preliminares un punto de comparación entre los dos tipos de carácter iónico (aniónico y catiónico) proporcionados por los proveedores, se concluyó que los espesantes aniónicos no tenían resultados positivos en el proceso de espesamiento, lo cual concuerda con bibliografía (Sandoval *et al.*, 2001 y 2002).

3) **Valor De Carga Catiónica**, tuvieron prioridad los espesantes que presentaran valores de carga iónica inferior al 55%, esto como resultado también, de las pruebas preliminares realizadas.

3.1.5.2 ESPESANTES SELECCIONADOS

Los espesantes finalmente seleccionados se muestran a continuación, en el Anexo A, en el apartado A.1 se presentan las respectivas fichas técnicas

Tabla 3. 7 Espesantes empleados en las pruebas de espesamiento de lodos de la PPLB.

PROVEEDOR	ESPEANTE	CARGA CATIÓNICA (%)	PROPIEDADES TÍPICAS
Empresa 1	E1 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo)	10 (baja)	Polvo blanco Viscosidad Brookfield @ 5 g/L= 510 cps Viscosidad Brookfield @ 2.5 g/L= 230 cps Viscosidad Brookfield @ 1.0 g/L= 100 cps Gravedad específica = 0.80
	E2 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo)	20 (media)	Polvo Blanco Viscosidad Brookfield @ 5 g/L= 510 cps Viscosidad Brookfield @ 2.5 g/L= 230 cps Viscosidad Brookfield @ 1.0 g/L= 100 cps Gravedad específica = 0.80
Empresa 2	E3 (poliacrilamida)	35 (alta)	Polvo granular blanco pH de solución al 0.5% , 25° C = 3.0-5.0
Empresa 1	E4 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo)	55 (muy alta)	Viscosidad Brookfield @ 5 g/L= 580 cps Viscosidad Brookfield @ 2.5 g/L= 280 cps Viscosidad Brookfield @ 1.0 g/L= 100 cps Gravedad específica = 0.80

Las dosis seleccionadas para realizar las pruebas de espesamiento fueron las reportadas en la Tabla 3.8:

Tabla 3. 8 Intervalo seleccionado de dosis (mL reactivo/100 mL de lodo) de espesantes a aplicar en las pruebas de espesamiento de los seis lodos a evaluar.

Dosis de espesante (mL espesante/100 mL lodo)
1
3
5
7

Las dosis reportadas en la Tabla 3.8 fueron transformadas para cada tipo de lodo en unidades de kg de polielectrolito/ tonelada de lodo. La tabla 3.9 reporta los resultados obtenidos de dicha conversión. Dichos valores de dosis fueron recomendados por los proveedores.

Tabla 3. 9 Intervalo seleccionado de dosis de espesantes a aplicar en las pruebas de espesamiento de los seis lodos a evaluar.

Dosis de espesante (mL de polielectrolito /100mL de lodo)	Dosis de espesante (kg polielectrolito/ton de lodo crudo base seca)						
	Par Coagulante-Floculante	Lodo 1	Lodo 2	Lodo 3	Lodo 4	Lodo 5	Lodo 6
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.1	0.5	0.1	0.6	0.2	0.2	0.2
3	0.2	1.5	0.2	1.2	0.5	0.6	0.6
5	0.3	2.4	0.3	2.8	0.9	0.9	0.9
7	0.4	3.4	0.4	3.9	1.2	1.3	1.3
Dosis de espesante g de polielectrolito /100mL de lodo)	Dosis de espesante (g polielectrolito/L de lodo)						
Par Coagulante-Floculante	Lodo 1	Lodo 2	Lodo 3	Lodo 4	Lodo 5	Lodo 6	Lodo 6
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
3	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015
5	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
7	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035

3.1.6 LODO

Volumen de lodos necesario para realizar las pruebas de espesamiento

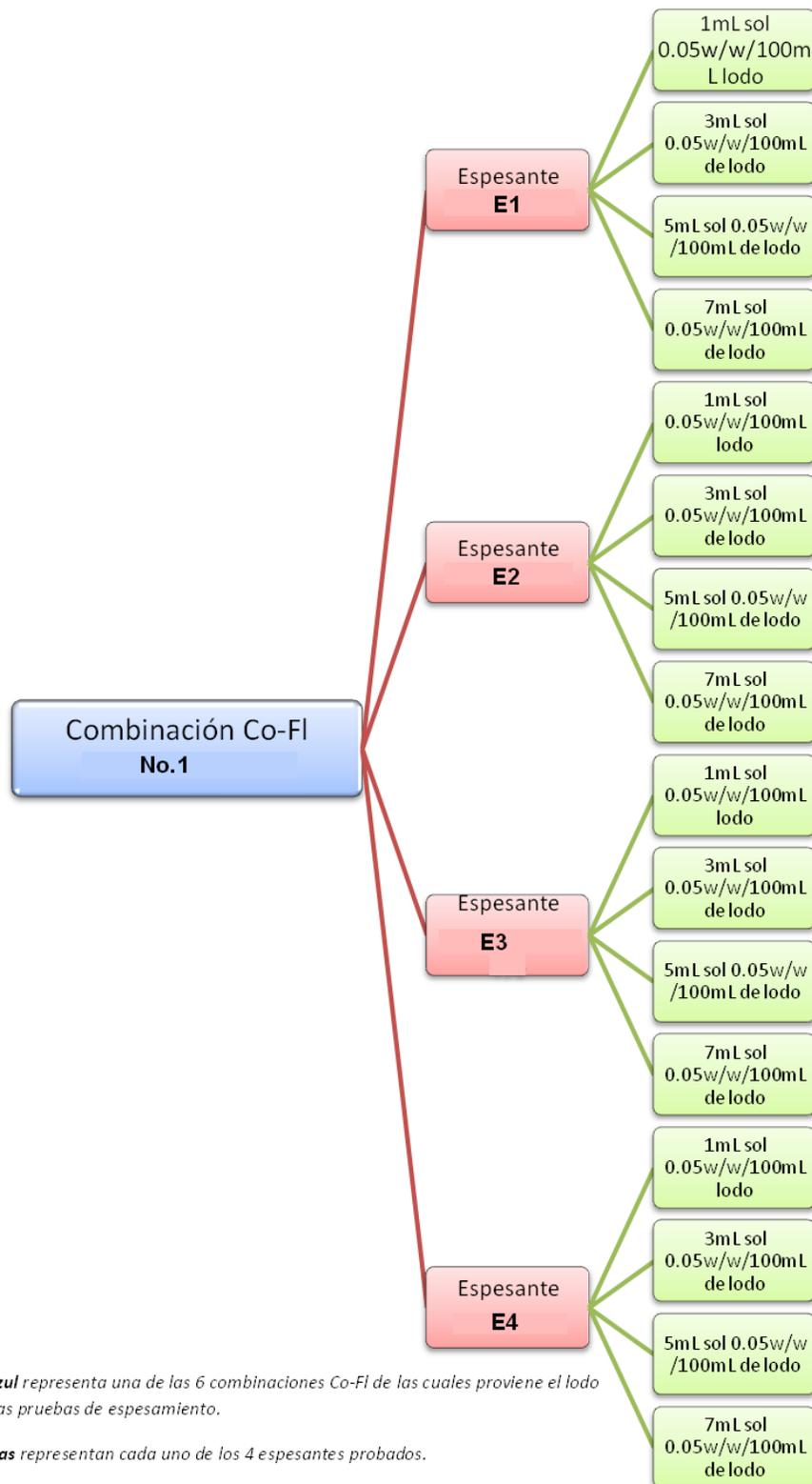
Con el fin de determinar el volumen de lodos necesario para las pruebas REF de las distintas dosis de polielectrolito espesante para cada combinación Co/FI fue necesario cuantificar el número de pruebas REF a realizar para cada combinación Co/FI.

En la Figura 3.2 se esquematizan las pruebas de espesamiento y de determinación de Resistencia Específica a la Filtración (REF) de lodos espesados, que se realizaron para el lodo generado por la combinación 1 de coagulante-floculante (Co/FI) compuesta por Clorhidrato de Al polidADMAC-Poliamina. En esta figura es posible observar que se realizaron 16 pruebas para todas las combinaciones lodo-espesante, las cuales se realizaron por duplicado lo cual da como resultado 32 pruebas. Adicionalmente, se realizó la prueba REF para un blanco (Prueba de lodo sin espesante) el cual también fue realizado por duplicado, dando un total de pruebas de 34.

Para realizar cada prueba de Resistencia Específica a la Filtración (REF) descrita en el apartado 3.3.2 del presente escrito, se requiere de un volumen de lodos de 100mL, por lo cual, es sencillo calcular el volumen de lodo necesario producir para cada combinación Co/FI:

$$34 \text{ pruebas REF} * \frac{100 \text{ mL de lodo}}{\text{prueba REF}} = 3400 \text{ mL de Lodo} = 3.4 \text{ L}$$

Este valor fue redondeado a 4L, con el fin de tener una reserva de lodo destinada a repetir pruebas debido a errores experimentales (caída del vacío, rompimiento de filtros, etc.).



Donde

Cuadro en azul representa una de las 6 combinaciones Co-FI de las cuales proviene el lodo sometido a las pruebas de espesamiento.

Cuadros Rosas representan cada uno de los 4 espesantes probados.

Cuadros Verdes representan las dosis de cada espesante que fueron evaluadas.

Figura 3. 2 Representación esquemática del número de pruebas de espesamiento realizadas para el lodo generado por la combinación Co/FI No.1, y aplicando cuatro espesantes.

3.2 SISTEMAS Y TÉCNICAS EXPERIMENTALES

3.2.1 GENERACIÓN DE LODOS

Para la generación de lodos se utilizó un equipo con capacidad de 100 litros, que cuenta con un sistema de regulación de la velocidad de agitación y con un agitador mecánico de paletas. El sistema utilizado se ilustra en la siguiente Figura.



Figura 3. 3 Equipo piloto empleado para producir los lodos necesarios para las pruebas de espesamiento.

Los volúmenes y corridas experimentales, necesarias para generar 4 L de lodo requeridos en las pruebas de espesamiento, fueron calculados a partir de los datos presentados en la Tabla 3.4, y se muestran a continuación.

Tabla 3. 10 Volumen de agua cruda necesaria para cada combinación Coagulante-floculante y número de corridas experimentales necesarias para generar el volumen necesario a utilizar en las pruebas de Espesamiento.

Turbiedad del Agua Cruda 205.33UNT		Volumen de Agua Cruda necesaria para generar 4L de lodo (L)	# de Corridas necesarias para generar 4L de lodo
Coagulante	Floculante		
Catiónico Clorhidrato -Al poliDADMAC	Catiónico PM alto Poliamina	932.4	10
Catiónico Clorhidróxido-Al poliDADMAC	Catiónico PM muy alto PoliDADMAC	1092.9	11
Catiónico Policloruro de Aluminio	Catiónico PM bajo Copolímero de acrilamida y ácido acrílico	129.1	2
Catiónico Polihidróxi-cloruro de aluminio	Catiónico PM bajo Poliamina	220.4	3
Catiónico $Al_2(SO_4)_3$ libre de Fe	Catiónico PM muy alto PoliDADMAC	226.0	3
Catiónico $Al_2(SO_4)_3$ Std.	Catiónico PM bajo Poliamina	268.6	3

Volumen_{H2O cruda} Procesado por corrida =100L

Los tiempos y velocidades de agitación aplicados en la prueba de coagulación-floculación, fueron los aplicados en el estudio realizado por Ramírez *et al.*, (2009). Estos valores se presentan en la Tabla 3.11.

Tabla 3. 11 Tiempos y velocidades de agitación para la generación del volumen necesario de lodos para realizar las pruebas de espesamiento.

Tiempo Requerido (m' s'')	Tiempo Acumulado (m' s'')	Velocidad de agitación (rpm)
		PP Los Berros
INICIO		300
ADICIÓN DEL COAGULANTE		
10'	10'	300
4' 40''	4' 50''	60
4' 40''	9' 30''	45
ADICIÓN DEL FLOCULANTE		
15' 00''	22' 30''	30
APAGADO DEL SISTEMA DE AGITACIÓN		
60'	82' 30''	0
VACIADO DEL LODO OBTENIDO A UN RECIPIENTE		
30'	112' 30''	Medición de Volumen de Lodos generado

Una vez obtenido el volumen necesario de lodos para realizar las pruebas de espesamiento, éste se homogeneizó perfectamente por mezclado, sin romper los flóculos.

3.2.2 PRUEBAS DE ESPESAMIENTO DE LODOS

De acuerdo con las recomendaciones ofrecidas por parte de los proveedores, se prepararon soluciones de espesante con una concentración de 0.05% en peso, mismas que no fueron almacenadas más de dos días a partir de haber sido preparadas. A continuación se muestra la secuencia seguida para la preparación de las mismas.

A continuación se muestra un diagrama ilustrativo de la metodología seguida para la preparación de las muestras de lodo con espesante para ser sometidas a la prueba REF.



Figura 3. 4 Técnica experimental de las pruebas de espesamiento de los seis tipos de lodos evaluados.

3.3 TÉCNICAS ANALÍTICAS

3.3.1 DETERMINACIÓN DE HUMEDAD Y SÓLIDOS TOTALES

Para cada combinación coagulante-floculante se emplearon dos cápsulas de porcelana, dos filtros Whatman GFA, 34 filtros Whatman No. 1 y 36 charolas de aluminio previamente identificadas para los anteriores filtros y dos para filtros Whatman No. 1.

La metodología seguida en el laboratorio para obtener los datos necesarios para calcular la humedad y sólidos totales se encuentra descrita en la Figura 3.5.

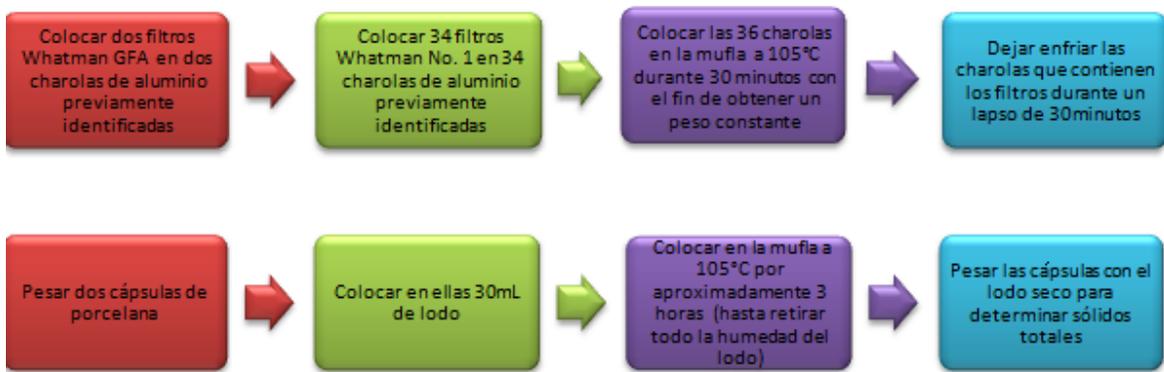


Figura 3. 5 Técnica analítica para determinar % de humedad y sólidos totales.

En el Anexo B se muestra la secuencia de cálculos, para que a partir de los datos obtenidos por esta metodología, evaluar el contenido de sólidos totales y de humedad, los cuales a su vez, son datos fundamentales para determinar el valor de REF.

3.3.2 PRUEBA REF –RESISTENCIA ESPECÍFICA A LA FILTRACIÓN

La Resistencia Específica a la Filtración (REF) es la resistencia que opone a la filtración una cantidad de lodo depositada en un área de la superficie filtrante. Esta prueba tiene gran utilidad para comparar las características de filtración de distintos lodos provenientes de plantas potabilizadoras y determinar las necesidades de tratamiento para producir una torta que ofrezca mínima resistencia y optimizar el funcionamiento de la deshidratabilidad del lodo (Sánchez *et al.*, 2000).

La resistencia específica (o coeficiente de filtrabilidad del lodo una presión diferencial de 0,5 bar) es una magnitud que es muy representativa de los lodos. El objetivo del acondicionamiento es reducir la resistencia a fin de acelerar la filtración (Degrémont, 2009).

En el laboratorio, la prueba consiste en la filtración de un volumen (V) dado de lodo bajo una presión de vacío hasta que la torta es formada y no se puede filtrar más, posteriormente se quiebra como resultado de una caída de presión (ΔP). Un aparato sencillo de embudo Büchner es el método más utilizado para determinar la REF (Figura 3.6).

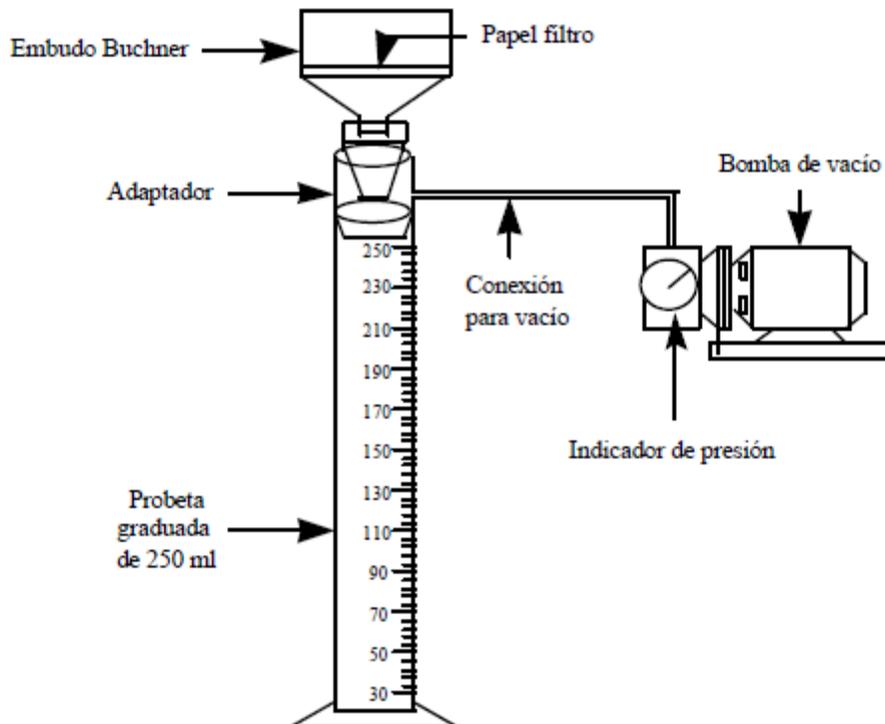


Figura 3. 6 Figura Esquemática del equipo para realizar prueba REF

La REF tiene ventajas sobre otras pruebas, una de ellas es la independencia de la concentración de los sólidos en el lodo y otra es la facilidad de aplicación a cualquier tipo de lodo. El cálculo de la REF está dado por la siguiente ecuación:

$$r = \frac{2PA^2b}{\mu c}$$

Donde:

r = Resistencia específica a la filtración (cm/g)

P = Presión de vacío aplicada (dina/cm² = g/cm s²)

A = Área del papel filtro (cm²)

b = Pendiente de la línea (t/V) vs V(s/cm⁶)

μ = Viscosidad del filtrado (poise = g/cm s)

c = Concentración de sólidos totales por volumen de filtrado (g/cm³).

La figura 3.7 esquematiza el procedimiento de realización de REF



Figura 3. 7 Procedimiento de la prueba de Resistencia Específica a la Filtración (REF) de lodos.

A continuación se presenta un registro fotográfico simplificado de la metodología experimental, el Anexo C presenta un registro fotográfico más completo de las pruebas de espesamiento y de resistencia específica a la filtración de lodos.



Fotografía 3.1 Coagulación-floculación para la obtención del lodo.



Fotografía 3.2 Obtención del lodo homogeneizado



Fotografía 3.3 Preparación de los espesantes.



Fotografía 3.4 Agitación del lodo con espesante



Fotografía 3.5 Muestras de lodo con su respectiva dosis



de espesante.



Fotografía 3.7 Adición del lodo al equipo REF.

Fotografía 3.6 Montaje del sistema de vacío.



Fotografía 3.8 Formación de la torta.



Fotografía 3.9 Medición del volumen de filtrado.



Fotografía 3.10 Filtros con torta húmeda.



Fotografía 3.11 Filtros y cápsulas con muestra de lodo para SST.



Fotografía 3.12 Registro de datos de la prueba REF.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo de resultados experimentales y la discusión de los mismos está dividido en cuatro secciones: en la primera de ellas se discute la influencia del tipo de lodo sobre el proceso de espesamiento. En la segunda sección se evalúa y discute la influencia de la carga del espesante sobre el proceso de espesamiento de los lodos. En la tercera sección se realiza una evaluación técnico económica de cada producto espesante con las diferentes combinaciones de coagulante-floculante, para finalmente en la última sección, seleccionar la dosis y espesantes más eficientes para ser empleados en el proceso de espesamiento de lodos generados con agua cruda de una planta potabilizadora.

Con el fin de facilitar el manejo de datos, se codificó a cada tipo de lodo (proveniente de cada combinación coagulante-floculante que se utilizó) con un número, la tabla siguiente muestra el número con el cual se identificó a cada tipo de lodo (combinación coagulante-floculante).

Tabla 4. 1 Codificación de tipos de lodo generados a partir de seis combinaciones aplicadas de coagulante-floculante al agua cruda de presas.

Tipo de lodo	Par Coagulante-Floculante	
	Coagulante	Floculante
1	Catiónico Clorhidrato -Al poliDADMAC	Catiónico PM alto Poliamina
2	Catiónico Policloruro de Aluminio	Catiónico PM bajo Copolímero de acrilamida ácido acrílico
3	Catiónico Clorhidróxido-Al poliDADMAC	Catiónico PM muy alto PoliDADMAC
4	Catiónico Polihidróxi-cloruro de aluminio	Catiónico PM bajo Poliamina
5	Catiónico $Al_2(SO_4)_3$ libre de Fe	Catiónico PM muy alto PoliDADMAC
6	Catiónico $Al_2(SO_4)_3$ Estándar	Catiónico PM bajo Poliamina

1.1 INFLUENCIA DEL TIPO DE LODO EN EL PROCESO DE ESPESAMIENTO

Durante el desarrollo de este trabajo se generaron seis diferentes tipos de lodo (provenientes cada uno de una combinación diferente de coagulante-floculante), cada uno de éstos posee propiedades intrínsecas de espesamiento y de deshidratación, por lo cual en el presente apartado se desarrolla un análisis de la influencia del tipo de lodo en el proceso de espesamiento a partir de una comparación de los valores obtenidos en las pruebas REF en las diferentes dosis aplicadas.

Se presentan a continuación gráficas del Valor de REF vs Tipo de lodo, para cada dosis aplicada. Las tablas de datos de las pruebas REF realizadas se encuentran en el anexo D del presente trabajo escrito.

Las figuras 4.1-4.4 ilustran el comportamiento del valor de REF respecto del tipo de lodo, el blanco en cada figura muestra el comportamiento del lodo sin espesante, lo cual establece un punto de comparación entre éste y el lodo sometido a diferentes dosis de espesante.

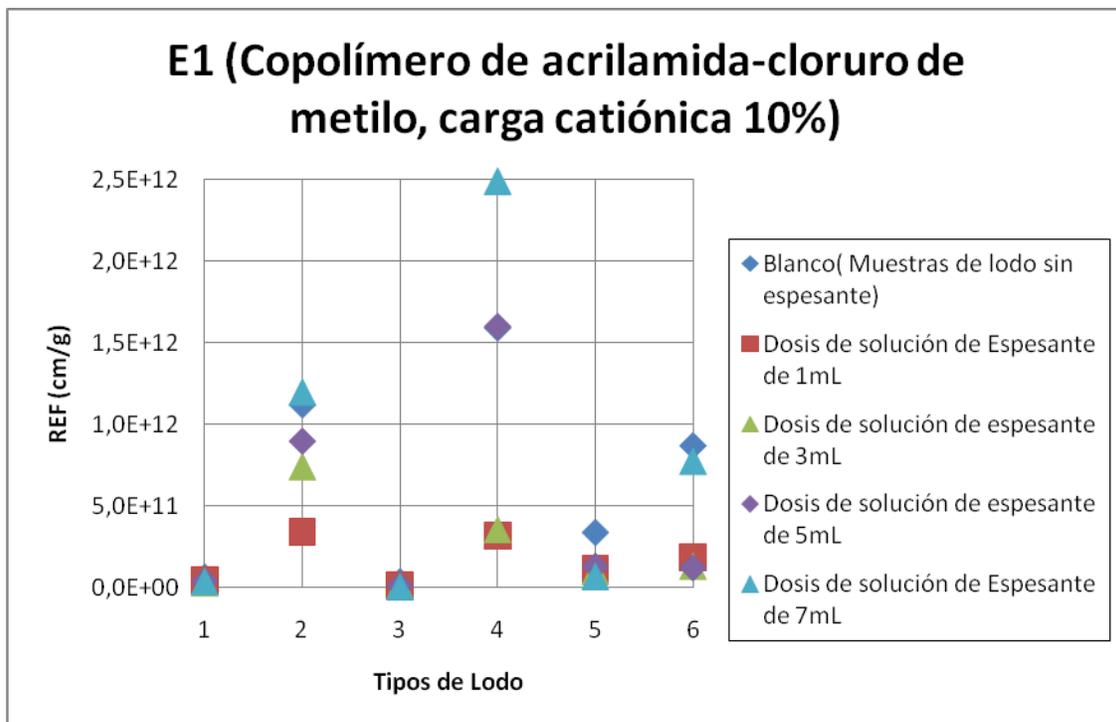


Figura 4. 1 Comportamiento del valor de REF para los diferentes tipos de lodos a distintas dosis de espesante E1 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo, Carga catiónica 10%).

