

PROPUESTA PARA EL MANEJO DE LOS LODOS ALUMINOSOS GENERADOS
EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE VILLA SANTANA,
MUNICIPIO DE PEREIRA, RISARALDA

ANDRÉS FELIPE RAMOS VALENCIA

CARLOS MARIO DUQUE CHAVES

DIEGO ALEJANDRO PÉREZ GIRALDO

UNIVERSIDAD LIBRE SECCIONAL PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

PEREIRA

2008

PROPUESTA PARA EL MANEJO DE LOS LODOS ALUMINOSOS GENERADOS
EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE VILLA SANTANA,
MUNICIPIO DE PEREIRA, RISARALDA

ANDRÉS FELIPE RAMOS VALENCIA

CARLOS MARIO DUQUE CHAVES

DIEGO ALEJANDRO PÉREZ GIRALDO

Trabajo de grado para optar al título de Ingenieros ambientales

Director:

Luz Ángela Ariza Toro

Ingeniera Sanitaria

UNIVERSIDAD LIBRE SECCIONAL PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

PEREIRA

2008

*“A Dios, por darnos la vida.
A nuestros padres, por su amor y paciencia
y a nuestras familias por su apoyo incondicional”.*

AGRADECIMIENTOS

Los más sinceros agradecimientos a todos nuestros profesores que nos guiaron durante todo este trascender académico, a nuestros compañeros de estudio por las enseñanzas de vida que nos dejaron y a la Universidad por permitirnos hacer nuestro sueño realidad.

A la Ingeniera Luz Ángela Ariza Toro, directora del trabajo de grado por su colaboración y paciencia, al Administrador Ambiental Darwin Hernández Sepúlveda, por el acompañamiento y la asesoría brindada.

Al Ingeniero Juan Carlos Olarte, gerente de Aguas de Dosquebradas, S.A. E.S.P. y al personal que labora en la planta de tratamiento Villa Santana.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	9
JUSTIFICACIÓN	10
1. PROBLEMA A INVESTIGAR	11
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	12
1.3 SISTEMATIZACIÓN	12
2. OBJETIVOS	13
2.1 OBJETIVO GENERAL	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3. ANTECEDENTES	14
4. GENERALIDADES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO VILLA SANTANA	20
4.1 UBICACIÓN	20
4.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE POTABILIZACIÓN	21
5. MARCO TEÓRICO	29
5.1 GENERALIDADES EN LA POTABILIZACIÓN DEL AGUA	29
5.2 PROCESO DE POTABILIZACIÓN DE AGUA	30
5.3 PROCESO DE COAGULACIÓN – FLOCULACIÓN	33
5.4 PROCESO DE SEDIMENTACIÓN	34
5.5 GENERACIÓN DE LODOS EN SISTEMAS DE POTABILIZACIÓN	36
5.5.1 Origen del lodo	36
5.5.2 Características de los lodos	39
5.5.3 Características físico – químicas	40
5.5.4 Características microbiológicas	43
5.5.5 Alternativas de tratamiento lodos	44

5.5.5.1	Deshidratación del lodo	47
5.5.5.2	Disposición del lodo	55
6.	MARCO JURÍDICO	57
7.	MARCO CONCEPTUAL	61
8.	METODOLOGÍA	65
8.1	MUESTREO DE LODOS	65
8.2	EVALUACIÓN DE LAS VARIACIONES DE TURBIEDAD Y DOSIFICACIÓN DE COAGULANTE	69
8.3	PLANTEAMIENTO DE LAS ALTERNATIVAS PARA EL TRATAMIENTO DEL LODO	71
8.4	METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO DEL LODO	73
8.5	ACONDICIONAMIENTO DE LOS LODOS ALUMINOSOS PROVENIENTES DE LA OPERACIÓN DE VACIADO DEL SEDIMENTADOR, PARA SIMULAR LAS CONDICIONES DE SEDIMENTACIÓN Y DESHIDRATACIÓN EN UN LECHO DE SECADO	77
9.	RESULTADOS OBTENIDOS	79
9.1	CARACTERIZACIÓN DEL LODO	79
9.2	VOLUMEN DE LODOS GENERADOS EN LA PLANTA	82
9.3	CARACTERIZACIÓN DE LA FUENTE RECEPTORA	84
9.4	ANÁLISIS DE LAS CURVAS MEDIAS DE TURBIEDAD Y DOSIFICACIÓN DEL COAGULANTE	86
9.5	APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE SELECCIÓN PARA LAS ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PROPUESTAS	94
9.5.1	Aplicación de la matriz de decisión	99
9.6	PRUEBA PILOTO DE SEDIMENTACIÓN Y DESHIDRATACIÓN	105
9.7	DIMENSIONAMIENTO DE LAS UNIDADES	108
10.	CONCLUSIONES	113