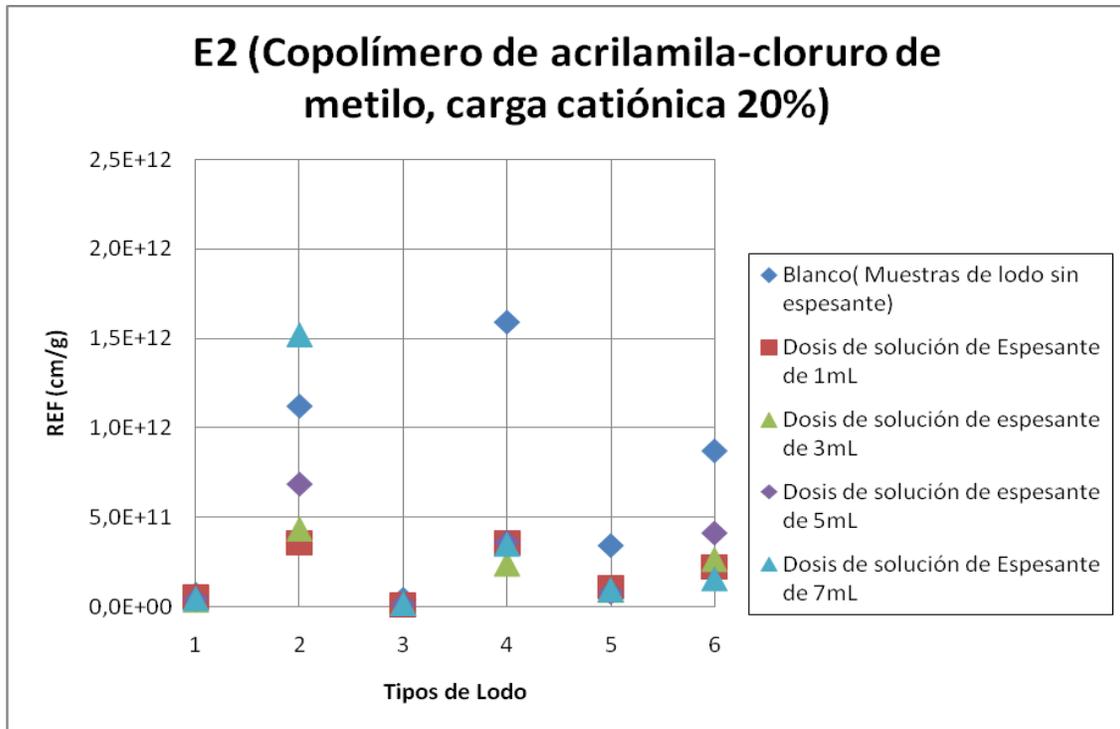


Figura 4. 2 Comportamiento del valor de REF para los diferentes tipos de lodos a distintas dosis de espesante E2 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo, Carga catiónica 20%).

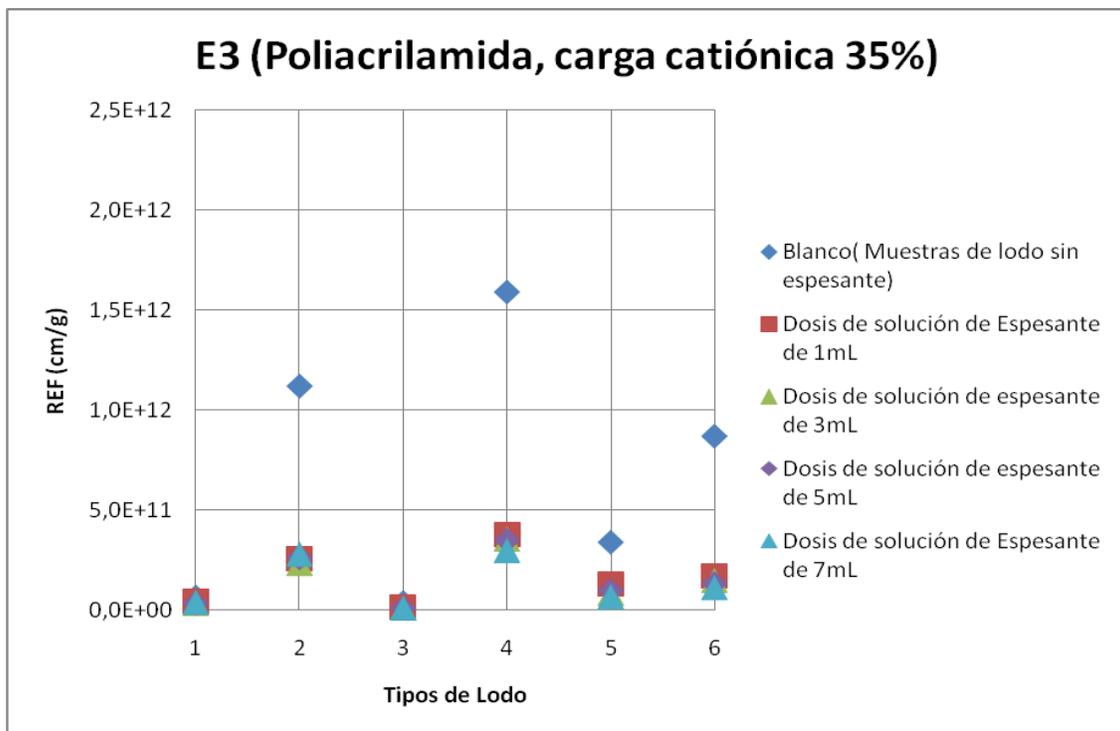


Figura 4. 3 Comportamiento de valor de REF para los diferentes tipos de lodos a distintas dosis de espesante E3 (poliacrilamida, Carga catiónica 35%).

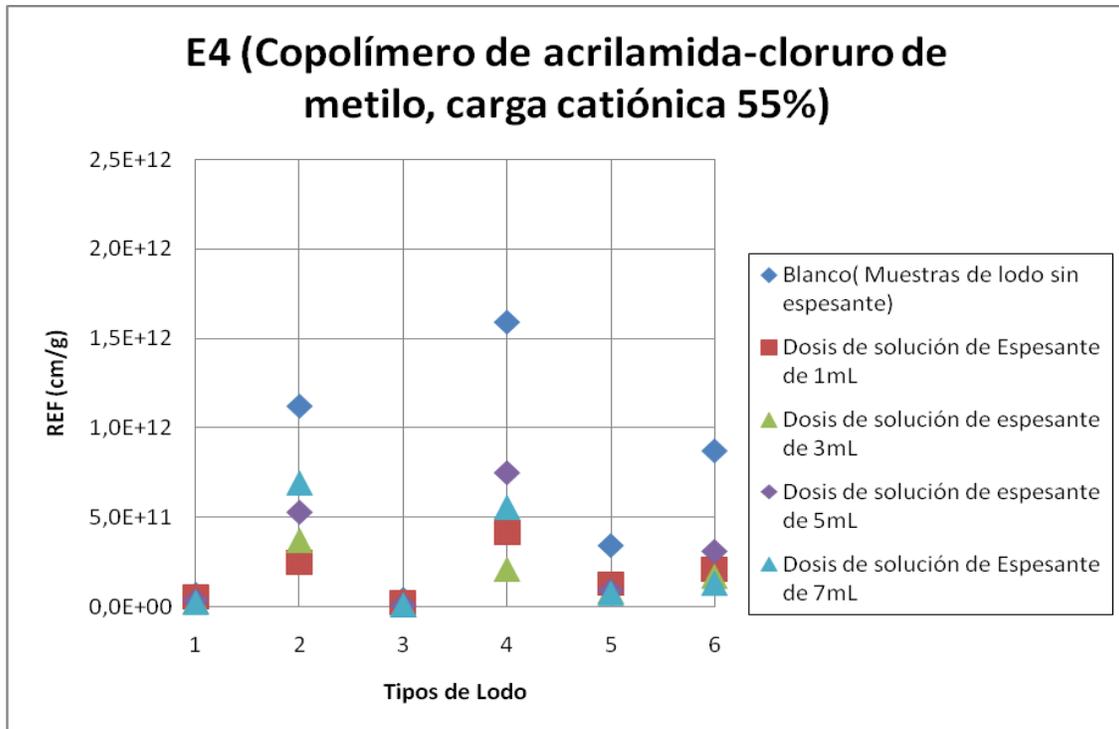


Figura 4. 4 Comportamiento de valor de REF para los diferentes tipos de lodos a distintas dosis de espesante E4 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo, Carga catiónica 55%).

A partir de la información ilustrada en las figuras 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 es posible concluir que los lodos que intrínsecamente presentaron mejor capacidad de espesamiento fueron el lodo tipo 1 (producido por la combinación Coagulante-Floculante: Clorhidrato-Al y PoliDADMAC- Poliamida) y 3 (Polihidróxido-Al y poliDADMAC / Copolímero de acrilamida y Ácido Acrílico) debido a que sin espesante, es decir, lodo denominado blanco, presentaron los valores de REF más bajos de los seis tipos de lodos evaluados. En contraste, los valores de REF más altos fueron obtenidos para el lodo generado por la combinación 4 de Co/FI (Polihidróxicloruro de Aluminio/Poliamida), siendo esta combinación la que posee intrínsecamente las peores características de espesamiento respecto a los lodos obtenidos con el resto de las combinaciones.

Con los valores de REF obtenidos para los blancos fue posible ordenar los lodos en orden decreciente, quedando de la siguiente manera:

Lodo 3 >Lodo 1>Lodo 5>Lodo 6>Lodo 2>Lodo 4

Ordenados en función de la combinación Co/FI utilizado para obtenerlos:

- 1) Coagulante Clorhidróxido-Al poliDADMAC/Floculante PoliDADMAC.
- 2) Coagulante Clorhidrato-Al poliDADMAC/Floculante Poliamina.
- 3) Coagulante Sulfato de Aluminio libre de Fe/Floculante poliDADMAC.
- 4) Coagulante Sulfato de Aluminio estándar/Floculante Poliamina.
- 5) Coagulante Policloruro de Aluminio/Floculante copolímero de acrilamida-ácido acrílico.
- 6) Coagulante Polihidróxicloruro de Aluminio/Floculante Poliamida.

De lo anterior es posible determinar que los lodos que obtuvieron menores valores de REF (y por ende mejores características de espesamiento) fueron los obtenidos a partir de combinaciones Co/FI donde se utilizaron floculantes de alto o muy alto peso molecular, mientras que los resultados más altos de REF fueron obtenidos por combinaciones Co/FI donde el floculante poseía bajo peso molecular.

De acuerdo al listado anterior, los lodos generados por coagulantes o floculantes que contenían el grupo poliDADMAC (cuya estructura es ilustrada en la figura 4.5), fueron los que presentaron mejores características de espesamiento al presentar menores valores de REF, lo cual se esperaba al tener la mejor consistencia y solidez de flóculo.

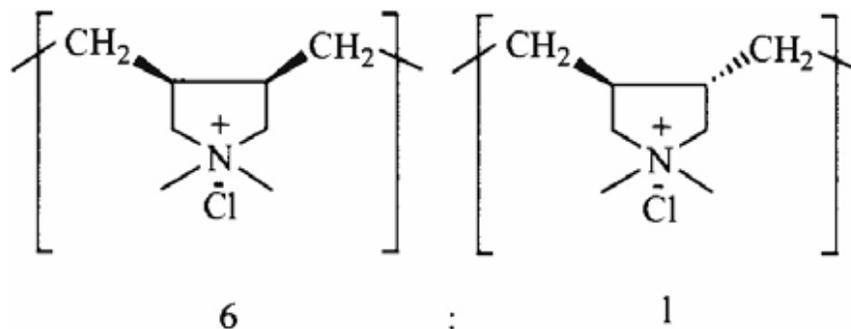


Figura 4. 5 Estructura química del PoliDADMAC (Binghui, *et al.*, 2006)

Según un estudio realizado por Haijing, *et al.*, (2007), los lodos generados a partir de grupos PoliDADMAC, poseen una rápida tasa de sedimentación cuando la dosis es inferior a 0,3 mg / L, esto es atribuido a la alta densidad de PoliDADMAC catiónico, ya que incluso a baja concentración, su neutralización funciona bien en las partículas negativas dispersas en el agua (Haijing, *et al.*, 2007).

Se observa también de acuerdo a la tabla 4.2 que los lodos con mejores características de espesamiento (menores valores de REF) fueron los de mayor contenido de sólidos totales, lo cual era esperado, ya que al estar más concentrado un lodo, habrá más partículas capaces de interaccionar y formar flóculos robustos (Sandoval, *et al.*, 1998).

Tabla 4. 2 Contenido de sólidos totales en los seis tipos de lodos sometidos a estudio.

Tipo de lodo	Lodo 1	Lodo 2	Lodo 3	Lodo 4	Lodo 5	Lodo 6
Contenido de Sólidos Totales (g/L)	95.93	11.13	88.82	9.36	29.10	16.24

1.2 INFLUENCIA DE LA DOSIS DE ESPESANTE EN EL PROCESO DE ESPESAMIENTO

Debido a la diferencia de valores de REF entre los lodos, y con el fin de determinar el comportamiento de los mismos, las figuras REF Vs dosis de espesante se dividieron en dos grupos, el grupo 1 conformado por los lodos 1, 3 y 5, los cuales presentan los valores de REF más bajos (correspondientes a las figuras 4.6, 4.7, 4.8 y 4.9) ; y el grupo 2 conformado por los lodos 2, 4 y 6, los cuales presentaron los mayores valores de REF (correspondientes a las figuras 4.10, 4.11, 4.12 y 4.13).

Estas gráficas muestran la influencia que presentó la dosis de espesante sobre el valor de la REF, para cada uno de los espesantes y tipos de lodos. En estas figuras, se esperaba observar que, al aumentar la dosis de espesante disminuyera cada vez más el valor de REF, sin embargo no fue así, ya que el valor de REF

alcanza un valor mínimo para después mantenerse constante o aumentar. El primer fenómeno se observa en los lodos (1, 3 y 5) provenientes de coagulantes o floculantes que contenían poliDADMAC, esto se atribuye a que los lodos generados por el reactivo poliDADMAC poseen consistencia y solidez de flóculo debido a la alta densidad y alto peso molecular del reactivo, lo cual “contrarresta el efecto de “reestabilización” en bajas dosis de reactivo (Haijing, *et al.*, 2007).

El segundo fenómeno se puede atribuir a que si se agrega un exceso de polielectrolito espesante, se crea un proceso de “reestabilización” de las partículas, lo cual resulta en el aumento de REF y, por lo tanto, en una influencia negativa en el proceso de espesamiento del lodo. (Ramalho *et al.*, 1996)

El punto mínimo de cada curva representa entonces la dosis de espesante para la cual el lodo presenta la menor resistencia específica a la filtración, este punto es resaltado en cada figura por una línea roja vertical.

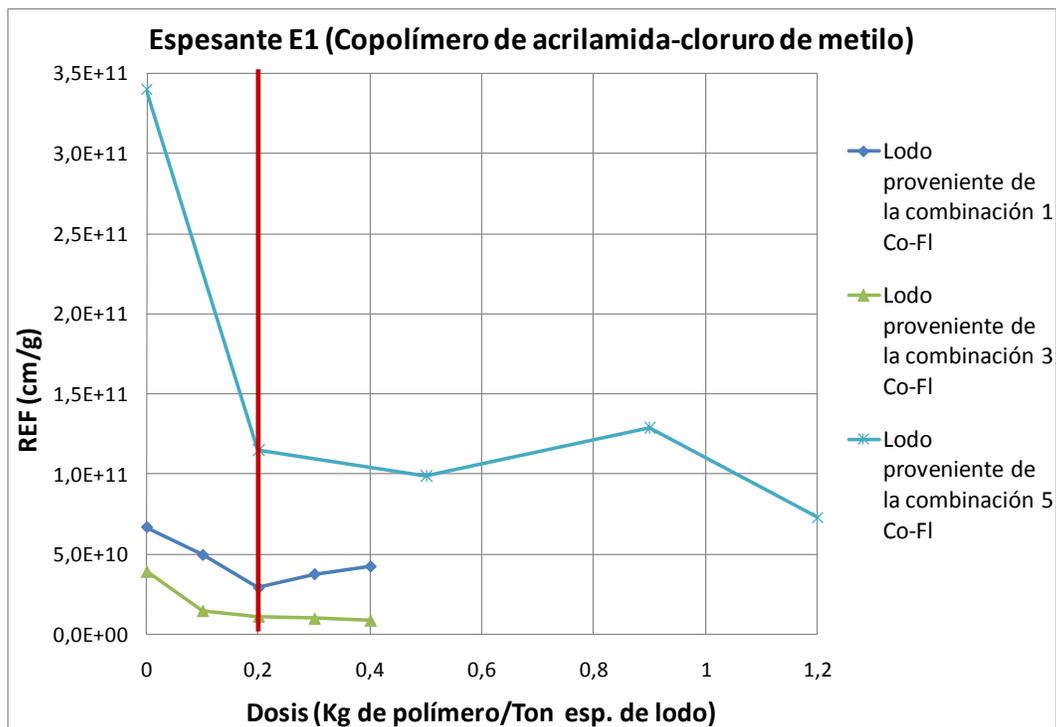


Figura 4. 6 Valores de REF para el grupo 1 de lodo en función de la dosis aplicada de espesante E1 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo, Carga catiónica 10%).

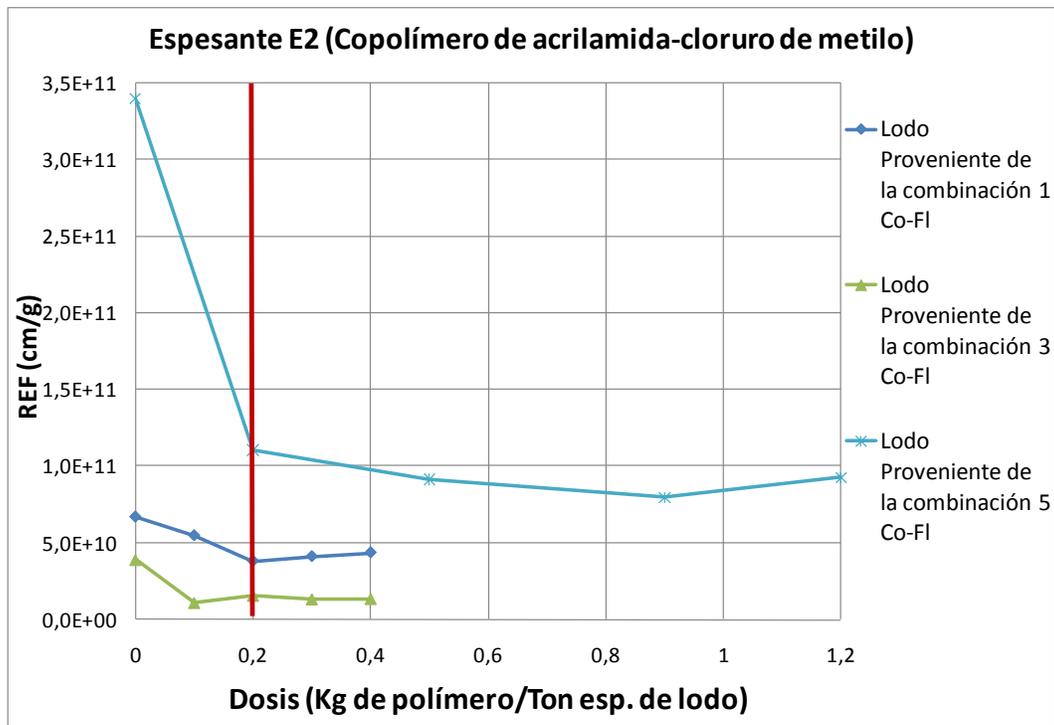


Figura 4. 7 Valores de REF para el grupo 1 de lodos en función de la dosis aplicada de espesante E2 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo, Carga catiónica 20%).

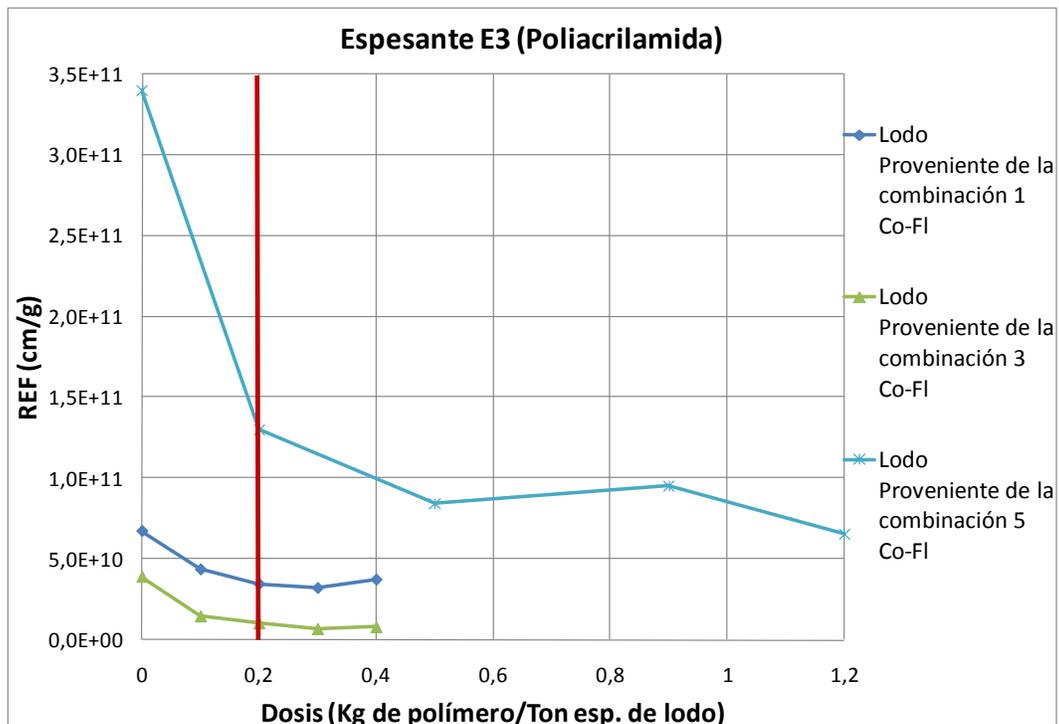


Figura 4. 8 Valores de REF para el grupo 1 de lodos en función de la dosis aplicada de espesante E3 (poliacrilamida, Carga catiónica 35%).

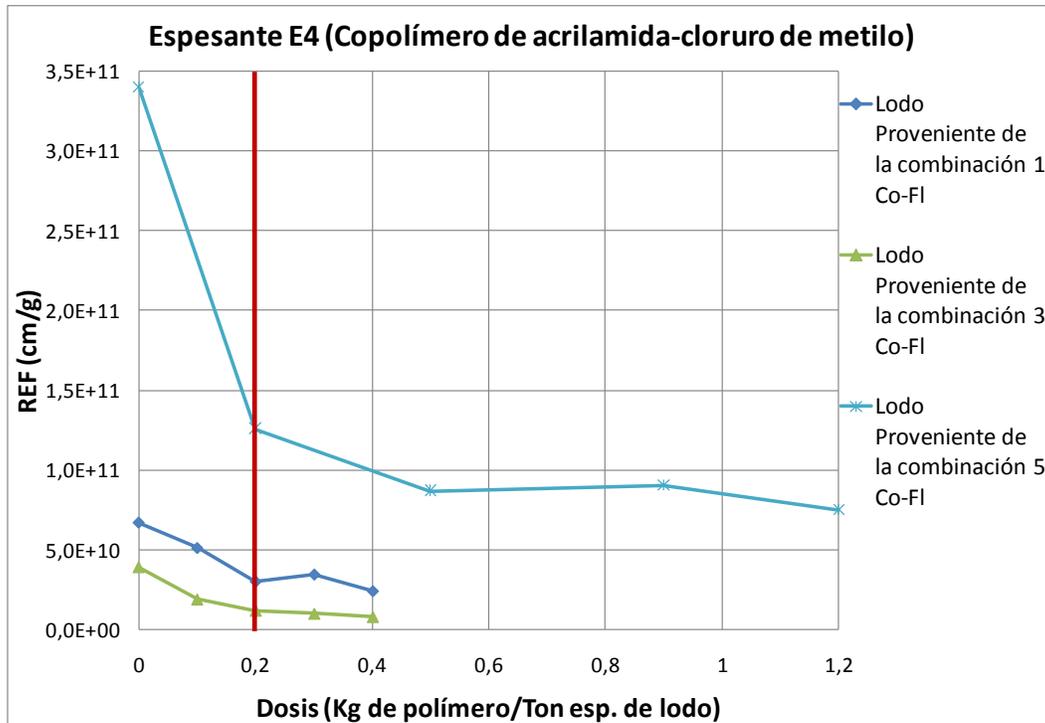


Figura 4. 9 Valores de REF para el grupo 1 de lodos en función de la dosis aplicada de espesante E4 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo, Carga catiónica 55%).

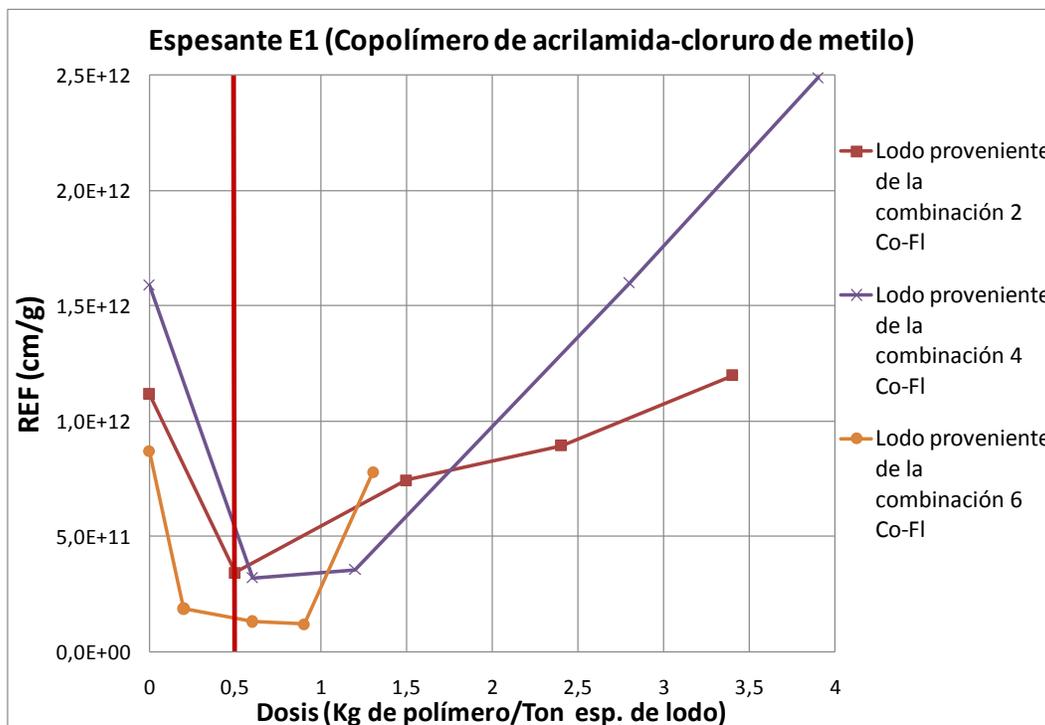


Figura 4. 10 Valores de REF para el grupo 2 de lodos en función de la dosis aplicada de espesante E1 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo, Carga catiónica 10%).

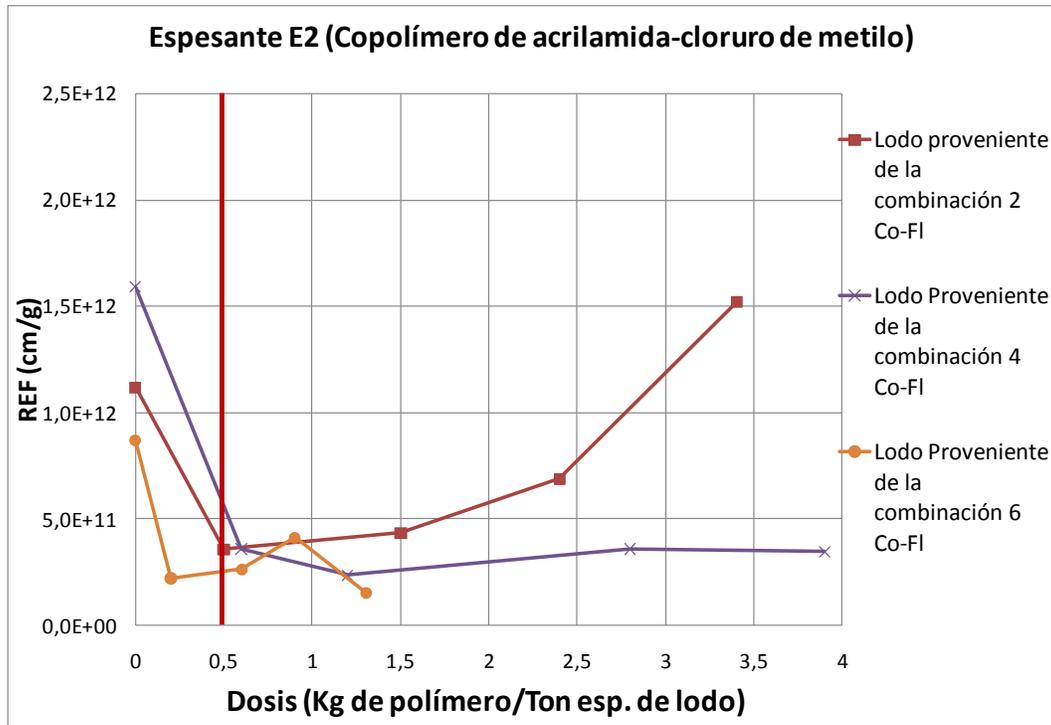


Figura 4. 11 Valores de REF para el grupo 2 de lodos en función de la dosis aplicada de espesante E2 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo, Carga catiónica 20%).

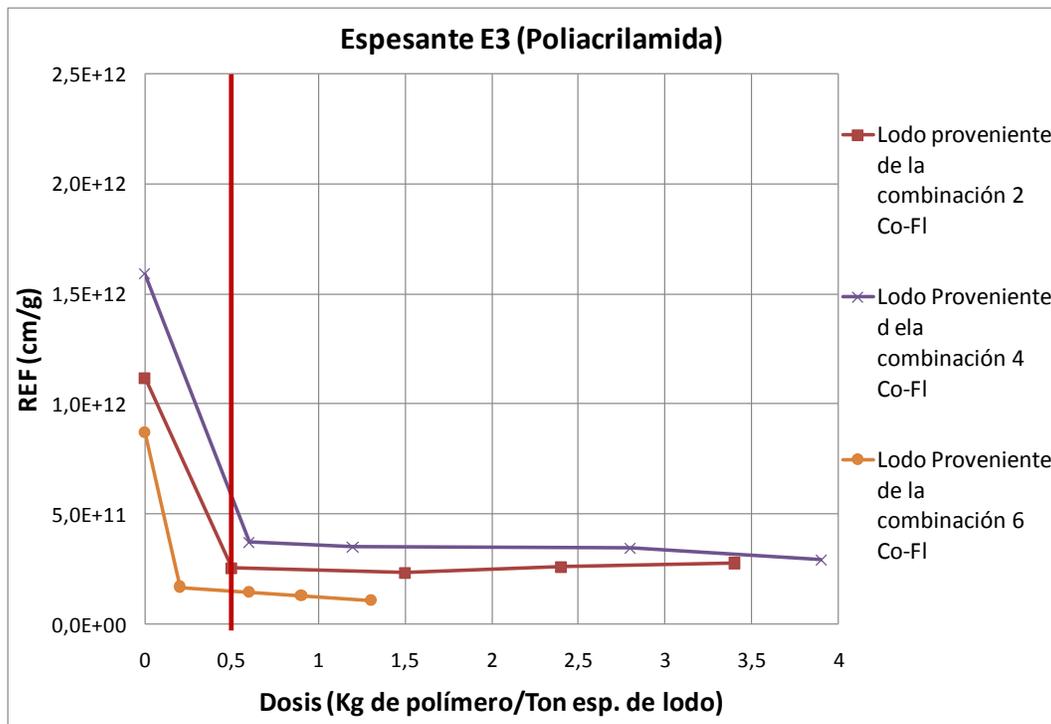


Figura 4. 12 Valores de REF para el grupo 2 de lodos en función de la dosis aplicada de espesante E3 (poliacrilamida, Carga catiónica 35%).

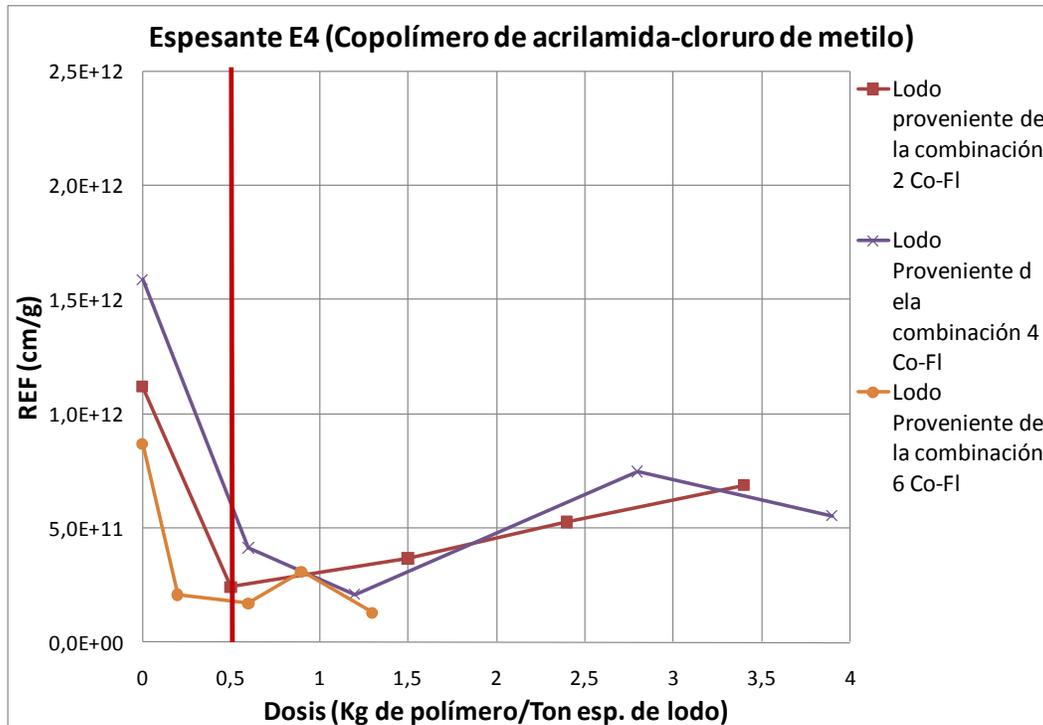


Figura 4. 13 Valores de REF para el grupo 2 de lodos en función de la dosis aplicada de espesante E4 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo, Carga catiónica 55%).

Durante la experimentación se observó que, al aumentar la dosis de polielectrolito espesante aumentaba el tamaño del flóculo, y los filtros se colmataban más fácilmente, provocando un aumento en el valor de REF; de lo anterior se deduce que, al trabajar con dosis muy altas de polielectrolito espesante, se provoca un efecto negativo en el proceso de espesamiento de un lodo, ya que al colmatar más fácilmente los filtros provocará un mayor valor de REF (resistencia del lodo a ser filtrado) y, por ende, un mayor gasto de energía en el proceso de deshidratación del lodo espesado.

Es posible observar que las figuras REF vs dosis de espesante (4.6-4.13) presentan un comportamiento cóncavo, alcanzando un valor mínimo de REF (que corresponde a la dosis que confiere mejores características de espesamiento al lodo) para luego aumentar, dicho comportamiento concuerda con lo reportado en literatura (Zhao y Bache, 2002; Zhao, 2003)

En las figuras 4.6-4.9 se observa que para los lodos 1, 3 y 5 los mejores valores de REF fueron obtenidos con bajas dosis de espesante (0.2 kg de polielectrolito / ton de lodo en base seca), por otro lado para los lodos 2, 4 y 6 (figuras 4.10-4.13) los mejores valores de REF fueron obtenidos a dosis de 0.5 kg/ton de lodo en base seca, lo cual concuerda con lo reportado en literatura (Haijing, *et al.*, 2007).

Por una parte, lodos provenientes de la combinación 1 (Coagulante Clorhidrato-Al-PoliDADMAC-Floculante Poliamida) y de la 3 (Coagulante Polihidróxido-Al poliDADMAC -Floculante Copolímero de acrilamida, Ácido Acrílico) poseen los valores más bajos de REF. Se observa que la tendencia de las curvas es prácticamente una línea recta después de alcanzar un valor mínimo (es decir el valor de REF no difiere significativamente entre el blanco y los distintos lodos espesados con distintas dosis de polielectrolito), para estos lodos una dosis de 0.3 kg de polielectrolito/ton de lodo en base seca fue suficiente para alcanzar el valor mínimo de REF.

Por otra parte, se observa que los lodos que aumentaron de manera más brusca el valor de REF, después de alcanzar el mínimo, fueron los correspondientes a la combinación Co/FI No. 2 (Coagulante Policloruro de Aluminio-floculante Copolímero de Acrilamida, ácido acrílico) y 4 (Coagulante Polihidróxicloruro de aluminio – Floculante Poliamina), siendo estas combinaciones las que presentaron los mayores valores de REF para las distintas dosis de espesante empleado.

Algunos estudios han demostrado que, las poliaminas ramificadas son más eficientes que la poliamina lineal, debido a la mayor densidad de carga (Haijing, *et al.*, 2007).

De manera adicional, se observó en las pruebas de esta tesis de licenciatura que flóculos más grandes y de mayor densidad se presentaron cuando se aplicaron las dosis más elevadas de espesante, sin embargo a dosis bajas se observaron flóculos más compactos, lo cual concuerda también con lo reportado en bibliografía (Zhao, 2003).

4.3 INFLUENCIA DE LA CARGA DEL ESPESANTE SOBRE EL PROCESO DE ESPESAMIENTO DE LODOS

El valor de la carga del polielectrolito utilizado en el proceso de espesamiento de lodos, es también un factor que influye en la efectividad de este proceso. Como ya se mencionó en la metodología experimental de este estudio, los espesantes utilizados presentaron carácter catiónico con diferentes valores de cargas (10%, 20%, 35% y 55%). Este apartado pretende hacer un análisis comparativo entre los resultados de espesamiento obtenidos por cada una de los distintos valores de carga catiónica en las pruebas; con este fin se elaboraron gráficos para cada tipo de lodo (Figuras 4.14 a 4.19) en los que se esquematiza la relación que existe entre los valores de REF y el valor de la carga catiónica, para cada una de las dosis utilizadas de espesante.

En la tabla 4.3 se muestran los valores de carga catiónica de cada uno de los espesantes empleados.

Tabla 4. 3 Carga catiónica reportada por los proveedores para cada espesante.

Espesante	Carga Catiónica (%)
E1 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo)	10
E2 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo)	20
E3 (poliacrilamida)	35
E4 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo)	55

En los esquemas 4.14, 4.15, 4.16, 4.17, 4.18 y 4.19 se gráfica el valor de REF para cada carga iónica, marcando con una línea roja vertical, la carga catiónica que proporcionó para cada lodo menores valores de REF.

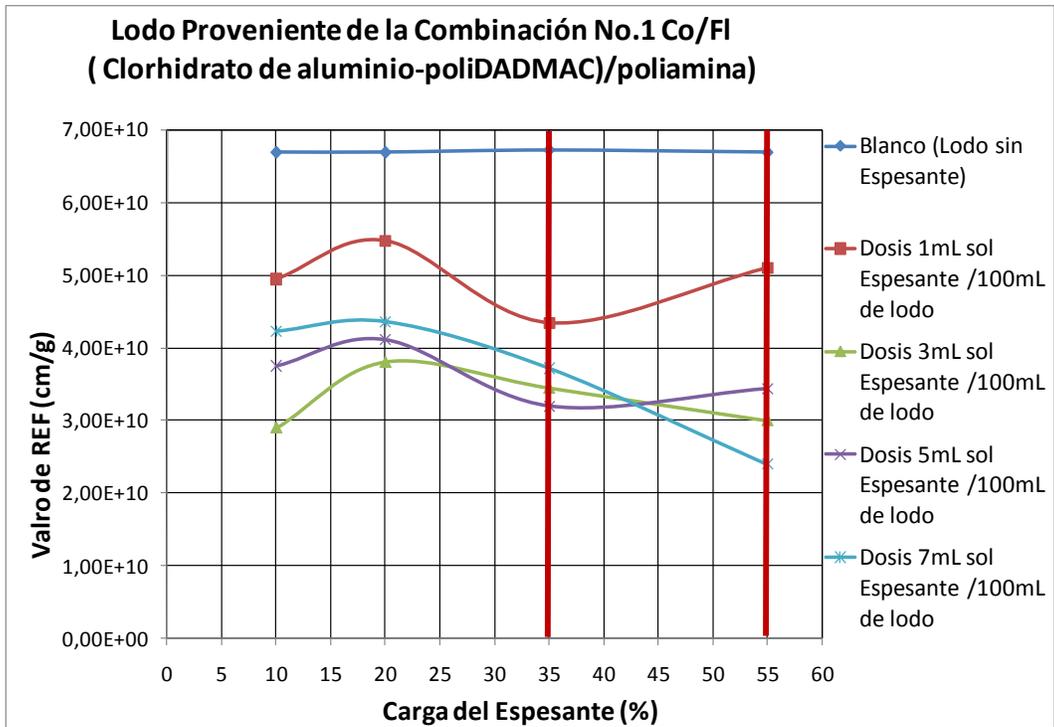


Figura 4. 14 Valores de REF en función de la carga catiónica de espesante para un lodo generado por la Combinación Co/FI No. 1 (Clorhidrato de aluminio-poliDADMAC/poliamida).

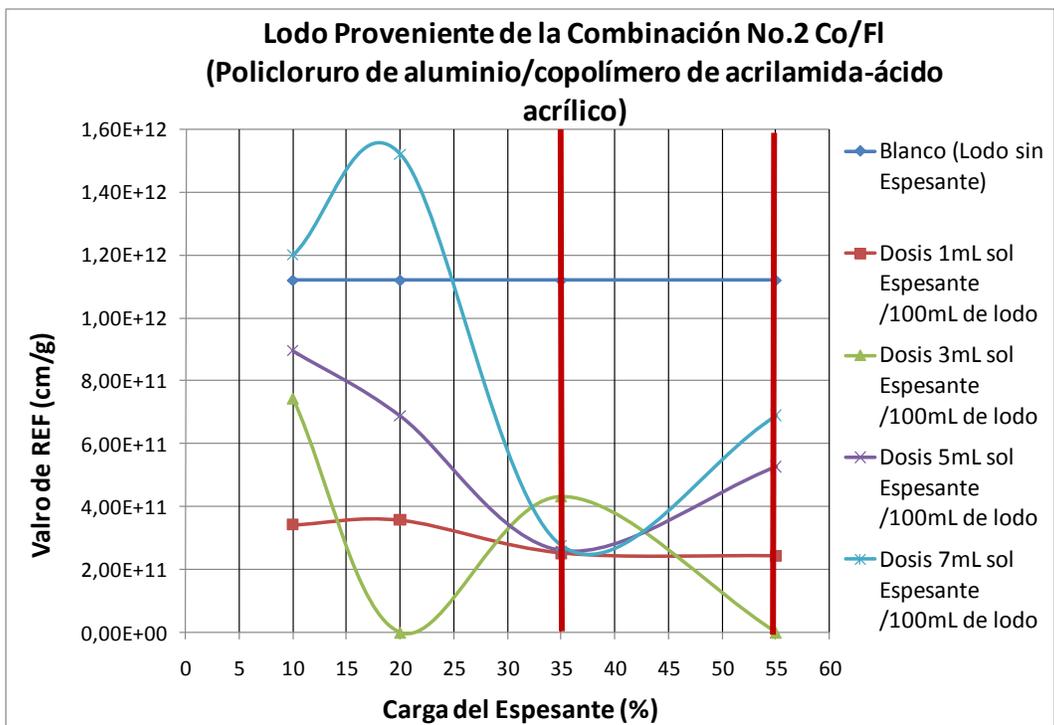


Figura 4. 15 Valores de REF en función de la carga catiónica de espesante para un lodo generado por la Combinación Co/FI No.2 (Policloruro de aluminio/copolímero de acrilamida-ácido acrílico).

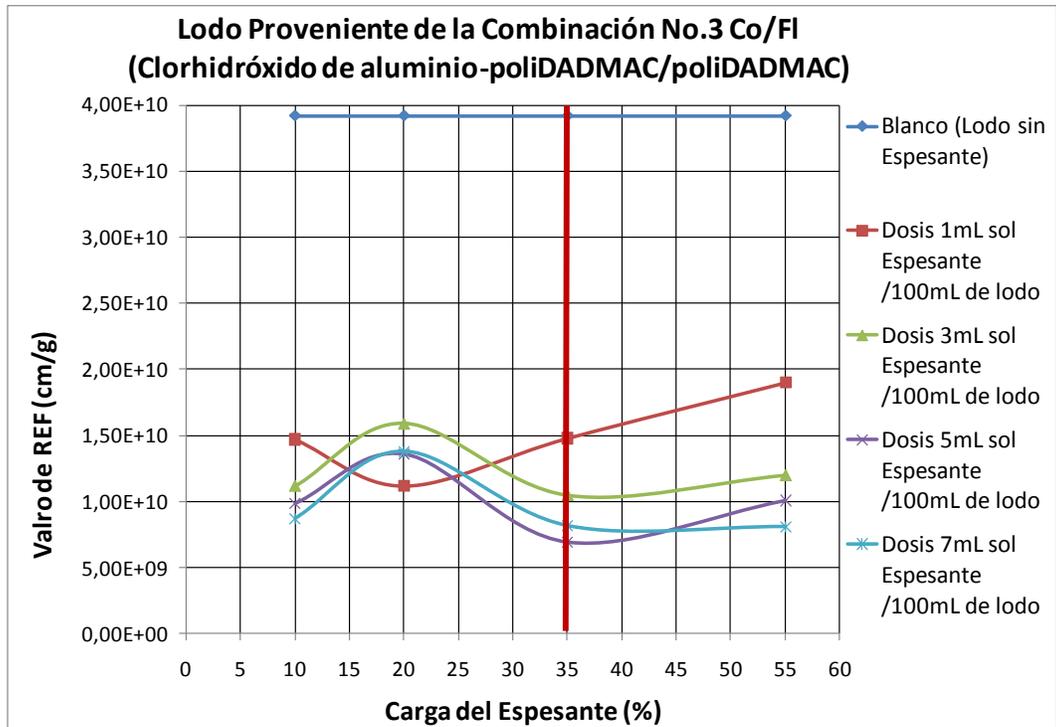


Figura 4. 16 Valores de REF en función de la carga catiónica de espesante para un lodo generado por la Combinación Co/FI No.3 (Clorhidróxido de aluminio-poliDADMAC/poliDADMAC).

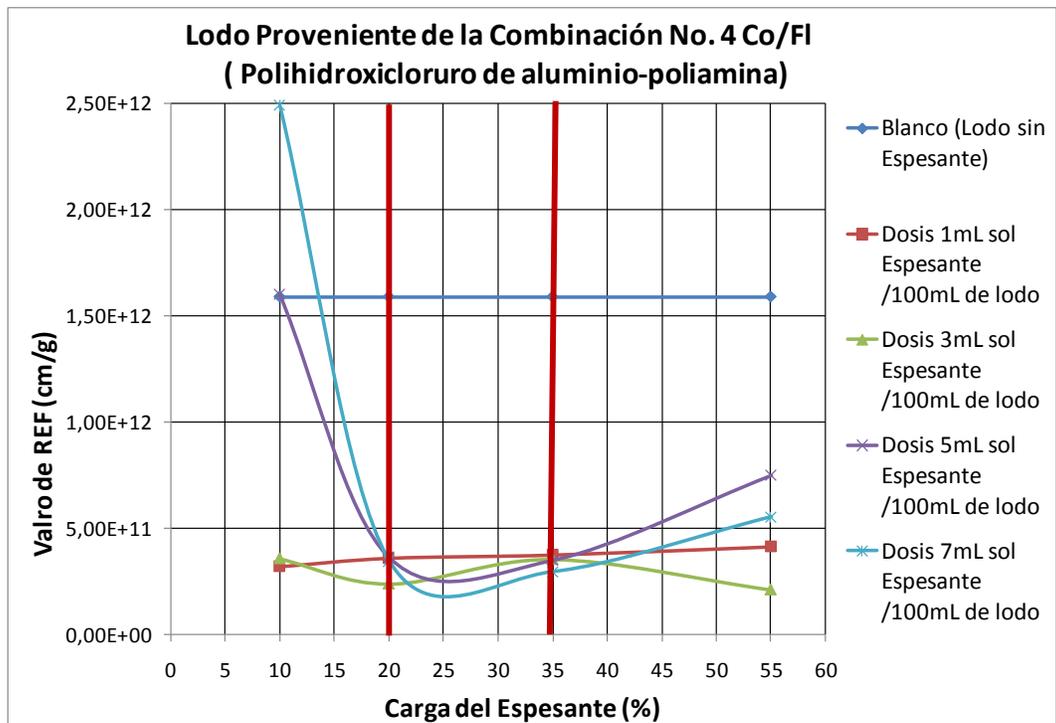


Figura 4. 17 Valores de REF en función de la carga catiónica de espesante para un lodo generado por la Combinación Co/FI No.4 (Polihidróxicloruro de aluminio/poliamina).

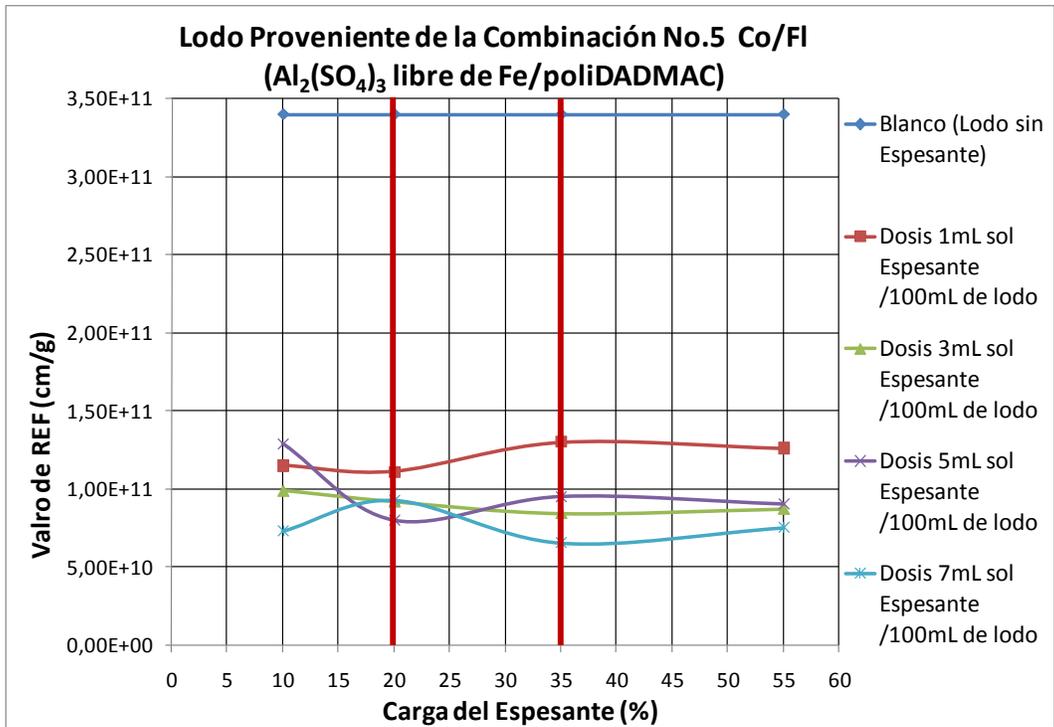


Figura 4. 18 Valores de REF en función de la carga catiónica de espesante para un lodo generado por la Combinación Co/FI No.5 ($Al_2(SO_4)_3$ libre de Fe/polidADMAC).

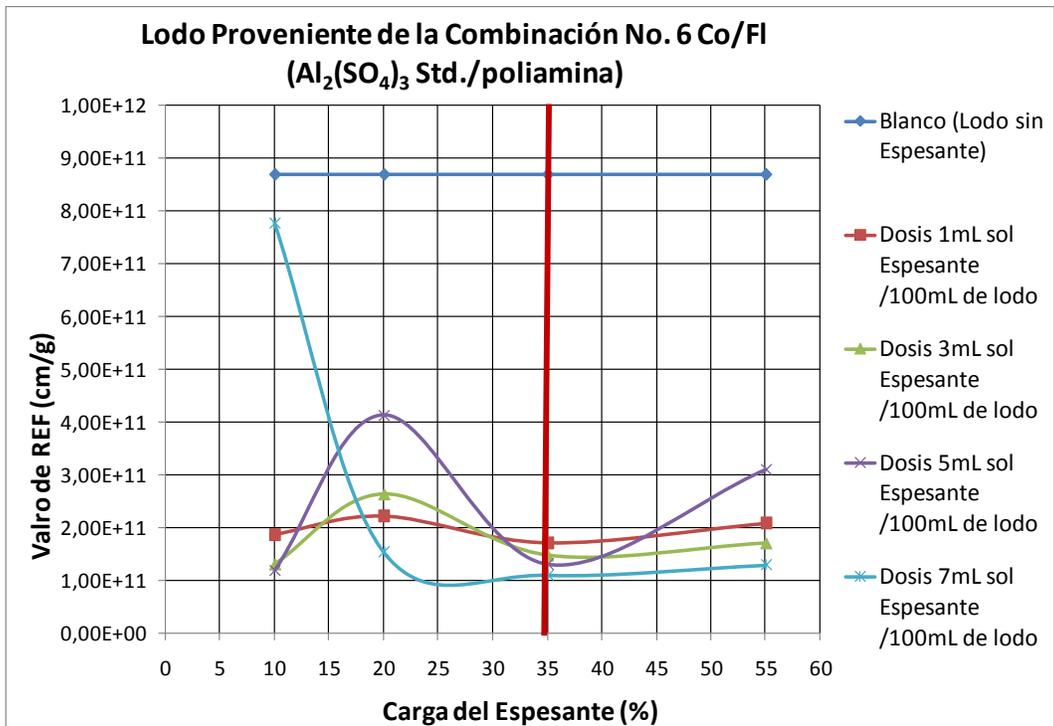


Figura 4. 19 Valores de REF en función de la carga catiónica de espesante para un lodo generado por la Combinación Co/FI No.6 ($Al_2(SO_4)_3$ estándar /poliamina).

Es posible observar en las figuras 4.14, 4.15, 4.16, 4.17, 4.18 y 4.19 que las curvas de REF en función de la carga de espesante presentan un comportamiento cóncavo, teniendo un mínimo de la REF en el valor adecuado de carga catiónica para cada dosis de espesante y cada tipo de lodo. Se observa que espesantes con valores medios de carga catiónica (35%) fueron suficientes para la mayoría de las dosis aplicadas a los distintos lodos, aunque en algunos casos se reportan menores valores de REF para cargas de espesante catiónico del 55%, la literatura reporta que aquellos lodos con un alto contenido de materia volátil suspendida frecuentemente requieren polielectrolitos fuertemente catiónicos y altos pesos moleculares, por lo cual este resultado era esperado.

Una simplificación de la prueba de REF es el tiempo de filtración (TF), éste se realiza con el mismo equipo utilizado para determinar la REF. Los únicos datos que se registran son el volumen inicial y el tiempo requerido para que se filtre la mitad del volumen de lodo utilizado (Sandoval *et al.*, 2000).

La tabla 4.4 muestra los mejores resultados de REF para las seis combinaciones Coagulante-Floculante-Espesante, así como los valores de humedad, en dicha tabla es posible observar que el mejor resultado fue el presentado por la combinación Co/FI/E Clorhidrato de aluminio-poliDADMAC/Poliamina/Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo con una dosis de 0.3 kg /ton de lodo crudo en base seca

Tabla 4. 4 Mejores Resultados de REF y % de Humedad y su combinación Coagulante- Floculante-Espesante.

Tipo de lodo	Combinación de Coagulante- Floculante		Espesante	Carga Catiónica del espesante	Dosis (kg polímero/ton de lodo crudo en base seca)	REF (cm/g)	Humedad (%)
	Coagulante	Floculante					
1	Catiónico Clorhidrato -Al poliDADMAC	Catiónico PM alto Poliamina	E4 (Copolímero de acrilamida- cloruro de metilo)	55%	0.30	4.33E+09	58.21
2	Catiónico Policloruro de Aluminio	Catiónico PM bajo Copolímero de acrilamida acido acrílico	E3 (poliacrilamida)	35%	1.45	2.33E+11	71.92
3	Catiónico Clorhidróxido-Al poliDADMAC	Catiónico PM muy alto PoliDADMAC	E3 (poliacrilamida)	35%	0.30	8.97E+09	56.89
4	Catiónico Polihidróxi-cloruro de aluminio	Catiónico PM bajo Poliamina	E4 (Copolímero de acrilamida- cloruro de metilo)	55%	1.20	2.10E+11	74.70
5	Catiónico Al ₂ (SO ₄) ₃ libre de Fe	Catiónico PM muy alto PoliDADMAC	E3 (poliacrilamida)	35%	1.20	6.54E+10	70.93
6	Catiónico Al ₂ (SO ₄) ₃ Std.	Catiónico PM bajo Poliamina	E3 (poliacrilamida)	35%	1.30	1.10E+11	74.73

4.4 EVALUACIÓN DE FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA

4.4.1 MATRIZ DE DECISIÓN MULTICRITERIO

Con el fin de realizar una selección correcta de la combinación coagulante-floculante-espesante más adecuada, se realizó una evaluación de factibilidad técnico-económica de las diferentes combinaciones coagulante/floculante/espesante (Co/FI/E) utilizadas en este trabajo. Como resultado de esa estimación se determinaron las dos mejores combinaciones de coagulante-floculante y espesante, con base en una Matriz de Decisión Multicriterio (MDM) en la cual se usaron factores tanto técnicos como económicos, dicha matriz arroja evaluaciones numéricas de las distintas combinaciones, las cuales van de 0 a 100, siendo 100 la mejor calificación arrojada por dicha matriz, los cálculos realizados en esta matriz se explican más ampliamente en el apéndice E.

Para establecer la MDM, se estableció la ponderación descrita en la tabla 4.5, dicha ponderación fue seleccionada por las autoridades de la planta para realizar el presente estudio.

Tabla 4. 5 Ponderaciones Utilizadas en la MDM

Aspecto evaluado	Ponderación %
Factibilidad Técnica	50
Factibilidad Económica	50
Total	100

4.4.2 PARÁMETROS UTILIZADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA MDM

4.4.3 VIABILIDAD TÉCNICA: PRODUCCIÓN Y CALIDAD DE LODO

Este grupo está integrado por cuatro aspectos, los cuales son valores experimentales y, por lo tanto, su evaluación se basa en los resultados y observaciones obtenidos en las pruebas de laboratorio. En la Tabla 4.6 se muestra la MDM para este grupo de aspectos técnicos.

1. **Producción de Volumen de Lodos** (mL/L): se asignaron calificaciones de 0 a 5, de acuerdo al intervalo de volumen producido por litro de agua tratada, para las distintas combinaciones de Co/Fl.

Calificaciones: 5=Excelente (0.0-2.0), 4=Muy bueno (2.0-4.0), 3=Bueno (4.0-5.0), 2=Insuficiente (5.0-10.0), 1=No aceptable (10.0-15.0), 0= Malo (> 15.0).

2. **Tiempo de Sedimentación** (min): en este punto se consideró la rapidez de sedimentación del lodo producido en las pruebas de coagulación-floculación.

Este aspecto fue empleado para lograr discriminar aquellas combinaciones que lograron alcanzar una sedimentación en el menor tiempo posible. A este aspecto se le asignó el siguiente intervalo de calificaciones:

5=Muy Rápido (0-3), 3= Rápido (3-5), 1 = Regular (5-10) y 0= Lento (> 10)

3. **Humedad de la torta (%)**: Este aspecto considera el valor de humedad en la torta, una vez aplicado el espesante.

A este aspecto se le asignó el siguiente intervalo de calificaciones:

5=Óptimo (56.89-59.4), 4=Muy bueno (59.39-61.9), 3=Bueno (61.89-64.41)
2=Regular (64.40-66.91), 1=Suficiente (66.90-69.41), 0=No suficiente (>69.41)

4. **REF (Resistencia Específica a la Filtración)**. Este punto toma en cuenta la facilidad o la dificultad que tiene cierto lodo al ser filtrado, es decir, para su espesamiento o desaguado.

Dado que este aspecto presentó un intervalo amplio de valores diferentes, la forma para asignar las calificaciones a cada intervalo se calcularon de la siguiente manera:

$$\text{Intervalo} = \frac{(\text{limite superior} - \text{limite inferior})}{6} \quad \text{Ecuación. E.4}$$

$$\text{calificación (5)} = \text{limite inferior} + \text{intervalo} \quad \text{Ecuación. E.5}$$

$$\text{Calificación(4)} = \text{limite superior de la calificación anterior} + \text{intervalo} \quad \text{Ecuación. E.6}$$

Finalmente las calificaciones asignadas a este aspecto fueron:

5=Óptimo (0.43-4.2), 4= Muy bueno (4.19-8.1), 3=Bueno (8.0-120)
2=Regular (119-160), 1=Suficiente (159-190), 0=No Suficiente (>190).

Los cálculos realizados en la matriz de decisión multicriterio se explican más ampliamente en el apéndice E.

En la tabla 4.6 se observa que la mayor viabilidad técnica (Con un puntaje de 85 en escala de 100) fue presentada por la combinación Co/FI/E Clorhidrato de aluminio-poliDADMAC/poliamina/copolímero de acrilamida-cloruro de metilo.

Tabla 4. 6 Matriz de decisión multicriterio aplicando únicamente aspectos técnicos para la selección de la mejor combinación Co/F/I/E

Cuadro comparativo de datos para cada concepto de factibilidad técnica para la selección de las mezclas de coagulante-Floculante-Espesante PPLB.										
					No. Aspecto	1	2	3	4	TOTAL
					-----	Producción y Calidad de Lodos				
Combinación	Coagulante	Floculante	Espesante	Calificación /Equivalencia	Volumen de Lodos (m/L)	Tiempo de sedimentación (min)	% Humedad de la torta	REF (x10 ¹⁰)		
					5=Excelente (0.0-2.0) 4=Muy bueno (2.0-4.0) 3=Bueno (4.0-5.0) 2=Insuficiente (5.0-10.0) 1=No aceptable (10.0-15.0) 0= Malo (> 15.0)	5= Muy Rápido (0-3) 3= Rápido (3-5) 1=Regular (5-10) 0= Lento > 10	5= Óptimo (56.89-59.4) 4= Muy bueno (59.39-61.9) 3=Bueno (61.89-64.41) 2=Regular (64.40-66.91) 1=Suficiente (66.90-69.41) 0=No suficiente (>69.41)	5=Óptimo (0.43-4.2) 4= Muy bueno (4.19-8.1) 3=Bueno (8.0-120) 2=Regular (119-160) 1=Suficiente (159-190) 0=No Suficiente (>190)		
1	Nombre	Clohidrato de aluminio-poliDADMAC	Poliamina	Copolimero de acrilamida-cloruro de metilo	Calificación	4	3	5	5	17,00
	Código	1	4	E4	Calif./Calif Max.	0,20	0,15	0,25	0,25	0,85
	Dosis	10,44	0,787	0,3	Calif. Ponderada	20,00	15,00	25,00	25,00	85,00
2	Nombre	Policloruro de aluminio	Copolimero de acrilamida-ácido acrílico	Poliacrilamida	Calificación	0	3	0	0	3,00
	Código	5	1	E3	Calif./Calif Max.	0,00	0,15	0,00	0,00	0,15
	Dosis	148,573	1,797	1,45	Calif. Ponderada	0,00	15,00	0,00	0,00	15,00
3	Nombre	Clorhidróxido de aluminio-poliDADMAC	poliDADMAC	Poliacrilamida	Calificación	4	0	5	5	14,00
	Código	6	3	E3	Calif./Calif Max.	0,20	0,00	0,25	0,25	0,70
	Dosis	11,078	1,797	0,3	Calif. Ponderada	20,00	0,00	25,00	25,00	70,00
4	Nombre	Polihidroxiclورو de aluminio	Poliamina	Copolimero de acrilamida-cloruro de metilo	Calificación	1	1	0	0	2,00
	Código	2	2	E4	Calif./Calif Max.	0,05	0,05	0,00	0,00	0,10
	Dosis	76,393	0,711	1,2	Calif. Ponderada	5,00	5,00	0,00	0,00	10,00
5	Nombre	Al ₂ (SO ₄) ₃ libre de Fe	poliDADMAC	Poliacrilamida	Calificación	0	1	0	3	4,00
	Código	4	3	E3	Calif./Calif Max.	0,00	0,05	0,00	0,15	0,20
	Dosis	148,873	1,797	1,2	Calif. Ponderada	0,00	5,00	0,00	15,00	20,00
6	Nombre	Al ₂ (SO ₄) ₃ Estandart	Poliamina	Poliacrilamida	Calificación	0	3	0	4	7,00
	Código	3	2	E3	Calif./Calif Max.	0,00	0,15	0,00	0,20	0,35
	Dosis	148,573	1,178	1,3	Calif. Ponderada	0,00	15,00	0,00	20,00	35,00

4.4.4 VIABILIDAD ECONÓMICA

Para la estimación de la viabilidad económica, en este apartado solamente se calcularon los costos de adquisición de reactivos. Para una mayor facilidad en el manejo de costos de reactivos se decidió presentar los datos en USD/día. Donde el tipo de cambio monetario peso-dólar se estableció en \$13.70 MXN, esto debido a que algunos proveedores reportaron el precio de sus productos en pesos. Este aspecto considera un flujo de agua tratada de 28 m³/s (capacidad de diseño de la PPLB). Los precios utilizados fueron los proporcionados por los proveedores y se reportan en el anexo G.

Se consideró tanto el costo del coagulante, floculante y espesante por separado, como un costo total de la combinación, esto con el fin de poder determinar de mejor manera el reactivo que incrementa el costo de la combinación y, a futuro poder optimizar costos si el usuario lo desea. Por lo anterior, esta matriz cuenta con cuatro aspectos a evaluar:

- 1) Costo Dosis Coagulante (Co)
- 2) Costo Dosis Floculante (Fl)
- 3) Costo Dosis Espesante (E)
- 4) Costo de la combinación Co/Fl/E

Para calcular las dosis de coagulante, floculante y espesante se utilizó el agua cruda con el mayor valor inicial de turbiedad reportado por Ramírez *et al.* (2009), que ha sido registrado en los últimos cinco años en la planta potabilizadora Los Berros, el cual fue de 205 UNT.

La Tabla 4.7 enlista las calificaciones asignadas de acuerdo al precio para la evaluación económica y la tabla 4.8 muestra el resultado de la MDM enfocada únicamente a aspectos económicos. Es posible observar en la Tabla 4.8 que la combinación Co/Fl/E económicamente más factible fue la compuesta por Clorhidrato-Al PolidADMAC/ Poliamina/poliacrilamida (55% de carga catiónica).

Tabla 4. 7 Calificaciones asignadas de acuerdo al costo para la MDM

COAGULANTE		FLOCULANTE		ESPESANTE		COMBINACIÓN Co/FI/E	
Calificación	Costo (*10 ³) USD/día	Calificación	Costo (*10 ³) USD/día	Calificación	Costo (*10 ³) USD/día	Calificación	Costo (*10 ³) USD/día
5	30.0-35.6	5	2.8-3.8	5	2.5-4.3	5	35.7-42.6
4	35.7-41.4	4	3.9-4.9	4	4.4-6.2	4	42.7-49.5
3	41.5-47	3	5.0-5.9	3	6.3-8.1	3	49.6-56.4
2	47.1-52.7	2	6.0-7.0	2	8.2-10	2	56.5-63.2
1	52.8-58.5	1	7.1-8.0	1	10.1-11.9	1	63.3-70.1
0	>58.5	0	>8.0	0	>11.9	0	>70.2

Tabla 4. 8 Matriz de decisión multicriterio aplicando únicamente aspectos económicos para la selección de la mejor combinación Co/F/I/E

Cuadro comparativo factibilidad económica para la selección de las mezclas Coagulante-Floculante-Espesante PPLB.												
						No. Aspecto	No. Aspecto	6	7	8	9	TOTAL
						-----	-----	Costo de Dosis (USD/Día)* (x10 ³)				
								Costo Dosis Co	Costo Dosis FI	Costo Dosis Espesante	Costo Combinación Co-FI-E	
Combinación	Coagulante	Floculante	Espesante	Calificación /Equivalencia	Calificación /Equivalencia	5=30.0-35.6 4=35.7-41.4 3=41.5-47.0 2=47.1-52.7 1=52.8-58.5 0= > 58.5	5=2.8-3.8 4=3.8-4.9 3=5.0-5.9 2=6.0-7.0 1=7.1-8.0 0= > 8.1	5=2.5-4.3 4=4.4-6.2 3=6.3-8.1 2=8.2-10.0 1=10.1-11.9 0= > 12.0	5=35.7-42.6 4=42.7-49.5 3=49.6-56.4 2=56.5-63.2 1=63.3-70.1 0= >70.2			
1	Nombre	Clorhidrato de aluminio-poliDADMAC	Poliamina	Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo	Calificación	Calificación	5	5	5	5	20	
	Código	1	4	E4	Calif./Calif Max.	Calif./Calif Max.	0,25	0,25	0,25	0,25	1	
	Dosis	10,44	0,787	0,3	Calif. Ponderada	Calif. Ponderada	25,00	25,00	25,00	25,00	100	
2	Nombre	Policloruro de aluminio	Copolímero de acrilamida-ácido acrílico	Poliacrilamida	Calificación	Calificación	0	0	0	0	0	
	Código	5	1	E3	Calif./Calif Max.	Calif./Calif Max.	0,00	0,00	0,00	0,00	0	
	Dosis	148,573	1,797	1,45	Calif. Ponderada	Calif. Ponderada	0,00	0,00	0,00	0,00	0	
3	Nombre	Clorhidróxido de aluminio-poliDADMAC	poliDADMAC	Poliacrilamida	Calificación	Calificación	4	0	5	3	12	
	Código	6	3	E3	Calif./Calif Max.	Calif./Calif Max.	0,20	0,00	0,25	0,15	0,6	
	Dosis	11,078	1,797	0,3	Calif. Ponderada	Calif. Ponderada	20,00	0,00	25,00	15,00	60	
4	Nombre	Poli-hidroxiclorigenato de aluminio	Poliamina	Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo	Calificación	Calificación	0	5	1	0	6	
	Código	2	2	E4	Calif./Calif Max.	Calif./Calif Max.	0,00	0,25	0,05	0,00	0,3	
	Dosis	76,393	0,711	1,2	Calif. Ponderada	Calif. Ponderada	0,00	25,00	5,00	0,00	30	
5	Nombre	Al ₂ (SO ₄) ₃ libre de Fe	poliDADMAC	Poliacrilamida	Calificación	Calificación	3	0	2	2	7	
	Código	4	3	E3	Calif./Calif Max.	Calif./Calif Max.	0,15	0,00	0,10	0,10	0,35	
	Dosis	148,873	1,797	1,2	Calif. Ponderada	Calif. Ponderada	15,00	0,00	10,00	10,00	35	
6	Nombre	Al ₂ (SO ₄) ₃ Estandart	Poliamina	Poliacrilamida	Calificación	Calificación	5	4	1	4	14	
	Código	3	2	E3	Calif./Calif Max.	Calif./Calif Max.	0,25	0,20	0,05	0,20	0,7	
	Dosis	148,573	1,178	1,3	Calif. Ponderada	Calif. Ponderada	25,00	20,00	5,00	20,00	70	

*Tipo de Cambio 13,70MXN/USD. Se considera que la planta opera las 24h al día con un flujo de operación de 28m³/s. Los Costos son EXW

Finalmente, la tabla 4.9 muestra la matriz condensada la cual evalúa tanto aspectos técnicos como económicos con la ponderación antes mencionada.

Con base en esta última tabla, se determinó que la combinación Co/FI/E que presentó mayor calificación total o factibilidad técnico-económica fue la correspondiente a la combinación formada por el coagulante Clorhidrato-Al PolidADMAC/Floculante Poliamina /Espesante poliamida (55% CC).

Tabla 4. 9 Matriz de Decisión Multicriterio de factibilidad técnico-económica para la selección de la mejor combinación Co/FI/E.

Cuadro comparativo de datos para cada concepto de factibilidad técnica para la selección de las mezclas de coagulante-Floculante-Espesante PPLB.					Cuadro comparativo factibilidad económica para la selección de las mezclas Coagulante-Floculante-Espesante PPLB.												
					No. Aspecto	1	2	3	4	las mezclas Coagulante-Floculante-Espesante PPLB.					SUBTOTAL	TOTAL	
					Producción y Calidad de Lodos				No. Aspecto	5	6	7	8				
Combinación Coagulante Floculante Espesante					Calificación /Equivalencia	Volumen de Lodos (ml/L)	Tiempo de sedimentación (min)	%Humedad de la torta	REF (x10 ¹⁰)	Costo de Dosis (USD/Día) ^a (x10 ³)				SUBTOTAL	TOTAL		
						Costo Dosis Co	Costo Dosis FI	Costo Dosis E	Costo Combinación Co-FI-E								
						5=Excelente (0.0-2.0) 4=Muy bueno (2.0-4.0) 3=Bueno (4.0-5.0) 2=Insuficiente (5.0-10.0) 1=No aceptable (10.0-15.0) 0= Malo (> 15.0)	5=Muy Rápido (0-3) 3= Regular (3-5) 1=Regular (5-10) 0= Lento > 10	5= Óptimo (56.89-59.4) 4= Muy bueno (59.39-61.9) 3=Bueno (61.89-64.41) 2=Regular (64.40-66.91) 1=Suficiente (66.90-69.41) 0=No suficiente (>69.41)	5=Óptimo (0.43-4.2) 4= Muy bueno (4.19-8.1) 3=Bueno (8.0-120) 2=Regular (119-160) 1=Suficiente (159-190) 0=No Suficiente (>190)		5=30.0-35.6 4=35.7-41.4 3=41.5-47.0 2=47.1-52.7 1=52.8-58.5 0=> 58.5	5=2.8-3.8 4=3.8-4.9 3=5.0-5.9 2=6.0-7.0 1=7.1-8.0 0=> 8.1	5=2.5-4.3 4=4.4-6.2 3=6.3-8.1 2=8.2-10.0 1=10.1-11.9 0=> 12.0	5=35.7-42.6 4=42.7-49.5 3=49.6-56.4 2=56.5-63.2 1=63.3-70.1 0=>70.2			
1	Nombre	Clorhidrato de aluminio-poliDADMAC	Poliamina	Copolimero de acrilamida-cloruro de metilo	Calificación	4	3	5	5	17,0	Calificación	5	5	5	5	20	37,0
	Código	1	4	E4	Calif./Calif Max.	0,20	0,15	0,25	0,25	0,85	Calif./Calif Max.	0,25	0,25	0,25	0,25	1	1,85
	Dosis	10,44	0,787	0,3	Calif. Ponderada	10,00	7,50	12,50	12,50	42,5	Calif. Ponderada	12,50	12,50	12,50	12,50	50	92,5
2	Nombre	Policloruro de aluminio	Copolimero de acrilamida-ácido acrílico	Policrilamida	Calificación	0	3	0	0	3,0	Calificación	0	0	0	0	0	3,0
	Código	5	1	E3	Calif./Calif Max.	0,00	0,15	0,00	0,00	0,15	Calif./Calif Max.	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,15
	Dosis	148,573	1,797	1,45	Calif. Ponderada	0,00	7,50	0,00	0,00	7,50	Calif. Ponderada	0,00	0,00	0,00	0,00	0	7,5
3	Nombre	Clorhidróxido de aluminio-poliDADMAC	poliDADMAC	Policrilamida	Calificación	4	0	5	5	14,0	Calificación	4	0	5	3	12	26,0
	Código	6	3	E3	Calif./Calif Max.	0,20	0,00	0,25	0,25	0,70	Calif./Calif Max.	0,20	0,00	0,25	0,15	0,6	1,30
	Dosis	11,078	1,797	0,3	Calif. Ponderada	10,00	0,00	12,50	12,50	35,0	Calif. Ponderada	10,00	0,00	12,50	7,50	30	65,0
4	Nombre	Poli-hidroxocloruro de aluminio	Poliamina	Copolimero de acrilamida-cloruro de metilo	Calificación	1	1	0	0	2,0	Calificación	0	5	1	0	6	8,0
	Código	2	2	E4	Calif./Calif Max.	0,05	0,05	0,00	0,00	0,10	Calif./Calif Max.	0,00	0,25	0,05	0,00	0,3	0,40
	Dosis	76,393	0,711	1,2	Calif. Ponderada	2,50	2,50	0,00	0,00	5,0	Calif. Ponderada	0,00	12,50	2,50	0,00	15	20,0
5	Nombre	Al ₂ (SO ₄) ₃ libre de Fe	poliDADMAC	Policrilamida	Calificación	0	1	0	3	4,0	Calificación	3	0	2	2	7	11,0
	Código	4	3	E3	Calif./Calif Max.	0,00	0,05	0,00	0,15	0,20	Calif./Calif Max.	0,15	0,00	0,10	0,10	0,35	0,55
	Dosis	148,873	1,797	1,2	Calif. Ponderada	0,00	2,50	0,00	7,50	10,0	Calif. Ponderada	7,50	0,00	5,00	5,00	17,5	27,5
6	Nombre	Al ₂ (SO ₄) ₃ Estandart	Poliamina	Policrilamida	Calificación	0	3	0	4	7,0	Calificación	5	4	1	4	14	21,0
	Código	3	2	E3	Calif./Calif Max.	0,00	0,15	0,00	0,20	0,35	Calif./Calif Max.	0,25	0,20	0,05	0,20	0,7	1,05
	Dosis	148,573	1,178	1,3	Calif. Ponderada	0,00	7,50	0,00	10,00	17,5	Calif. Ponderada	12,50	10,00	2,50	10,00	35	52,5

^aTipo de Cambio 13,70MXN/USD. Se considera que la planta opera las 24h al día con un flujo de operación de 28m³/s. Los Costos son EXW

5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos en este estudio se pudo concluir de manera general que:

- ⊕ El lodo más adecuado, desde el punto de vista técnico-económico para su manejo y espesamiento en la Planta Potabilizadora de Los Berros, fue el generado por la combinación de coagulante/floculante compuesta por Clorhidrato-Al-poliDADMAC/Poliamina, debido a que presentó el menor valor de resistencia específica a la filtración (REF), de entre seis tipos de lodos evaluados.

- ⊕ El espesante poliamida (55% Carga Catiónica) con una dosis de 0.3 kg/ton de lodo (base seca), permitió obtener el mejor resultado de espesamiento para el lodo seleccionado.

De manera específica se concluye que:

- ⊕ Las características del lodo presentaron una influencia significativa sobre su espesamiento y manejo, debido a que dependiendo del floculante empleado para su generación, los valores obtenidos de REF oscilaron entre $4.33 \text{ E } +09 \text{ g/cm}$ y $2.33\text{E}+11\text{g/cm}$. Los valores más bajos fueron para lodos (No. 1, 3 y 5) generados con el floculante poliDADMAC. Este reactivo fue el que presentó la carga catiónica más elevada de los reactivos empleados, lo que probablemente permitió generar un lodo crudo más robusto y estable para manejo y espesamiento.

- ⊕ El incremento de la dosis de reactivo sobre el proceso de espesamiento de lodos tuvo dos tipos de influencia. Una en la que un incremento de dosis permitió una disminución de la REF, hasta un valor mínimo, después del cual el incremento de la dosis ya no afectó significativamente el valor de la REF. y en el segundo comportamiento, después de la mejor dosis, la REF se incrementó en función de la dosis aplicada. Lo anterior coincide por lo reportado en literatura.

- ⊕ Los mejores resultados se obtuvieron con cargas catiónicas medias (35% y 55%), presentando un aumento del valor de REF, para valores superiores de carga catiónica.

- ⊕ En base a los resultados de la matriz de factibilidad técnico-económica, la mejor combinación Coagulante/Floculante/Espesante, de todas las evaluadas en este estudio, fue la compuesta por Clorhidrato-Al-poliDADMAC/Poliamina/ poliamida.

RECOMENDACIONES

- ⊕ Realizar un estudio de factibilidad económica tomando en cuenta los costos de transporte y almacenamiento de reactivos.

- ⊕ Realizar estudios de caracterización del lodo generado por la mejor combinación de coagulante-floculante, con el fin de clasificar el lodo espesado, y así determinar si el lodo puede ser aprovechado o debe ser dispuesto.

- ⊕ Aplicar el estudio a nivel de planta piloto, con el fin de tener resultados que puedan ser escalables.

- ⊕ En caso de que la clasificación lo permita, utilizar los lodos generados por la mejor combinación Coagulante/Floculante/Espesante en diferentes opciones de aprovechamiento a diferentes niveles, y determinar la factibilidad técnico-económica de cada aprovechamiento y seleccionar la mejor opción.

REFERENCIAS

REFERENCIAS

Adler, E. (2002). Gestion des boues d'eau potable á la recherche des bonnes pratiques. Synthèse du groupe "terres de decantation". (AGHTM). Francia.

Armenter, F., Cristiá, J., Cusidó, F., Arteaga, F., Lázaro V. y Cremades O. (2003). Innovación en el tratamiento de fangos de una ETAP. Secado por atomización y aprovechamiento en la industria cerámica. *Tecnología del Agua*, (232): 26-33.

Arteaga, F. y Cusidó, J., (1999). Valorización de los fangos de ETAP en materiales de construcción, cerámica estructural y cerámica de revestimiento. Tesis de doctorado. UPC-Terrassa

Benefield, L.D., Judiens, J. F. y Weand, B. L., (1982). Process Chemistry for Water and Wastewater Treatment. New Jersey; Prentice Hall Inc. Englewood Cliefs. 476p.

Bautista, C. (2004). Residuos. Guía Técnico Jurídica. s.l, Mundi Prensa.380p.

Bolto, Brian y Gregory J. (2007). Organic Polyelectrolytes in water treatment, *Water Research*, **41** (11):2301-2324.

Castañeda, O. (1998). Determinación de la toxicidad de los lodos generados por una planta potabilizadora, utilizando bioensayos. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA):751-765

CEPIS (1976). Curso intensivo sobre diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales para países en desarrollo. Lima; CEPIS, 1976. 688 p. Ilus, tablas.

Cerón, O. (2006). Aplicación de Lodos de Plantas Potabilizadoras en Materiales Cementantes para elaborar productos de la Construcción. Tesis de Licenciatura. Facultad de Química UNAM.

Cheremisinoff, P. N. (1995). *Sludge. Management and disposal*. USA; Prentice Hall: (8): 208p.).

Degrémont, (2009). *Manual Técnico del Agua*, Paris. Paris, Degrémont, 1186p.

Dennis, G., Welch, E., Peterson, S. y Nichols S. (2005). *Restoration and management of lakes and reservoirs*. USA, 3ª edición; Taylor and Francis Group, 591p.

Dentel, S. K. (1989). *Procedures Manual for Polymer Selection in Water Treatment Plants*, *American Water Works Association (AWWA)*. EUA, Research Foundation. 216p.

Dillion, G. (1997). *Application guide to waterworks Sludge treatment and Disposal* WRc Report No. TT016.

Espejel, F. (2007). *Valoración de Lodos Generados en Plantas Potabilizadoras Elaborar Productos Cerámicos*. Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental. Instituto de Ingeniería. UNAM. 147p.

Gaither, W. S., Brooks, N. H., Capuzzo, J.M., Csanady, G. T. , Firth, C. R., Garver, W. F., Morel, M.M., Soneinshein y Perkins, D. W. (1984). *Ocean disposal systems for sewage sludge and effluent*. Committee on Ocean Waste Transportation. 126p.

Garcés, F., Díaz, J. C. y Dellepiane O. M. (2000). *Acondicionamiento de Lodos Producidos en el tratamiento de Agua Potable*

Haijin, R., Wenna, C., Zheng, Y. y Luan Z. (2007). *Effect of hydrophobic group on flocculation proprieties and dewatering efficiency of cationic acrylamide copolymers*. *Reactive and functional Polymers*. **67**:601-608.

Hendricks y David W. (2006). *Water Treatment Unit Processes: Physical and Chemical*. Inglaterra, CRC Press, 1266p.

Jeffrey, J., Weiner, R. F y Aarne, P. (1997). *Environmental pollution and control*. 4ª ed. Butterworth-Heinemann.392p.

Kemmer, F. y McCallion, J., (2009). “Manual del agua. Su Naturaleza, tratamiento y aplicaciones”. México; Mc Graw Hill.200p.

Lee, C. H. y Liu, J.C. (2001). Enhanced sludge dewatering by dual polyelectrolytes conditioning, *Advances in Environmental Research*, **5**(2): 139-136.

Malpica de la Torre J. (2002). Evaluación del método Fentón para producir aguas y lodos con fines de reúso. Tesis de licenciatura, Facultad de química UNAM.

Metcalf y Eddy (2000). *Ingeniería de Aguas Residuales*. México, McGraw Hill. 1508 p.

NOM-004-SEMARNAT-2002. Norma Oficial Mexicana. Protección Ambiental. Publicada en el Diario Oficial el 15 de Agosto de 2003.

Montgomery, J. M. (1989). *Water Treatment Principles and Design*. USA, John Wiley & Sons. 696p.

Pavón, B., Pacheco y Cárdenas, L (2005). “Tratamiento de lodos de una potabilizadora para la recuperación de aluminio y hierro como coagulantes”, *Ingeniería Sanitaria y ambiental*. **78**.

Ramírez, R. M., Cabirol, N., Millán, S., Espejel, F., Rodríguez A., Cerón, O. y Rojas, M. (2005). Informe Final del proyecto “Valorización y determinación del

potencial de aprovechamiento de los lodos generados en la planta potabilizadora "Los Berros", Sistema Cutzamala, Primera Etapa". No. de Convenio GAVM-GC-MEX-05-203-RF-CC

Ramírez, R. M., Rincón, I. R., Elías, J. A., Rocha, D. R., Díaz, D. N., Fuentes, P. I., Rosas, A, Anaya, S. R, Jiménez, J., Ríos, J. L., Ramírez, G., Arriaga, R. y Sánchez H. (2009). Informe Final del Proyecto "Diagnóstico Y Optimización De Los Procesos Integrantes Del Tren De Tratamiento De Agua Y Lodos De Las Plantas Potabilizadoras Los Berros (PPLB) Y Madín (PPMD): Primera Etapa", No. De Convenio OAVM-DAPDS-MEX-08-203-RF-CC

Sandoval, L., Montellano, L., Piña, M. y Sánchez, L. (2001). "Selección del tren de tratamiento para deshidratar y reducir el volumen de lodo de plantas potabilizadoras", *Ingeniería Hidráulica en México*. **16**(4):91-105.

Sandoval, L., Montellano, L., Piña, M. y Sánchez, O. (2002). Potencial zeta como una herramienta para determinar la aglomeración de las partículas en la reducción del volumen del lodo a disponer. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Sanks R., (1985). Water Treatment Plant Design. For the practicing Engineer. Ann Arbor Science Publishers, Inc. USA

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2008). Comisión Nacional del Agua, Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. Diciembre 2006, 1a, CNA, México, 2006.

Sette R., Jimenez, D. y Lora, F. (1993). .Tratamiento de aguas residuales. 1^a ed. Reverté. 715p.

Sinnott, R.K., Metcalfe, J., Richardson, J.F. (2005). Coulson & Richardson's chemical engineering, New York, McGraw Hill, 1038.

Turovskij, I.S. y Mathai P. K. (2006). .Wastewater sludge processing. s.l , Wiley-Interscience. 354p.

Zhao, Y.Q. y Bache, D. H. (2002). Polymer impact on filter blinding during alum Sludge filtration. *Water Research*. **36**: 3691-3698

Zhao, Y.Q. (2003). Correlation between floc physical properties and optimum polymer dosage in alum sludge conditioning and dewatering. *Chemical Engineering Journal*. **97**:227-235.

Referencias Electrónicas:

Arias, E. y Lastra, J. (2009). Tratamiento Secundario de Aguas- Clases de Lodos. (Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos10/tratamie/tratamie.shtml>. consultado el 21 de julio de 2009).

Bustos H. (2006). Proyectos factibles o proyectos viables. (Disponible en <http://www.gestiopolis.com/canales6/emp/proyectos-viables-o-factibles.htm> consultado el 17 de septiembre del 2009).

Causa, E. y Pinto, C. (1974). Investigación sobre los procesos de coagulación-floculación en plantas de tratamiento. (Disponible en <http://cabierta.uchile.cl/revista/15/educacion/edu4/index.html>. consultado el 21 de julio del 2009).

Certificación NSF para Sistemas de Tratamiento de agua potable. (Disponible en http://www.nsf.org/business/newsroom/pdf/DWTU_Europe_Insert_ES.pdf. consultado el 21 de julio del 2009).

Chemical Engineering Plant Cost Index. (Disponible en <http://www.che.com/pci/>. Consultado el 28 de julio del 2009).

Coagulación y Floculación de Contaminantes del Agua. (Disponible en <http://cabierta.uchile.cl/revista/15/articulos/pdf/edu4.pdf>. consultado el 21 de julio del 2009).

Dayton, E. y Basta N: (2001). Characterization of Drinking Water Treatment Residuals for Use as a Soil Substitute. *Water Environmental Research*.73:1, 52-57.

Ebie K., Lee, J. y Yoon T. (2000). Activation mechanism and effective in reusing sludge from water purification. *Water Science and Technology*. 42(3-4): 273-281.

Fangos Producidos en el trataiento del agua potable. (Disponible en http://potablewater.iespana.es/tratamiento_de_lodos.htm. consultado el 21 de julio del 2009).

Escobar, J. C. (2002). Selección de la dosis óptima para el acondicionamiento y deshidratación de lodos de plantas de agua potable mediante centrifugas de laboratorio. XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental Cancún, México, 27 al 31 de octubre, 2002. (Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico26/iii-016.pdf>. Consultado el 21 de Julio del 2009).

Martínez, J. (2005). "Tratamiento y Calidad del agua potable", U.S. Environmental Protection Agency, Caribbean Environmental Protection Division, (Disponible en <http://academic.uprm.edu/gonzalezc/HTMLobj-316/tratamientoaguapotable.pdf>. Consultado 21 de julio 2009).

MENV (2003). Beneficial Use of Municipal Biosolids in Agriculture. Literature Review and Recommendations Concerning the Impact of Iron and Aluminum Salts on Soil

Phosphorus Availability. Ministère de l'Environnement du Québec. Direction des Politiques du secteur agricole. Québec, Canadá.

Meunier, N., Blais, J., Lounés, M., Tyagi, R. y Sasseville, J.L. (2002). Different options for metal recovery alter sludge decontamination at the Montreal Urban Community wastewater treatment plant. *Water Science and Technology*. 46 (10): 33-41.

Monteagudo, J. M. y Durán A. (2000). Guión de Prácticas-Diseño de procesos de Ingeniería Ambiental, Grupo de Ingeniería Química E.T.S Ingenieros Industriales, (Disponible en <http://www.minas.upm.es/catedra-anefa/Nunez-M3/Decantacion-04-c.pdf>. Consultado 21 de julio del 2009).

Morgan-Sagastume, J.M., Revah, S. y Loyola, A. (1999). Malos olores en plantas de tratamiento de aguas residuales. Su control a través de procesos biotecnológicos, Ingeniería y Ciencias Ambientales, (Disponible en <http://www.cepis.org.pe/bvsaidis/impactos/mexicon/R-0032.pdf>, consultado 22 de julio del 2009).

Núñez, F. (2004). Decantación, Floculantes, Ensayos, (Disponible en <http://www.minas.upm.es/catedra-anefa/Nunez-M3/Decantacion-04-c.pdf>. Consultado el 21 de julio del 2009).

Sánchez, L. O., Sandoval, L., Piña, M. y Montellano, L. (2000). "Evaluación de la Resistencia Específica a la Filtración y Porcentaje de Humedad en la Deshidratabilidad de Lodos de Plantas Potabilizadoras". Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, (Disponible en <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/tratagua/mexicon/R-0063.pdf>, consultado el 22 de Julio del 2009).

Ramírez, F. (2008). "Tratamiento de fangos producidos en el tratamiento de agua potable", Abril 2008, (Disponible en http://www.elaguapotable.com/tratamiento_de_lodos.htm, consultado el 21 de julio del 2009).

Sandoval, L., Montellano, L., Piña, M. y Sánchez, O. (1998). "Tratabilidad de los Lodos Producidos en la Potabilización del Agua". Asociación Peruana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, AIDIS. Gestión ambiental en el siglo XXI. Lima, APIS, p.1-10 Ilus, Tab. (Disponible en <http://www.cepis.org.pe/bvsaidis/tratagua/peru/mexapa045.pdf>. Consultado el 22 de julio del 2009).

Sandoval, L., Montellano, L., Piña, M. y Sánchez O. (2002). "Estudio Piloto Para Reducir El Volumen De Lodos De Plantas Potabilizadoras" Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, AIDIS. Memorias. México, D.F., FEMISCA, 2002, p.1-14 Ilus., tab. (Disponible en <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico13/005.pdf>, consultado el 22 de julio del 2009).

Tratamientos Primarios. (Disponible en <http://archivosia.iespana.es/Ing%20Ambiental%20IIa%20Primarios.ppt>, consultado el 22 de julio del 2009).

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Acondicionamiento de lodos

Etapa que consiste en liberar la mayor cantidad de agua posible de las partículas de lodo, para mejorar la eficiencia del proceso de deshidratado.

El objeto de este tratamiento es facilitar la aglomeración de sólidos y aumentar su contenido. Para este fin se emplean distintos tipos de acondicionamiento, según las características del lodo que se va a tratar:

Acondicionamiento químico: Proceso que da como resultado la coagulación de los sólidos, mediante el uso de cloruro férrico, cal, sulfato de aluminio y polielectrolitos orgánicos. Este tipo de tratamiento aumenta el contenido de sólidos y mejora las características de deshidratado que resultan de su uso. (<http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/entrega.asp?IdEntrega=1808>).

Agua potable

Se denomina agua potable al agua "bebible" en el sentido que puede ser consumida por personas y animales sin riesgo de contraer enfermedades. El término se aplica al agua que ha sido tratada para su consumo humano según unas normas de calidad promulgadas por las autoridades locales e internacionales. (http://es.wikipedia.org/wiki/Agua_potable).

Planta Potabilizadora:

Conjunto de estructuras en las que se trata el agua de manera que se vuelva apta para el consumo humano

Aguas residuales

También llamadas aguas negras o aguas servidas, es aquella agua que está contaminada con sustancias fecales y orina, procedentes de desechos orgánicos humanos o animales (http://es.wikipedia.org/wiki/Aguas_servidas).

Aguas superficiales

Aguas provenientes de recursos superficiales tales como ríos, quebradas, lagos y presas (Martínez, 2005).

Clarificación

La técnica utilizada para la remoción de turbiedad y color del agua (<http://www.triwan.com/news/clarifica.htm>).

Composta

La composta (también llamada humus) se forma por la descomposición de productos orgánicos y esta sirve para abonar la tierra. Es un proceso en el que no interviene la mano del hombre, el reciclaje es 100% natural (<http://www.animales-en-extincion.com/composta-que-es.html>).

Coliformes fecales

Son las bacterias patógenas presentes en el intestino de animales de sangre caliente y humanos (Cerón, 2006).

Colmatación

Se dice que un filtro se ha colmatado cuando su permeabilidad original se ha reducido sustancialmente, a causa del progresivo entupimiento (atorar o cerrar un conducto) de los poros existentes entre sus partículas, con materiales finos transportados en suspensión por el agua que se va infiltrando, en las etapas iniciales del proceso (<http://es.wikipedia.org/wiki/Colmataci%C3%B3n>).

Color

Además de turbiedad es posible también utilizar el color como parámetro indicador de la eficiencia del proceso de clarificación. Se habla de color aparente si no se ha removido la turbiedad y de color verdadero del agua en caso contrario. En general las sustancias liofílicas son responsables de la coloración del agua (Kemmer y Mc Callion, 2009).

El color en los lodos se asocia al término “color aparente” y engloba no sólo el color debido a sustancias disueltas, sino principalmente a las materias en suspensión. La mayoría de las veces el color va a depender del tipo de coagulante utilizado. Por ejemplo, los lodos generados cuando se utilizan sales de hierro toman tonalidades rojizas.

Debido a la consistencia del lodo es difícil determinar el color mediante métodos analíticos, por lo que se puede emplear una tabla con diferentes tonalidades y a simple vista determinar el color más parecido a la muestra (Cerón, 2006).

Digestión aerobia

Por digestión o estabilización de los fangos se entiende la eliminación en presencia del aire de la parte fermentable de los lodos (http://www.elaguapotable.com/tratamiento_de_lodos.htm).

Digestión anaerobia

Es un proceso que tiene lugar en ausencia de aire, el oxígeno necesario se obtiene de la sustancia tratada, por el cual se los carbohidratos, proteínas y los aminoácidos y grasas se descomponen en metano y CO₂ (http://www.elaguapotable.com/tratamiento_de_lodos.htm).

Espesamiento

Puede ser definido como el proceso destinado a sacar una parte del agua (humedad intersticial) remanente en el lodo, posterior a la separación inicial del agua tratada, su objetivo básico es reducir el volumen del lodo líquido que va a ser manipulado en procesos subsiguientes con vistas al destino final.(Bautista , 2004).

Factibilidad

Un proyecto es factible, es decir se puede ejecutar, cuando ha aprobado distintas evaluaciones básicas (evaluación técnica, evaluación ambiental, evaluación financiera y evaluación socio-económica) (Bustos, 2006).

Huevos de helminto

Helminto es el término designado a un amplio grupo de gusanos parásitos (de humanos, animales y vegetales), de vida libre, con formas y tamaños variados. Poseen órganos diferenciados y sus ciclos vitales dependen de la producción de huevos o larvas, infecciosas o no (Cerón, 2006).

%Humedad

Este parámetro indica la cantidad de agua contenida en el lodo y puede determinarse a través de la concentración de sólidos totales en el lodo (Cerón, 2006).

Intersticio

Espacio pequeño que media entre dos cuerpos o entre dos partes de un mismo cuerpo. Intervalo (espacio, distancia) (<http://es.thefreedictionary.com/intersticios>).

Lodos aceitosos

Caracterizados por la presencia de efluentes de pequeñas cantidades de aceites y grasas minerales(o animales). Estos aceites son absorbidos en la emulsión o en las partículas hidrofóbicas del lodo. Una proporción de lodos biológicos pueden también estar presentes en caso de tratamiento final de lodos activados. (Por ejemplo en el tratamiento de efluentes de refinerías) (Degrémont, 2009).

Lodos activados

Lodos ricos en microorganismos que degradan materia orgánica utilizados en el proceso biológico aeróbico para convertir la materia orgánica soluble en biomasa sólida, separable por gravedad o por filtración (<http://es.answers.yahoo.com/question/index?qid=20080320181919AA73DLv>).

Lodos digeridos

Lodos que han sido sometidos a un proceso de digestión (http://www.elaguapotable.com/tratamiento_de_lodos.htm).

Lodos fibrosos

Generalmente fáciles de deshidratar, excepto cuando la intensidad de la recuperación de fibras lo hace hidrofílico, debido a la presencia de hidróxidos, lodos biológicos o ambos (Degrémont, 2009).

Aguas residuales provenientes de molinos de cartón o papel contienen este tipo de lodos (Degrémont, 2009).

Lodos inorgánicos hidrofílicos

Contienen hidróxidos de metales formados durante el proceso de tratamiento físico-químico como resultado de la precipitación de iones metálicos presentes en el agua cruda (Al, Fe, Zn, Cr,...) o debido al uso de floculantes inorgánicos (sales de hierro o aluminio).

Lodos provenientes del tratamiento de agua potable y aguas residuales provenientes del tratamiento de acabado de metales pertenecen a esta categoría (Degrémont, 2009).

Lodos inorgánicos hidrofóbicos

Se caracterizan por una preponderante cantidad de partículas de materia con poca o nada de humedad ligada (arena, limo, escoria sales cristalizadas, etc.).

La deshidratación es fácil en principio, ya que en este tipo de lodos puede haber obstrucción por la presencia de materia hidrofílica inorgánica proveniente de agentes floculantes usados en el tratamiento de aguas (Degrémont, 2009).

Algunos de estos lodos provienen de la industria de hierro y acero, como lo son las fundiciones y las acerías (Degrémont, 2009).

Lodos líquidos

Lodos cuyo contenido de agua es superior al 80% (Arias y Lastra, 2009).

Lodos orgánicos hidrofílicos

Es una de las más grandes categorías. Las dificultades en la deshidratación de este lodo son debido a la presencia de una gran proporción de coloides hidrofílicos. Resultan del tratamiento biológico de aguas residuales cuyo contenido de sólidos volátiles puede hasta del 90% del contenido total de sólidos secos. Agua de tratamiento proveniente de la industria alimenticia, industria química orgánica, por ejemplo son incluidas en esta categoría.

En este tipo de lodos hidróxidos de naturaleza hidrofílica tales como hidróxidos de hierro o aluminio, derivados de floculantes inorgánicos usados durante el tratamiento de agua pueden estar presentes.

Lodos Plásticos o Paleables

Su contenido en agua es inferior al 80%, por lo que pueden ser manejados mediante pala y transportados en camiones de caja abierta (Arias y Lastra, 2009).

Lodos Sólidos

Lodos cuyo contenido en agua es inferior al 60% (Arias y Lastra, 2009).

Estos lodos requieren acondicionamiento antes de la deshidratación mecánica (Degrémont, 2009).

Olor

Al igual que el color, este parámetro es medianamente descriptivo y es muy subjetivo ya que los olores percibidos por los humanos parecen ser innumerables y se sabe que cambian de característica conforme varía la concentración del compuesto odorífero, o intensidad de su olor. Los olores en el lodo están relacionados con materia orgánica en descomposición, algas y otros organismos microscópicos que contienen aceites esenciales y otros compuestos olorosos, hierro magnesio y otros productos metálicos, residuos industriales, particularmente sustancias fenólicas, cloro y sus compuestos de sustitución y compuestos orgánicos sintéticos (Cerón, 2006).

Salmonella sp

Bacilos móviles por sus flagelos peritricos que fermentan de manera característica glucosa y manosa sin producir gas, pero no fermentan glucosa ni sacarosa (Cerón, 2006).

Turbiedad

Para comprender mejor el proceso de coagulación-floculación del agua se introdujo el concepto de turbiedad. Se entiende por turbiedad a la propiedad óptica de una muestra de diseminar y absorber la luz en lugar de transmitirla en línea recta. Existen dos tipos de equipos para medir turbiedad. En la primera clase de equipos están el turbidímetro de aguja de platino y la bujía de Jackson, los cuales son aptos para medir turbiedades altas. En la segunda clase de equipos está el turbidímetro Hach, que se utiliza para medir turbiedades bajas (nefelometría).

La turbiedad en agua se debe a la presencia de partículas suspendidas y disueltas. Materia en suspensión como arcilla, cieno o materia orgánica e inorgánica finamente dividida, así como compuestos solubles coloridos, plancton y diversos microorganismos (NMX-AA-038-SCFI-2001).

Vectores

Agente, generalmente orgánico que sirve como medio de transmisión de un organismo a otro, como roedores, moscas, mosquitos u otros organismos capaces de transportar agentes infecciosos. (NOM-004-SEMARNAT-2002).

Viabilidad

La aprobación o “visto bueno” de cada evaluación (técnica, ambiental, financiera y socio-económica), es llamada viabilidad; éstas viabilidades se deben dar al mismo tiempo para poder alcanzar la factibilidad e un proyecto; por ejemplo un proyecto puede ser viable económicamente, pero ser no viable ambientalmente, siendo así no factible (Bustos, 2006).

.

ANEXO A

ANEXO A-ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

A.1 FICHAS TÉCNICAS DE ESPESANTES SELECCIONADOS PARA REALIZAR PRUEBAS.

Tabla A. 1 Ficha técnica E1 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo)

Apariencia	Polvo blanco
Carácter iónico	Catiónico
Densidad de carga	Media
Peso molecular	medio
Tamaño y particular	% <100 mesh : 6
	% > 10 mesh : 2
Viscosidad de bulto	0,8
Viscosidad Brookfield (cps)	@ 5.0 g/l 280
	@ 2.5 g/l 130
	@ 1.0 g/l 45
Concentración recomendada (g/l)	4
Concentración Máxima (g/l)	10
Tiempo de disolución (minutos) en agua deionizada @ 5g/l, 25°C	90
Estabilidad de la solución (días)	1
Temperatura de almacenamiento (°C)	24
Tiempo de almacenamiento (meses)	0-35

Tabla A. 2 Ficha técnica E2 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo)

Apariencia	Polvo blanco
Carácter iónico	Catiónico
Densidad de carga	Media
Peso molecular	medio
Tamaño y particular	% <100 mesh : 10
	% > 10 mesh : 2
Viscosidad de bulto	0,8
Viscosidad Brookfield (cps)	@ 5.0 g/l 280
	@ 2.5 g/l 130
	@ 1.0 g/l 45
Concentración recomendada (g/l)	5
Concentración Máxima (g/l)	10
Tiempo de disolución (minutos) en agua deionizada @ 5g/l, 25°C	60
Estabilidad de la solución (días)	1
Temperatura de almacenamiento (°C)	0-35
Tiempo de almacenamiento (meses)	24

Tabla A. 3 Ficha técnica E3 (poliacrilamida).

Propiedades Típicas	
Apariencia	Polvo Granular Blanco
Grado de Carga %	35
Peso Molecular Relativo	Alto
Densidad a granel [kg/m ³]	750±50
pH de la solución @ 0.5%, 25°C	3.0-5.0
Viscosidad [cps]	
0.001	150
0.0025	300
0.005	600
0.01	1300
Especificaciones de Venta del Producto	
Insoluble, %w/w (Método BD47)	0.5 máx.
Acrilamida residual, % (Método BD52)	<0.10
PG´ Acrilamida residual, % (Método BD52)	0.04 máx.
PWG´ Acrilamida residual, % (Método BD52)	-
Viscosidad Estándar, cps (método 20,20A,21)	3.0-3.8
Permisos Normativos (Las siguientes Especificaciones cumplen estos requisitos normativos)	
Control del Inventario Químico	Véase la Hoja de seguridad
NSF Internacional	C-E3 (poliacrilamida)PG
Nordic Swan	-
Máximo Nivel de Uso	1mg/L
Drinking Water Inspectorate (UK)	-
CEN (En 1407)	-

Tabla A. 4 Ficha técnica E4 (poliacrilamida). (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo)

Apariencia	Polvo blanco
Carácter iónico	Catiónico
Densidad de carga	Muy Alta
Carga (%)	55
Peso molecular	Alto
Tamaño y particular	% <100 mesh : 10
	% > 10 mesh : 2
Viscosidad UL (cps)	4,1
Viscosidad de bulto	0,85
Viscosidad Brookfield (cps)	@ 5.0 g/L 580
	@ 2.5 g/L 280
	@ 1.0 g/L 100
Concentración recomendada (g/l)	4
Concentración Máxima (g/l)	15
Tiempo de disolución (minutos) en agua deionizada @ 5g/l, 25°C	60
Estabilidad de la solución (días)	1
Temperatura de almacenamiento (°C)	0-35
Tiempo de almacenamiento (meses)	24

ANEXO B

ANEXO B –TÉCNICA REF – RESISTENCIA ESPECÍFICA A LA FILTRACIÓN**B.1 TÉCNICA ANALÍTICA REF****Listado de material**

1. Reloj con cronómetro.
2. Embudo Buchner
3. Manómetro
4. Bomba de vacío
5. Manguera de hule
6. Probeta de 100 mL
7. Cajas de papel Whatman No. 1 de 10 cm de diámetro.
8. Parafilm.
9. Espátula plana y ancha con mango de madera.
10. Pinzas.
11. Charolas de aluminio de 10 cm de diámetro.
12. Vasos de precipitados de 250 mL.
13. Agitador orbital.
14. Agitador de vidrio
15. Termómetro.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

1. Se instala un sistema de vacío para determinar la resistencia específica a la filtración.
2. Se adapta un embudo Büchner a una probeta de 250 mL y se conecta una manguera de la bomba de vacío al brazo lateral de la probeta, cuidando que no se presenten fugas en el sistema. La presión de vacío debe encontrarse

dentro del intervalo de 400-500mmHg. Se coloca el papel filtro Whatman No.1 en el embudo Büchner y se humedece con agua destilada.

3. Se aplica vacío y se agrega agua destilada hasta un volumen conocido y fijo (10 mL). Se apaga el vacío y se vierten los 100mL de lodo en el centro del filtro cuidando que la muestra quede distribuida uniformemente en toda la superficie del mismo. Se espera 1 minuto antes de aplicar vacío, pasado este tiempo se inicia la succión y a partir de este momento se registra el volumen del filtrado cada 5 segundos durante 1 minuto hasta que la torta se cuartee, se presente caída de presión y/o la torta se seca.
4. Se retira el filtro del embudo, sin perder muestra, y se coloca en una bandeja de aluminio para pesarlo con la torta húmeda.

Se repite el punto 3 y 4 para todos los filtros colocándose en la mufla a 105°C durante 3 horas. Después del tiempo de secado se dejan enfriar en un desecador para proceder el pesado de la torta seca.

El procedimiento para la determinación numérica de la REF es el siguiente:

- 1) Determinar los sólidos totales (ST) de la muestra inicial de lodo.

$$ST = \frac{\text{Peso filtro con muestra} - \text{Peso del Filtro}}{\text{Volumen de lodo}}$$

Calcular el porcentaje de humedad del lodo (ci) a partir de la siguiente ecuación:

$$\% \text{ humedad}(c_i) = \left[\frac{1000 - ST}{1000} \right] * 100$$

Realizar un gráfico con los resultados obtenidos de la relación tiempo / volumen (t/V) en función del volumen filtrado y calcular la pendiente de la línea resultante

Determinar los sólidos totales en la torta seca.

Calcular el porcentaje de humedad (c_f) de los sólidos retenidos (torta) en el papel filtro mediante la siguiente ecuación:

$$\%humedad (c_f) = \left(\frac{STH - STS}{STH} \right) * 100$$

Donde:

STH = Sólidos en la torta húmeda.

STS = Sólidos en la torta seca.

Calcular el parámetro c mediante la siguiente ecuación:

$$c = \frac{1}{\frac{c_i}{100 - c_i} - \frac{c_f}{100 - c_f}}$$

Calcular la REF (r) aplicando la siguiente ecuación:

$$r = \frac{2PA^2b}{\mu c}$$

Donde:

r = Resistencia específica a la filtración (cm/g)

P = Presión de vacío aplicada (dina/cm² = g/cm s²)

A = Área del papel filtro (cm²)

b = Pendiente de la línea (t/V) vs V(s/cm⁶)

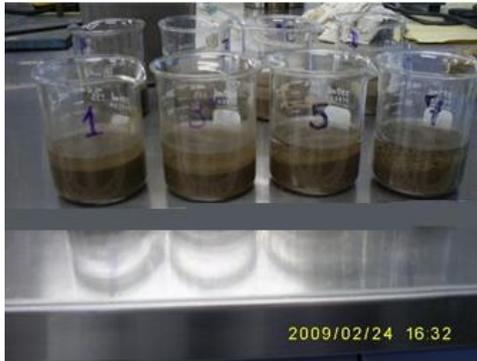
μ = Viscosidad del filtrado (poise = g/cm s)

c = Concentración de sólidos totales por volumen de filtrado (g/cm³)

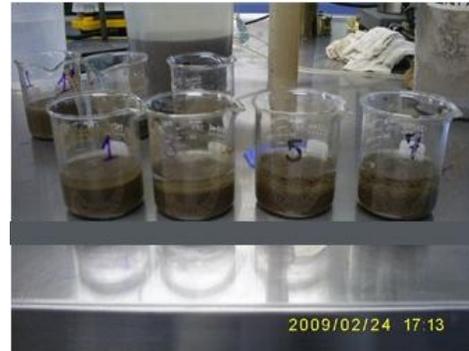
ANEXO C

67ANEXO C- REGISTRO FOTOGRÁFICO-

C.1 PRUEBA REF



Fotografía C.1 Lodo obtenido de la combinación Co/FI No.1 espesado con E1 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo).



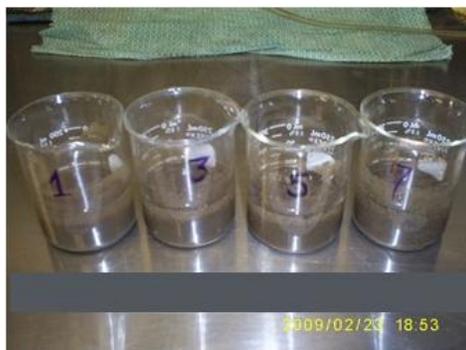
Fotografía C.2 Lodo obtenido de la combinación Co/FI No.1 espesado con E2 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo).



Fotografía C.3 Lodo obtenido de la combinación Co/FI No.1 espesado con E3 (poliacrilamida).



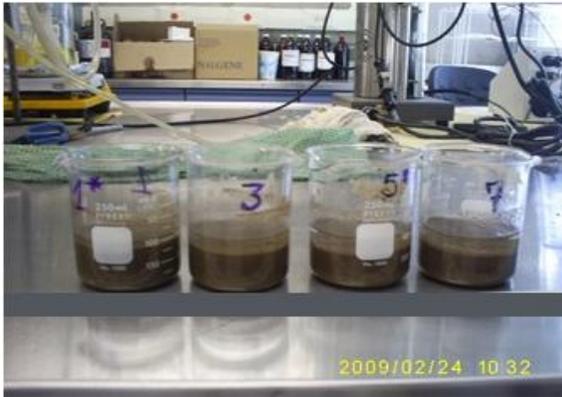
Fotografía C.4 Lodo obtenido de la combinación Co/FI No.1 espesado con E4 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo).



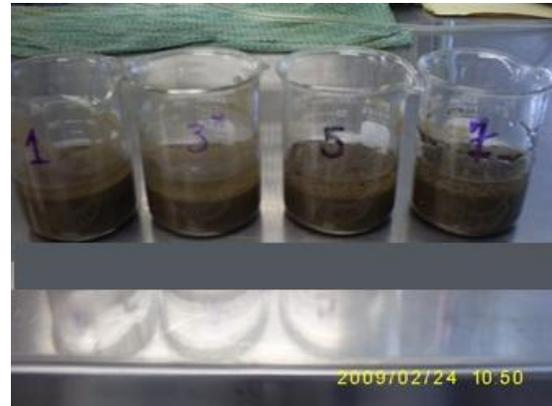
Fotografía C.5 Lodo obtenido de la combinación Co/FI No.2 espesado con E1 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo).



Fotografía C.6 Lodo obtenido de la combinación Co/FI No.2 espesado con E2 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo).



Fotografía C.7 Lodo obtenido de la combinación Co/FI No.2 espesado con E3 (poliacrilamida).



Fotografía C.8 Lodo obtenido de la combinación Co/FI No.2 espesado con E4 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo).



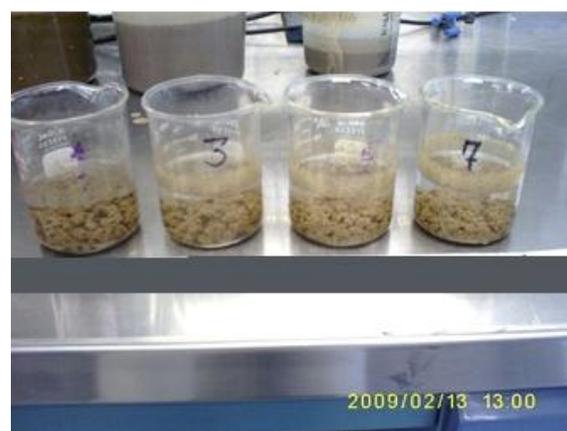
Fotografía C.9 Lodo obtenido de la combinación Co/FI No.3 espesado con E1 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo).



Fotografía C.10 Lodo obtenido de la combinación Co/FI No.3 espesado con E2 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo).



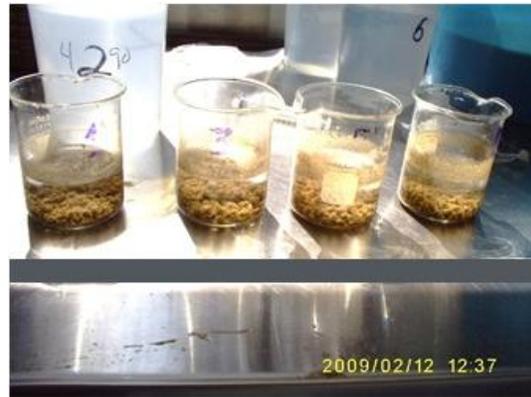
Fotografía C.11 Lodo obtenido de la combinación Co/FI No.3 espesado con E3 (poliacrilamida).



Fotografía C.12 Lodo obtenido de la combinación Co/FI No.3 espesado con E4 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo).



Fotografía C.13 Lodo obtenido de la combinación Co/FI No.4 espesado con E1 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo).



Fotografía C.14 Lodo obtenido de la combinación Co/FI No.4 espesado con E2 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo).



Fotografía C.15 Lodo obtenido de la combinación Co/FI No.4 espesado con E3 (poliacrilamida).



Fotografía C.16 Lodo obtenido de la combinación Co/FI No.4 espesado con E4 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo).



Fotografía C.17 Lodo obtenido de la combinación Co/FI No.5 espesado con E1 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo).



Fotografía C.18 Lodo obtenido de la combinación Co/FI No.5 espesado con E2 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo).



Fotografía C.19 Lodo obtenido de la combinación Co/FI No.4 espesado con E3 (poliacrilamida).



Fotografía C.20 Lodo obtenido de la combinación Co/FI No.4 espesado con E4 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo).



Fotografía C.21 Lodo obtenido de la combinación Co/FI No.6 espesado con E1 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo).



Fotografía C.22 Lodo obtenido de la combinación Co/FI No.6 espesado con E2 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo).



Fotografía C.23 Lodo obtenido de la combinación Co/FI No.6 espesado con E3 (poliacrilamida).



Fotografía C.24 Lodo obtenido de la combinación Co/FI No.6 con E4 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo).

ANEXO D

ANEXO D DATOS EXPERIMENTALES- Se presenta cada una de las 6 combinaciones Co/F/E finalmente seleccionadas las hojas de datos experimentales
Tabla D.1.1 Hoja de datos experimentales la combinación Co/FI No. 1 espesado con E4 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo).

UNAM UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO		FECHA DE ENSAYO	19/02/2009		FECHA DE MUESTREO		24/02/2009					
		Tipo/Conc. (mg/L)			Dosificación (mL/L)							
DOSIS (mg/L o ppm)	Coagulante/Dosis		1	2	3	4	5					
	Floculante/Dosis											
	Espesador de Lodos		0	1	3	5	7					
CODIGO DE PRUEBA DE ESPESADOR												
Agua Cruda	Turbiedad (NTU)		205.0									
Sólidos totales (g)	ST	Lodo húmedo (30mL)	30	30	30	30	30					
		Cápsula	42.0827	42.0827	42.0827	42.0827	42.0827	42.0827				
		Cápsula+Lodo seco	45.0112	45.0112	45.0112	45.0112	45.0112	45.0112				
		Lodo seco (g/L)	97.617	97.617	97.617	97.617	97.617	97.617				
		% Humedad del lodo (C _i)	90.238	90.238	90.238	90.238	90.238	90.238				
	Torta húmeda	Filtro	3.1865	31.2106	3.1796	3.1846	3.1802					
		Filtro+Muestra	23.0125	24.6111	25.2153	26.3224	27.5735					
		Muestra (STH)	19.826	22.0736	23.4828	23.9634	23.511					
	Torta seca	Filtro	3.1865	3.178	3.2101	3.2044	3.1897					
		Filtro+Muestra	12.2627	12.7499	12.7926	12.9010	13.0550					
		Muestra (STS)	9.0762	9.8998	10.0344	10.0134	9.813					
	%Humedad de la torta (C _i)		54.2207	55.1509	57.2692	58.2138	58.2621					
Observaciones: *Para dosis bajas los floculos presentan un tamaño muy fino. **Para dosis altas los floculos son de tamaño mediano. ***La torta de lodo presenta alta compactación.	Tiempo (s)		Volumen filtrado (mL)									
			V	t/V	V	t/V	V	t/V	V	t/V	V	t/V
	0	1	0	1	0	1	0	1	0	2	0	
	5	18	0.278	22	0.227	26	0.192	33	0.152	38	0.132	
	10	32	0.313	37	0.270	48	0.208	61	0.164	66	0.152	
	15	42	0.357	48	0.313	64	0.234	74	0.203	77	0.195	
	20	51	0.392	58	0.345	73	0.274	79	0.253	82	0.244	
	25	58	0.431	66	0.379	78	0.321	82	0.305	84	0.298	
	30	65	0.462	71	0.423	81	0.370	83	0.361	85	0.353	
	35	70	0.500	75	0.467	82	0.427	84	0.417	86	0.407	
	40	73	0.548	77	0.519	83	0.482	84	0.476	86	0.465	
	45	75	0.600	79	0.570	84	0.536	84	0.536	86	0.523	
	50	77	0.649	80	0.625	84	0.595	84	0.595	86	0.581	
55	78	0.705	81	0.679	84	0.655	84	0.655	86	0.640		
60	78	0.769	81	0.741	84	0.714	84	0.714	86	0.698		
RESISTENCIA ESPECÍFICA A LA FILTRACIÓN	c (g/cm ³)		0.12407	0.12477	0.12652	0.12737	0.12742					
	Presión aplicada	(mm Hg)	500	460	460	460	470					
		(dinas/cm ²)	666612	613283.04	613283.04	613283.04	626615.28					
	Temperatura filtrado (°C)		19	19.5	19	19	19					
	Área del filtro (cm ²)		63.6174	63.6174	63.6174	63.6174	63.6174					
	Viscosidad (Poise = g/cm s)		0.010325	0.0101725	0.010325	0.010325	0.010325					
	Pendiente (m) = (s/cm ⁶)		0.0052	0.0067	0.0022	0.0011	0.0014					
	Tiempo de cuarteo de torta (s)		45	48	25	18	16					
	r (cm/g)		2.20E+10	2.63E+10	8.38E+09	4.23E+09	5.56E+09					
	Tiempo de filtrado (TF)(s)		45	48	25	18	16					
sólidos totales (ST)(g/L)		97.617	97.617	97.617	97.617	97.617						
(TF/ST)(Ls/g)		0.461	0.492	0.256	0.184	0.164						

Tabla D.1.2 Hoja de datos experimentales para la combinación Co/FI No. 2 espesado con E3 (poliacrilamida).

		FECHA DE ENSAYO		13/02/2009		FECHA DE MUESTREO		04/02/2009					
		Tipo/Conc. (mg/L)		1		2		3					
DOSIS (mg/L o ppm)		Coagulante/Dosis		3		4		5					
		Floculante/Dosis		3		5		7					
		Espesador de Lodos		0		1		3					
		CODIGO DE PRUEBA DE ESPESADOR											
Agua Cruda		Turbiedad (NTU)		205.0									
Sólidos totales (g)	ST	Lodo húmedo (30mL)		30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00				
		Cápsula		42.07	42.07	42.07	42.07	42.07	42.07				
		Cápsula+Lodo seco		42.41	42.41	42.41	42.41	42.41	42.41				
		Lodo seco (g/L)		11.45	11.45	11.45	11.45	11.45	11.45				
		% Humedad del lodo (C _i)		98.85	98.85	98.85	98.85	98.85	98.85				
	Torta húmeda	Filtro		3.23	3.23	3.23	3.23	3.23	3.22				
		Filtro+Muestra		5.63	6.13	6.52	6.81	6.76					
		Muestra (STH)		2.40	2.90	3.30	3.58	3.53					
	Torta seca	Filtro		3.23	3.23	3.23	3.23	3.23	3.22				
		Filtro+Muestra		4.04	4.07	4.16	4.17	4.18					
		Muestra (STS)		0.81	0.84	0.93	0.95	0.96					
	%Humedad de la torta (C _t)		66.40	71.01	71.65	73.52	72.94						
Observaciones:		Tiempo (s)		Volumen filtrado (mL)									
				V	t/V	V	t/V	V	t/V	V	t/V	V	t/V
		0.0		12.0	0.0	11.0	0.0	16.0	0.0	10.0	0.0	2.0	0.0
		5.0		21.0	0.2	33.0	0.2	28.0	0.2	17.0	0.3	9.0	0.6
		10.0		26.0	0.4	49.0	0.2	42.0	0.2	26.0	0.4	16.0	0.6
		15.0		31.0	0.5	60.0	0.3	53.0	0.3	35.0	0.4	21.0	0.7
		20.0		35.0	0.6	70.0	0.3	62.0	0.3	42.0	0.5	26.0	0.8
		25.0		38.0	0.7	78.0	0.3	71.0	0.4	50.0	0.5	31.0	0.8
		30.0		41.0	0.7	84.0	0.4	78.0	0.4	55.0	0.5	37.0	0.8
		35.0		44.0	0.8	87.0	0.4	84.0	0.4	61.0	0.6	41.0	0.9
		40.0		47.0	0.9	90.0	0.4	89.0	0.4	66.0	0.6	45.0	0.9
		45.0		50.0	0.9	92.0	0.5	92.0	0.5	71.0	0.6	49.0	0.9
		50.0		52.0	1.0	93.0	0.5	94.0	0.5	77.0	0.6	54.0	0.9
55.0		54.0	1.0	94.0	0.6	95.0	0.6	81.0	0.7	57.0	1.0		
60.0		56.0	1.1	94.0	0.6	96.0	0.6	84.0	0.7	61.0	1.0		
RESISTENCIA ESPECÍFICA A LA FILTRACIÓN	c (g/cm ³)		0.01186	0.01192	0.01194	0.01197	0.01196						
	Presión aplicada	(mm Hg)	460	460	460	460	460						
		(dinas/cm ²)	6.13E+05	6.13E+05	6.13E+05	6.13E+05	6.13E+05						
	Temperatura filtrado (°C)		24.0	19.0	20.0	20.0	20.0						
	Área del filtro (cm ²)		63.62	63.62	63.62	63.62	63.62						
	Viscosidad (Poise = g/cm s)		8.80E-03	1.03E-02	1.00E-02	1.00E-02	1.00E-02						
	Pendiente (m) = (s/cm ⁵)		0.0231	0.0063	0.0057	0.0058	0.0078						
	Tiempo de cuarteo de torta (s)		300	118	139	173	189						
	r (cm/g)		1.10E+12	2.55E+11	2.37E+11	2.39E+11	3.22E+11						
	Tiempo de filtrado (TF)(s)		300	118	139	173	189						
sólidos totales (ST)(g/L)		11.45	11.45	11.45	11.45	11.45							
(TF/ST)(Ls/g)		26.193	10.303	12.136	15.105	16.502							

Tabla D.1.3 Hoja de datos experimentales para la combinación Co/FI No. 3 espesado con E3 (poliacrilamida).

		FECHA DE ENSAYO	19/02/2009		FECHA DE MUESTREO		23/02/2009					
		Tipo/Conc. (mg/L)			Dosificación (mL/L)							
DOSIS (mg/L o ppm)	Coagulante/Dosis											
	Floculante/Dosis											
	Espesador de Lodos											
CODIGO DE PRUEBA DE ESPESADOR												
Agua Cruda	Turbiedad (NTU)	205.0										
Sólidos totales (g)	ST	Lodo húmedo (30mL)	75.9031	75.9031	75.9031	75.9031	75.9031	75.9031	75.9031	75.9031		
		Cápsula	44.3493	44.3493	44.3493	44.3493	44.3493	44.3493	44.3493	44.3493		
		Cápsula+Lodo seco	47.0397	47.0397	47.0397	47.0397	47.0397	47.0397	47.0397	47.0397		
		Lodo seco (g/L)	89.6800	89.6800	89.6800	89.6800	89.6800	89.6800	89.6800	89.6800		
		% Humedad del lodo (C _i)	91.032	91.032	91.032	91.032	91.032	91.032	91.032	91.032		
	Torta húmeda	Filtro	3.1906	3.2190	3.1876	3.1909	3.1857	3.1909	3.1857	3.1857		
		Filtro+Muestra	22.9450	25.2524	25.2833	25.2337	27.6788	25.2337	27.6788	27.6788		
		Muestra (STH)	19.7544	22.0334	22.0957	22.0428	24.4931	22.0428	24.4931	24.4931		
	Torta seca	Filtro	3.1906	3.219	3.1876	3.1909	3.1857	3.1909	3.1857	3.1857		
		Filtro+Muestra	12.1871	13.1528	12.8387	12.6825	13.1676	12.6825	13.1676	13.1676		
		Muestra (STS)	8.9965	9.9338	9.6511	9.4916	9.9819	9.4916	9.9819	9.9819		
	%Humedad de la torta (C _t)		54.4582	54.9148	56.3214	56.9401	59.2461	56.9401	59.2461	59.2461		
Observaciones: Lodo muy espeso debe permanecer en agitacion constante para facilitar su manejo	Tiempo (s)		Volumen filtrado (mL)									
			V	t/V	V	t/V	V	t/V	V	t/V		
	0		9	0	2	0	3	0	2	0		
	5		24	0.208	24	0.208	25	0.200	26	0.192		
	10		37	0.270	39	0.256	43	0.233	49	0.204		
	15		48	0.313	51	0.294	57	0.263	64	0.234		
	20		56	0.357	62	0.323	66	0.303	72	0.278		
	25		63	0.397	68	0.368	72	0.347	77	0.325		
	30		68	0.441	73	0.411	76	0.395	79	0.380		
	35		72	0.486	76	0.461	78	0.449	80	0.438		
	40		74	0.541	78	0.513	80	0.500	81	0.494		
	45		76	0.592	78	0.577	81	0.556	82	0.549		
	50		77	0.649	79	0.633	82	0.610	82	0.610		
	55		78	0.705	79	0.696	82	0.671	82	0.671		
60		79	0.759	80	0.750	82	0.732	82	0.732			
RESISTENCIA ESPECÍFICA A LA FILTRACIÓN	c (g/cm ³)		0.11167		0.11195		0.11285		0.11327		0.11498	
	Presión aplicada	(mm Hg)	460		460		460		460		460	
		(dinas/cm ²)	613283.04		613283.04		613283.04		613283.04		613283.04	
	Temperatura filtrado (°C)		20		17		17		17		17	
	Área del filtro (cm ²)		63.6174		63.6174		63.6174		63.6174		63.6174	
	Viscosidad (Poise = g/cm s)		0.01002		0.010935		0.010935		0.010935		0.010935	
	Pendiente (m) = (s/cm ⁶)		0.0089		0.0034		0.0024		0.0017		0.0020	
	Tiempo de cuarteo de torta (s)		66		30		25		23		21	
	r (cm/g)		3.96E+10		1.38E+10		9.69E+09		6.78E+09		7.85E+09	
	Tiempo de filtrado (TF)(s)		66		30		25		23		21	
solidos totales (ST)(g/L)		89.680		89.680		89.680		89.680		89.680		
(TF/ST)(Ls/g)		0.736		0.335		0.279		0.256		0.234		

Tabla D.1.4 Hoja de datos experimentales para la combinación Co/FI No. 4 espesado con E3 (poliacrilamida).

		FECHA DE ENSAYO		12/02/2009		FECHA DE MUESTREO		04/02/2009					
		Tipo/Conc. (mg/L)		1	2	Dosificación (mL/L)		3	4	5			
DOSIS (mg/L o ppm)	Coagulante/Dosis												
	Floculante/Dosis												
	Espesador de Lodos			0	1	3	5	7					
CODIGO DE PRUEBA DE ESPESADOR													
Agua Cruda		Turbiedad (NTU)		205.0									
Sólidos totales (g)	ST	Lodo húmedo (30mL)		30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00				
		Cápsula		44.33	44.33	44.33	44.33	44.33	44.33				
		Cápsula+Lodo seco		44.61	44.61	44.61	44.61	44.61	44.61				
		Lodo seco (g/L)		9.37	9.37	9.37	9.37	9.37	9.37				
		% Humedad del lodo (C _i)		99.06	99.06	99.06	99.06	99.06	99.06				
	Torta húmeda	Filtro		3.21	3.23	3.24	3.21	3.25					
		Filtro+Muestra		5.90	6.35	6.13	5.96	6.91					
		Muestra (STH)		2.69	3.13	2.90	2.75	3.66					
	Torta seca	Filtro		3.21	3.23	3.24	3.21	3.25					
		Filtro+Muestra		3.94	4.05	4.05	4.03	4.09					
		Muestra (STS)		0.73	0.82	0.81	0.82	0.84					
	%Humedad de la torta (C _i)		72.98	73.76	71.94	70.21	77.12						
	Observaciones:		Tiempo (s)		Volumen filtrado (mL)								
			V	t/V	V	t/V	V	t/V	V	t/V	V	t/V	
0.0			10.0	0.0	6.0	0.0	10.0	0.0	9.0	0.0	8.0	0.0	
5.0			18.0	0.3	24.0	0.2	28.0	0.2	15.0	0.3	15.0	0.3	
10.0			24.0	0.4	40.0	0.3	33.0	0.3	26.0	0.4	24.0	0.4	
15.0			28.0	0.5	52.0	0.3	43.0	0.3	34.0	0.4	33.0	0.5	
20.0			31.0	0.6	62.0	0.3	51.0	0.4	40.0	0.5	40.0	0.5	
25.0			34.0	0.7	71.0	0.4	58.0	0.4	48.0	0.5	48.0	0.5	
30.0			37.0	0.8	76.0	0.4	64.0	0.5	54.0	0.6	54.0	0.6	
35.0			39.0	0.9	80.0	0.4	70.0	0.5	59.0	0.6	60.0	0.6	
40.0			42.0	1.0	84.0	0.5	76.0	0.5	61.0	0.7	66.0	0.6	
45.0			44.0	1.0	86.0	0.5	80.0	0.6	68.0	0.7	71.0	0.6	
50.0			46.0	1.1	88.0	0.6	84.0	0.6	73.0	0.7	76.0	0.7	
55.0		48.0	1.1	90.0	0.6	87.0	0.6	78.0	0.7	80.0	0.7		
60.0		50.0	1.2	91.0	0.7	89.0	0.7	82.0	0.7	85.0	0.7		
RESISTENCIA ESPECÍFICA A LA FILTRACIÓN	c (g/cm ³)		0.00971		0.00972		0.00969		0.00967		0.00977		
	Presión aplicada	(mm Hg)	460		460		460		460		460		
		(dinas/cm ²)	6.13E+05		6.13E+05		6.13E+05		6.13E+05		6.13E+05		
	Temperatura filtrado (°C)		23.0		22.5		23.5		24.0		24.0		
	Área del filtro (cm ²)		63.62		63.62		63.62		63.62		63.62		
	Viscosidad (Poise = g/cm s)		9.11E-03		9.26E-03		8.95E-03		8.80E-03		8.80E-03		
	Pendiente (m) = (s/cm ⁶)		0.0295		0.0062		0.0068		0.0061		0.0050		
	Tiempo de cuarteo de torta (s)		415		135		160		145		174		
	r (cm/g)		1.66E+12		3.41E+11		3.87E+11		3.58E+11		2.88E+11		
	Tiempo de filtrado (TF)(s)		415		135		160		145		174		
	solidos totales (ST)(g/L)		9.37		9.37		9.37		9.37		9.37		
(TF/ST)(Ls/g)		44.290		14.408		17.076		15.475		18.570			

Tabla D.1.5 Hoja de datos experimentales para la combinación Co/FI No. 5 espesado con E3 (poliacrilamida).

		FECHA DE ENSAYO	11/02/2009		FECHA DE MUESTREO		04/02/2009					
		Tipo/Conc. (mg/L)	Dosificación (mL/L)									
			1	2	3	4	5					
DOSIS (mg/L o ppm)	Coagulante/Dosis											
	Floculante/Dosis											
	Espesador de Lodos	0	1	3	5	7						
		CODIGO DE PRUEBA DE ESPESADOR										
Agua Cruda		Turbiedad (NTU)	205.0									
Sólidos totales (g)	ST	Lodo húmedo (30mL)	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00				
		Cápsula	44.35	44.35	44.35	44.35	44.35	44.35				
		Cápsula+Lodo seco	45.24	45.24	45.24	45.24	45.24	45.24				
		Lodo seco (g/L)	29.70	29.70	29.70	29.70	29.70	29.70				
	% Humedad del lodo (C _i)		97.03	97.03	97.03	97.03	97.03	97.03				
	Torta húmeda	Filtro	3.20	3.22	3.21	3.22	3.22	3.24				
		Filtro+Muestra	9.55	9.01	11.01	10.53	11.44					
		Muestra (STH)	6.35	5.79	7.80	7.31	8.20					
	Torta seca	Filtro	3.20	3.22	3.21	3.22	3.24					
		Filtro+Muestra	5.60	5.64	5.93	5.78	5.85					
		Muestra (STS)	2.40	2.42	2.72	2.56	2.61					
	%Humedad de la torta (C _i)		62.26	58.17	65.17	64.96	68.21					
de pequeño tamaño para la dosificación de 1 mL, mediano		Tiempo (s)	Volumen filtrado (mL)									
			V	t/V	V	t/V	V	t/V	V	t/V	V	t/V
		0.0	3.0	0.0	14.0	0.0	12.0	0.0	14.0	0.0	12.0	0.0
		5.0	10.0	0.5	41.0	0.1	26.0	0.2	40.0	0.1	23.0	0.2
		10.0	17.0	0.6	61.0	0.2	45.0	0.2	72.0	0.1	44.0	0.2
		15.0	23.0	0.7	76.0	0.2	60.0	0.3	83.0	0.2	66.0	0.2
		20.0	27.0	0.7	83.0	0.2	72.0	0.3	87.0	0.2	78.0	0.3
		25.0	30.0	0.8	88.0	0.3	82.0	0.3	89.0	0.3	85.0	0.3
		30.0	34.0	0.9	91.0	0.3	87.0	0.3	90.0	0.3	89.0	0.3
		35.0	36.0	1.0	93.0	0.4	90.0	0.4	91.0	0.4	92.0	0.4
		40.0	39.0	1.0	94.0	0.4	93.0	0.4	92.0	0.4	94.0	0.4
		45.0	42.0	1.1	96.0	0.5	94.0	0.5	93.0	0.5	96.0	0.5
		50.0	44.0	1.1	97.0	0.5	95.0	0.5	93.0	0.5	97.0	0.5
		55.0	46.0	1.2	98.0	0.6	96.0	0.6	93.0	0.6	98.0	0.6
		60.0	49.0	1.2	98.0	0.6	97.0	0.6	94.0	0.6	98.0	0.6
RESISTENCIA ESPECÍFICA A LA FILTRACIÓN	c (g/cm ³)		0.03223	0.03197	0.03247	0.03245	0.03276					
	Presión aplicada	(mm Hg)	460	460	450	450	430					
		(dinas/cm ²)	6.13E+05	6.13E+05	6.00E+05	6.00E+05	5.73E+05					
	Temperatura filtrado (°C)		23.0	23.0	23.5	23.5	23.0					
	Área del filtro (cm ²)		63.62	63.62	63.62	63.62	63.62					
	Viscosidad (Poise = g/cm s)		9.11E-03	9.11E-03	8.95E-03	8.95E-03	9.11E-03					
	Pendiente (m) = (s/cm ⁶)		0.0199	0.0070	0.0052	0.0055	0.0039					
	Tiempo de cuarteo de torta (s)		328	65	68	80	78					
	r (cm/g)		3.37E+11	1.20E+11	8.64E+10	9.24E+10	6.07E+10					
	Tiempo de filtrado (TF)(s)		328	65	68	80	78					
sólidos totales (ST)(g/L)		29.70	29.70	29.70	29.70	29.70						
(TF/ST)(Ls/g)		11.045	2.189	2.290	2.694	2.627						

Tabla D.1.6 Hoja de datos experimentales para la combinación Co/FI No. 6 espesado con E3 (poliacrilamida).

		FECHA DE ENSAYO			FECHA DE MUESTREO							
		10/02/2009			04/02/2009							
		Tipo/Conc. (mg/L)		Dosificación (mL/L)								
		1	2	3	4	5						
DOSIS (mg/L o ppm)	Coagulante/Dosis											
	Floculante/Dosis											
	Espesador de Lodos	0	1	3	5	7						
CODIGO DE PRUEBA DE ESPESADOR												
Agua Cruda	Turbiedad (NTU)	205.0										
Sólidos totales (g)	ST	Lodo húmedo (30mL)	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00					
		Cápsula	44.35	44.35	44.35	44.35	44.35					
		Cápsula+Lodo seco	44.84	44.84	44.84	44.84	44.84					
		Lodo seco (g/L)	16.46	16.46	16.46	16.46	16.46					
	% Humedad del lodo (C _i)		98.35	98.35	98.35	98.35	98.35					
	Torta húmeda	Filtro	3.22	3.20	3.22	3.23	3.22					
		Filtro+Muestra	7.71	8.22	8.94	8.92	9.71					
		Muestra (STH)	4.49	5.02	5.72	5.68	6.50					
	Torta seca	Filtro	3.22	3.20	3.22	3.23	3.22					
		Filtro+Muestra	4.68	4.91	4.89	4.87	4.86					
Muestra (STS)		1.46	1.71	1.67	1.64	1.64						
%Humedad de la torta (C _t)		67.49	65.92	70.81	71.23	74.72						
anulos crecientes en tamaño y tortas poco uniformes al incrementar el tiempo		Tiempo (s)		Volumen filtrado (mL)								
		V	t/V	V	t/V	V	t/V	V	t/V	V	t/V	
		0.0	12.0	0.0	8.0	0.0	15.0	0.0	12.0	0.0	12.0	0.0
		5.0	20.0	0.3	37.0	0.1	29.0	0.2	18.0	0.3	19.0	0.3
		10.0	25.0	0.4	64.0	0.2	46.0	0.2	31.0	0.3	33.0	0.3
		15.0	28.0	0.5	78.0	0.2	61.0	0.2	41.0	0.4	46.0	0.3
		20.0	32.0	0.6	85.0	0.2	73.0	0.3	50.0	0.4	58.0	0.3
		25.0	34.0	0.7	89.0	0.3	83.0	0.3	58.0	0.4	70.0	0.4
		30.0	37.0	0.8	91.0	0.3	89.0	0.3	66.0	0.5	77.0	0.4
		35.0	40.0	0.9	92.0	0.4	91.0	0.4	74.0	0.5	83.0	0.4
		40.0	42.0	1.0	94.0	0.4	94.0	0.4	81.0	0.5	88.0	0.5
		45.0	44.0	1.0	95.0	0.5	96.0	0.5	86.0	0.5	91.0	0.5
		50.0	46.0	1.1	95.0	0.5	97.0	0.5	90.0	0.6	93.0	0.5
		55.0	48.0	1.1	96.0	0.6	98.0	0.6	92.0	0.6	94.0	0.6
		60.0	50.0	1.2	96.0	0.6	98.0	0.6	94.0	0.6	96.0	0.6
RESISTENCIA ESPECÍFICA A LA FILTRACIÓN	c (g/cm ³)		0.01733	0.01729	0.01744	0.01745	0.01760					
	Presión aplicada	(mm Hg)	450	460	440	445	420					
		(dinas/cm ²)	6.00E+05	6.13E+05	5.87E+05	5.93E+05	5.60E+05					
	Temperatura filtrado (°C)		20.0	23.0	23.0	23.0	23.0					
	Área del filtro (cm ²)		63.62	63.62	63.62	63.62	63.62					
	Viscosidad (Poise = g/cm s)		1.00E-02	9.11E-03	9.11E-03	9.11E-03	9.11E-03					
	Pendiente (m) = (s/cm ⁶)		0.0317	0.0051	0.0048	0.0042	0.0040					
	Tiempo de cuarteo de torta (s)		470	75	80	108	95					
	r (cm/g)		8.86E+11	1.61E+11	1.43E+11	1.26E+11	1.12E+11					
	Tiempo de filtrado (TF)(s)		470	75	80	108	95					
sólidos totales (ST)(g/L)		16.46	16.46	16.46	16.46	16.46						
(TF/ST)(Ls/g)		28.560	4.557	4.861	6.563	5.773						

D.2 DATOS EXPERIMENTALES CONDENSADOS DE LA PRUEBA REF

Tabla D.2.1 Valores REF para la combinación Co/FI No.1 (clorhidrato de aluminio-poliDADMAC/poliamina) a las 4 dosis de Espesante.

Coagulante	Floculante	E1 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo)		E2 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo)		E3 (poliacrilamida)		E4 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo)	
Clorhidrato de aluminio-poliDADMAC - 5.01 mg/L _{Agua cruda}	Poliamina- 0.38 mg/L _{Agua cruda}	REF	TF/ST	REF	TF/ST	REF	TF/ST	REF	TF/ST
Dosis del espesante (mL _{Espesante} /100mL de lodo)	Dosis (kg polielectrolito/ton de lodo base seca)								
0	0.0	6.69E+10	2.23	6.69E+10	2.23	6.72E+10	2.23	6.69E+10	2.23
1	0.1	4.95E+10	1.37	5.47E+10	1.47	4.35E+10	1.39	5.10E+10	1.38
3	0.2	2.90E+10	1.02	3.81E+10	1.15	3.45E+10	1.01	3.00E+10	0.99
5	0.3	3.75E+10	0.87	4.11E+10	1.15	3.20E+10	0.93	3.44E+10	0.79
7	0.4	4.23E+10	0.75	4.36E+10	0.82	3.72E+10	0.79	2.40E+10	0.75

Tabla D.2.2 Valores REF para la combinación Co/FI No. 2 (Policloruro de aluminio/copolímero de acrilamida-ácido acrílico) a las 4 dosis de Espesante.

Coagulante	Floculante	E1 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo)		E2 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo)		E3 (poliacrilamida)		E4 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo)	
Policloruro de aluminio (17.179mg/L _{agua cruda})	Copolímero de acrilamida-ácido acrílico (0.296mg/L _{agua cruda})	REF	TF/ST	REF	TF/ST	REF	TF/ST	REF	TF/ST
Dosis del espesante (mL _{Espesante} /100mL de lodo)	Dosis (kg pol/ton de lodo base seca)								
0	0	1.12E+12	25.74	1.12E+12	25.74	1.12E+12	25.74	1.12E+12	25.92
1	0.5	3.43E+11	10.91	3.58E+11	9.31	2.54E+11	10.98	2.45E+11	7.28
3	1.5	7.44E+11	23.17	4.33E+11	18.90	2.33E+11	12.18	3.69E+11	16.44
5	2.4	8.96E+11	26.67	6.88E+11	22.24	2.60E+11	15.75	5.28E+11	23.86
7	3.4	1.20E+12	29.25	1.52E+12	38.50	2.77E+11	17.28	6.90E+11	30.90

Tabla D.2.3 Valores REF para la combinación Co/FI No.3 (Clorhidróxido de aluminio-poliDADMAC/poliDADMAC) a las 4 dosis de Espesante.

Coagulante	Floculante	E1 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo)		E2 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo)		E3 (poliacrilamida)		E4 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo)	
		REF	TF/ST	REF	TF/ST	REF	TF/ST	REF	TF/ST
Clorhidróxido de aluminio-poliDADMAC (2.216 mg/L _{agua cruda})	poliDADMAC (0.701 mg/L _{agua cruda})								
Dosis del espesante (mL _{Espesante} /100mL de lodo)	Dosis (kg pol/ton de lodo base seca)								
0	0.0	3.92E+10	0.76	3.92E+10	0.76	3.92E+10	0.76	3.92E+10	0.76
1	0.1	1.47E+10	0.34	1.12E+10	0.33	1.48E+10	0.34	1.90E+10	0.42
3	0.2	1.12E+10	0.26	1.59E+10	0.32	1.05E+10	0.29	1.20E+10	0.32
5	0.3	9.89E+09	0.25	1.36E+10	0.24	6.97E+09	0.26	1.01E+10	0.20
7	0.4	8.71E+09	0.39	1.38E+10	0.26	8.15E+09	0.24	8.08E+09	0.46

Tabla D.2.4 Valores REF para la combinación Co/FI No. 4 (Polihidróxicloruro de aluminio/poliamina) a las 4 dosis de Espesante.

Coagulante	Floculante	E1 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo)		E2 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo)		E3 (poliacrilamida)-PWG		E4 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo)	
		REF	TF/ST	REF	TF/ST	REF	TF/ST	REF	TF/ST
Polihidróxicloruro de aluminio (13.063mg/L _{agua cruda})	Poliamina (0.349mg/L _{agua cruda})								
Dosis del espesante (mL _{Espesante} /100mL de lodo)	Dosis (kg pol/ton de lodo base seca)								
0	0.0	1.59E+12	43.83	1.59E+12	43.83	1.59E+12	43.83	1.59E+12	43.83
1	0.6	3.21E+11	15.93	3.60E+11	10.59	3.75E+11	13.79	4.13E+11	17.27
3	1.2	3.57E+11	22.99	2.38E+11	14.97	3.54E+11	17.32	2.10E+11	14.22
5	2.8	1.60E+12	43.30	3.61E+11	27.10	3.48E+11	16.73	7.48E+11	23.52
7	3.9	2.49E+12	48.91	3.47E+11	20.26	2.95E+11	17.75	5.54E+11	24.59

Tabla D.2.5 Valores REF para la combinación Co/FI No. 5 (Sulfato de aluminio libre de hierro/poliDADMAC) a las 4 dosis de Espesante.

Coagulante	Floculante	E1 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo)		E2 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo)		E3 (poliacrilamida)-PWG		E4 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo)	
$Al_2(SO_4)_3$ libre de Fe - 11.143 mg/L _{agua cruda}	poliDADMAC 0.701 mg/L _{agua cruda}	REF	TF/ST	REF	TF/ST	REF	TF/ST	REF	TF/ST
Dosis del espesante (mL _{Espesante} /100mL de lodo)	Dosis (kg pol/ton de lodo base seca)								
0	0.0	3.40E+11	10.74	3.40E+11	10.74	3.40E+11	10.74	3.40E+11	10.74
1	0.2	1.15E+11	3.18	1.11E+11	3.13	1.30E+11	2.33	1.26E+11	2.75
3	0.5	9.89E+10	4.92	9.18E+10	4.64	8.43E+10	2.36	8.71E+10	3.30
5	0.9	1.29E+11	6.24	8.00E+10	5.76	9.51E+10	2.79	9.03E+10	3.27
7	1.2	7.30E+10	6.29	9.28E+10	5.35	6.54E+10	2.86	7.52E+10	3.71

Tabla D.2. 6 Valores REF para la combinación Co/FI No.6 (Sulfato de aluminio estándar/poliamina) a las 4 dosis de Espesante.

Coagulante	Floculante	E1 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo)		E2 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo)		E3 (poliacrilamida)-PWG		E4 (Copolímero de acrilamida-cloruro de metilo)	
$Al_2(SO_4)_3$ STD - 1041.51 mg/L _{agua cruda}	Poliamina	REF	TF/ST	REF	TF/ST	REF	TF/ST	REF	TF/ST
Dosis del espesante (mL _{Espesante} /100mL de lodo)	Dosis (kg pol/ton de lodo base seca)								
0	0	8.70E+11	25.94	8.70E+11	25.94	8.70E+11	25.94	8.70E+11	25.94
1	0.2	1.87E+11	8.30	2.22E+11	4.34	1.71E+11	4.83	2.08E+11	4.52
3	0.6	1.31E+11	10.30	2.64E+11	10.23	1.48E+11	4.98	1.71E+11	7.13
5	0.9	1.19E+11	10.75	4.13E+11	15.46	1.31E+11	6.95	3.10E+11	11.01
7	1.3	7.78E+11	16.37	1.54E+11	8.18	1.10E+11	5.78	1.29E+11	8.49

ANEXO E

ANEXO E –MATRIZ DE DECISIÓN MULTICRITERIO

E.1 MATRIZ DE DECISIÓN MULTICRITERIO (MDM)

La Matriz de Decisión Multicriterio (MDM) es una herramienta para la evaluación sistematizada de todos los parámetros técnico-económicos que influyen un proceso. Esta metodología, basada en un conocimiento general de datos principalmente de tipo técnico y económico, puede permitir la selección de las mejores opciones a los responsables de la toma de decisiones.

Los pasos a seguir para utilizar esta técnica se describen a continuación

1. Identificar criterios de evaluación

Se identifican los datos a evaluar por dicha matriz, los cuales podrán ser técnicos, económicos, sociales, ambientales, etc., cada aspecto a su vez, estará integrado por otros conceptos, por ejemplo la factibilidad técnica puede estar dividida en calidad del agua, volumen producido de lodo, hierro residual, valor final de REF, etc.

2. Ponderación de los Aspectos a ser Evaluados

Una vez identificados los aspectos a ser evaluados, se procede a asignarles un peso o ponderación, con base en criterios recomendados, los cuales pueden variar para cada situación específica (Morgan-Sagastume *et al.*, 1999). La suma total de las ponderaciones de todos los aspectos considerados deberá ser igual a 100%.

3. Construcción de la Matriz

La matriz, compuesta de “ n_i ” columnas (donde i representara los aspectos a ser evaluados) y “ m_j ” renglones (donde j representa las distintas opciones a evaluar), lo anterior quiere decir que dicha matriz tendrá tantas columnas como aspectos a ser evaluados, y tantos renglones como opciones de elección existan.

4. Evaluación de las opciones

Una vez construida la MDM, se asigna a cada combinación columna-renglón (que en nuestro caso representa la combinación -Aspecto a ser evaluado-Opción a evaluar) una calificación, la cual debe encontrarse en el intervalo de 0 a 5 (intervalo A), donde 5 representara la mejor calificación, la calificación asignada será función de una equivalencia establecida a partir de los parámetros técnicos y económicos.

$$A \in [0,5] \dots \dots \dots \text{donde } A_{\text{máx}}=5$$

Se muestra a continuación una figura que representa esquemáticamente lo descrito.

	ANÁLISIS TÉCNICO			ANÁLISIS ECONÓMICO	
# Aspecto	1	2	3	4	5
Aspecto	% de Humedad Final	Tiempo empleado para proceso de Espesamiento	Valor final de REF	Costo de almacenamiento	Costo de Producto
Opción					
Espesante 1	5	4	5	5	2
Espesante 2	3	2	4	2	3
Espesante 3	1	0	2	1	5

Figura E. 1 Esquema representativo para la construcción de la MDM

Una vez construida la matriz y asignadas las calificaciones se suman los valore de cada renglón

5. Realización de Operaciones

La primera operación a realizar es

Para cada aspecto a evaluar se debe (técnico, económico, social, etc.) se debe de las columnas (o aspectos individuales a ser evaluados) para cada renglón (Σm_j), como segundo paso se busca el valor de Σm_j máximo posible por medio de la ecuación E.1

$$\sum mj \text{ máximo posible} = \# \text{ de columnas} * A_{\text{max}} = \# \text{ de columnas} * 5 \dots\dots\dots \text{Ecuación E.1}$$

Como tercera paso se realizan las operaciones descrita por las ecuaciones E.2 y E.3.

$$B = \frac{mj}{\sum mj \text{ máximo posible}} \dots\dots\dots \text{Ecuación E.2}$$

$$C = \frac{\sum mj}{\sum mj \text{ máximo posible}} \dots\dots\dots \text{Ecuación E.3}$$

Una vez obtenidos estos valores para cada Aspecto, se procede a una suma de los subtotales (Es decir las sumas individuales de cada aspecto), dicho procedimiento se ve ilustrado en la figura E.2.

# Aspecto	ANÁLISIS TÉCNICO			Subtotal	ANÁLISIS ECONÓMICO			Total
	1	2	3		4	5	Subtotal	
Aspecto	%				Costo de	Costo de		$\sum mj_{\text{técnico}} +$
Opción	Humedad	$\Theta_{\text{Espesamiento}}$	REF	$\sum mj_{\text{técnico}}$	almacén	Espesante	$\sum mj_{\text{económ.}}$	$\sum mj_{\text{económ.}}$
Espesante 1	5	4	5	14	5	2	7	21
B	0.33	0.27	0.33	C=0.93	0.5	0.2	C=0.7	C_{total}=1.63
Espesante 2	3	2	4	9	2	3	5	14
B	0.2	0.13	0.27	C=0.6	0.2	0.3	C=0.5	C_{total}=1.1
Espesante 3	1	0	2	3	1	5	6	9
B	0.07	0	0.13	C=0.2	0.1	0.5	C=0.6	C_{total}=0.8
Número de Columnas	3				2			5
$\sum mj_{\text{máx posible}}$	15				10			25

$A_{\text{máxima}}$	5
---------------------	---

Figura E. 2 Operaciones en la MDM

Una vez obtenidos dichos valores, solo queda multiplicar cada valor de B por el valor porcentual que le corresponda, en el ejemplo anterior, de decidir una ponderación 30% técnica, 70% económica, cada valor individual de B en los aspectos técnicos se multiplicaría por 30 para luego proceder a la suma de los

mismos, y cada valor individual se multiplicaría por 70 para después proceder, de igual manera a la posterior suma, lo anterior se ilustra en la figura E.3.

# Aspecto	ANÁLISIS TÉCNICO			Subtotal	ANÁLISIS ECONÓMICO			Total
	1	2	3		4	5	Subtotal	
Aspecto	% Humedad	Θ	REF	$\Sigma m_{j\text{técnico}}$	Costo de	Costo de	$\Sigma m_{j\text{económ.}}$	
Opción		Espesamiento			almacén	Espesante		
Espesante 1	5	4	5	14	5	2	7	21
B	0.33	0.27	0.33	0.93	0.5	0.2	0.7	1.63
Calificación Ponderada	10	8	10	28	35	14	49	77.00
Espesante 2	3	2	4	9	2	3	5	14
B	0.2	0.13	0.27	0.6	0.2	0.3	0.5	1.1
Calificación Ponderada	6	4	8	18	14	21	35	53
Espesante 3	1	0	2	3	1	5	6	9
B	0.07	0	0.13	0.2	0.1	0.5	0.6	0.8
Calificación Ponderada	2	0	4	6	7	35	42	48
Ponderación	30				70			

Figura E. 3 Operaciones Finales en la MDM.

El valor que se obtiene en dicha matriz, es el valor porcentual de factibilidad que ofrece la matriz, en nuestro ejemplo, la mayor factibilidad técnico económica es arrojada por el Espesante 1.

ANEXO F

ANEXO F –MÉTODOS DE DESHIDRATACIÓN DE LODOS

Métodos de deshidratación de lodos

Sistemas de secado natural

Los sistemas de secado natural tienen como principal ventaja el costo de su implementación, siempre que se disponga del área suficiente a bajo precio. Tienen un bajo consumo de energía y de productos químicos, una baja sensibilidad a las variaciones cuantitativas y cualitativas del lodo y simplicidad de operación. Son apropiados para plantas pequeñas o aisladas dadas sus altas exigencias de superficie. Otras desventajas son una alta dependencia de las condiciones climáticas y un alto requerimiento de mano de obra para la remoción del lodo (Garcés *et al.*, 2000).

Lagunas de secado

En las lagunas, el secado de los lodos se realiza por la separación del sobrenadante, principalmente, por la evaporación. La carga óptima de aplicación de sólidos (kg/m^2) en función de la concentración de sólidos y profundidad óptima de aplicación del lodo en el lecho, depende de la resistencia específica a la filtración del lodo a una presión diferencial de 0.5 bar ($r_{0.5}$).

Lechos de secado

En los lechos de secado, la remoción de agua se realiza por los mismos mecanismos que en las lagunas, agregándose el drenaje gravitacional a través de arena, grava y tubería de recolección.

Sistemas de deshidratación mecánica

Los sistemas de deshidratación mecánica tienen como ventajas principales el necesitar áreas menores, independencia de las condiciones meteorológicas y minimización de ciertos impactos ambientales. Entre sus desventajas se

encuentran el mayor consumo de energía, la necesidad de utilizar acondicionantes químicos adecuados, una alta sensibilidad a las variaciones cualitativas y cuantitativas del lodo, la necesidad de un lavado frecuente de las telas filtrantes y otros equipos en contacto directo con el lodo y los eventuales problemas de ruido y vibraciones excesivas provocadas por el funcionamiento de las bombas y motores. Cada equipo tendrá una eficiencia y carga de aplicación recomendada que dependerá de la naturaleza del lodo, el grado de acondicionamiento químico, la frecuencia de utilización, la mantención y el producto final deseado.

Filtros al vacío

En los filtros al vacío, la remoción del agua contenida en el lodo se realiza por un vacío creado dentro de un tambor recubierto, externamente, con un tejido filtrante. 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 (Garcés *et al.*, 2000).

Filtros prensa de banda

En los filtros prensa 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 (Garcés *et al.*, 2000).

En estos filtros se consiguen concentraciones del orden del 20% en materia seca (http://potablewater.iespana.es/tratamiento_de_lodos.htm). La figura F.1 ilustra un filtro banda.

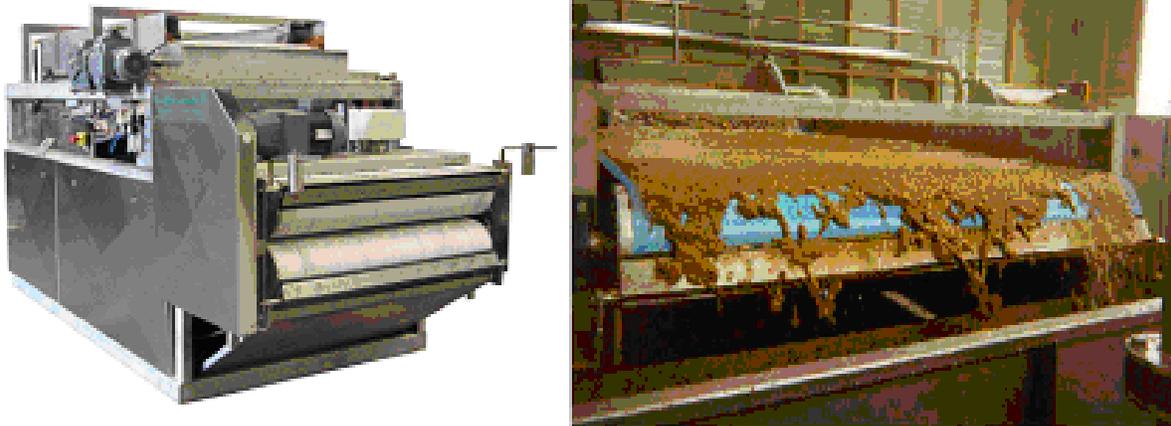


Figura F. 1 Filtro Banda

(http://potablewater.iespana.es/tratamiento_de_lodos.htm)

Filtros prensa de placas

En los filtros prensa de placas, la remoción se realiza por medio de un bombeo al interior de cámaras recubiertas con tejido filtrante, definidas entre dos placas adyacentes. Al continuar bombeando, se fuerza un flujo a través de la torta que se forma en el interior de las cámaras, por la acumulación de sólidos en la superficie del tejido.

Cuando los sólidos y el agua remanente llenan el volumen disponible, el bombeo se detiene, la prensa se abre permitiendo la salida de cada una de las tortas de lodo deshidratado contenidas en las cámaras, se ensambla la prensa y se vuelve a iniciar el ciclo (Garcés *et al.*, 2000).

El funcionamiento es discontinuo, y muy laborioso, obteniéndose un lodo bastante seco, próximo al 30% en materia seca. La figura F.2 ilustra un filtro prensa.

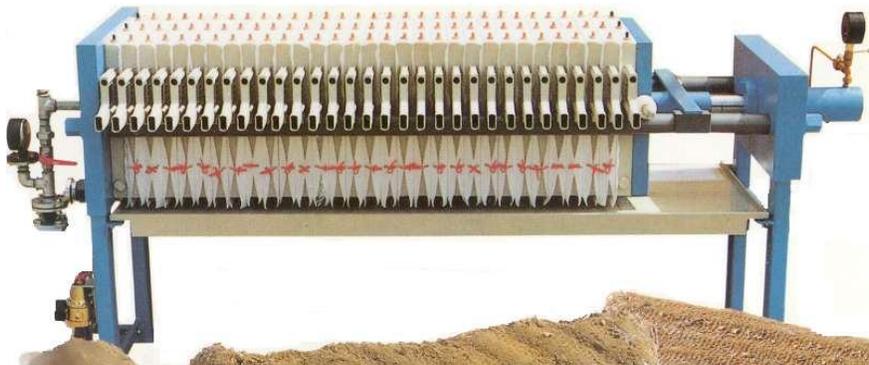


Figura F. 2 Filtro Prensa

(http://potablewater.iespana.es/tratamiento_de_lodos.htm).

Centrifugación

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 fango retirado de las paredes internas del rotor hacia el exterior por un extremo, mientras que el agua clarificada sale por el extremo opuesto (http://potablewater.iespana.es/tratamiento_de_lodos.htm). La figura F.3 ilustra una centrifugadora industrial.



Figura F. 3 Centrifuga Industrial
(http://potablewater.iespana.es/tratamiento_de_lodos.htm).

La centrifuga puede trabajar en continuo, siendo igualmente muy importante el empleo de un agente floculante o polielectrolito adecuado, a la entrada del rotor, para una mejor separación. En la deshidratación de lodos en las centrifugas, se puede obtener un efluente con una concentración en materia seca próxima al 20%.

El destino final de este tipo de lodos por ahora suele ser la disposición en un vertedero controlado, como relleno de terrenos y canteras ya explotadas en

determinadas zonas, o incluso compostaje junto con el lodo de depuración de agua residual.

ANEXO G

ANEXO G –PRECIOS DE LOS REACTIVOS PROPORCIONADOS POR LOS PROVEEDORES

ESTIMACIÓN BASE PARA LOS PRECIOS DE REACTIVOS - 23/12/2008			
Combinación Co/FI		Producto	Precio Total
1	Coagulante	Clorhidrato de Al-PoliDADMAC	1.13 USD/Kg
	Floculante	Poliamina	2.4 USD/Kg
2	Coagulante	Policloruro de Aluminio	0.4 USD/Kg
	Floculante	Copolímero de Acrilamida-Ácido Acrílico	2.0 USD/Kg
3	Coagulante	Clorhidróxido-Al-PoliDADMAC	1.5 USD/kg
	Floculante	poliDADMAC	2.96 USD/Kg
4	Coagulante	Polihidróxicloruro de Aluminio	4.96 USD /Kg
	Floculante	Poliamina	2.3 USD /Kg
5	Coagulante	Al ₂ (SO ₄) ₃ Std.	0.12 USD /Kg
	Floculante	poliDADMAC	2.96 USD /Kg
6	Coagulante	Al ₂ (SO ₄) ₃ libre de Fe	.17 USD /Kg
	Floculante	Poliamina	2.35 USD /Kg
CONSIDERACIONES			
No hay escasez de materias primas que impacte precio/disponibilidad			
La compra y proceso de licitación se hace en forma óptima para mínimo un año			
La venta no representa financiamiento ni riesgo financiero atípico para el proveedor			
La operación es totalmente transparente y no hay candados en la licitación			
precios arriba mencionados no toman en cuenta una posible inflación futura			