11. RECOMENDACIONES	115
BIBLIOGRAFÍA	117
ANEXOS	

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 4.1. Características del coagulante	24
Cuadro 4.2. Tiempo de retención en floculación	24
Cuadro 4.3. Velocidad de agitación en cada cámara de floculación	25
Cuadro 4.4. Tiempo de retención en los sedimentadores	26
Cuadro 4.5. Tasa media de filtración	27
Cuadro 5.1. Procesos de purificación de agua	32
Cuadro 5.2. Mecanismos de coagulación – Floculación	33
Cuadro 5.3. Características de lodos de sales de aluminio	40
Cuadro 5.4. Presencia de materia orgánica en términos de DBO y DQO	41
Cuadro 5.5. Características físicas y químicas de lodo de cloruro férrico y aluminoso	42
Cuadro 5.6. Características microbiológicas del lodo aluminoso	43
Cuadro 5.7. Alternativas de tratamiento y disposición de lodos	45
Cuadro 8.1. Características de las alternativas para el tratamiento de lodos	71
Cuadro 8.2. Ponderación de los factores a evaluados	73
Cuadro 9.1. Caracterización de los lodos	80
Cuadro 9.2. Caracterización de lodos realizada en plantas de tratamiento	81
Cuadro 9.3. Caracterización de la quebrada el Calvario	84
Cuadro 9.4. Caracterizaciones realizadas a la quebrada el Calvario	85
Cuadro 9.5. Turbiedades máximas y mínimas reportadas en la Planta Villa Santana	90
Cuadro 9.6. Criterios de calificación	94
Cuadro 9.7. Criterios de afectación	94
Cuadro 9.8. Calificación de los procesos de tratamiento	95
Cuadro 9.9. Matriz de decisión para la evaluación de lechos de secado	99

Cuadro 9.10. Matriz de decisión para la evaluación de filtros prensa	100
Cuadro 9.11. Matriz de decisión para la evaluación de centrifugas	102
Cuadro 9.12. Matriz de decisión para la evaluación para filtros banda	103
Cuadro 9.13. Caracterización del acondicionamiento de los lodos	105
Cuadro 9.14. Caracterización del lodo deshidratado	106
Cuadro 9.15. Criterios de diseño para los lechos de secado	109

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 4.1. Ubicación de la planta Villa Santana en la ciudad de Pereira	20
Figura 4.2. Esquema general del sistema de potabilización de la planta Villa Santana	22
Figura 4.3. Esquema de los módulos de tratamiento – Planta Villa Santana	28
Figura 5.1. Unidades generadoras de lodos	37
Figura 5.2. Procesos de tratamiento y disposición de lodos	46
Figura 5.3. Esquema del espesador de lodos por gravedad	48
Figura 5.4. Esquema del lecho de secado	49
Figura 5.5. Esquema de laguna de deshidratación	51
Figura 5.6. Esquema de centrifuga horizontal de tornillo	52
Figura 5.7. Esquema de filtro prensa	53
Figura 5.8. Esquema del filtro de banda	55
Figura 5.9. Procesos de tratamiento y disposición de lodos	56
Figura 8.1. Punto de muestreo del sedimentador	67
Figura 8.2. Válvulas de purga del sedimentador 1	68
Figura 8.3. Condiciones del agua antes y después del muestreo de la quebrada El Calvario	69
Figura 8.4. Pruebas piloto de sedimentación	78
Figura 9.1. Variaciones de turbiedad utilizando el método de media móvil simple	87
Figura 9.2. Promedio de precipitación anual reportados para la estación el Cedral	89
Figura 9.3. Relación Turbiedad media – dosificación de coagulante para el año 2 (Junio 2007 – Mayo 2008)	92

Figura 9.4. Relación Turbiedad media – dosificación de coagulante para el año 2 (Junio 2007 – Mayo 2008)	93
Figura 9.5. Proceso de deshidratación de la muestra de lodo	107

INTRODUCCIÓN

La remoción de los elementos y partículas presentes en el agua, en la búsqueda de brindar agua potable a una comunidad, es la finalidad principal de una planta de tratamiento. Estas partículas requieren de una serie de proceso y operaciones unitarias con el fin de ser removidas, los cuales dependen de diversos aspectos como son la calidad del agua cruda, el sistema potabilización utilizado y los procesos relacionados con este, entre otros.

En el tratamiento del agua potable, se generan entonces una serie de residuos o subproductos, los cuales dependiendo de sus características se hace necesario su respectivo acondicionamiento y tratamiento. Estos residuos se encuentran asociados básicamente a los lodos residuales, comúnmente producto del tratamiento del agua y la dosificación de coagulante.

La planta de tratamiento de agua potable Villa Santana, como subproducto resultante del proceso de potabilización está generando lodos residuales, los cuales son vertidos sin ningún tratamiento en la quebrada el Calvario, por esta razón, con el presente trabajo se pretende proponer una alternativa de tratamiento de lodos que permita disminuir el impacto ambiental que se está generando en la fuente receptora, teniendo en cuenta las características de los lodos generados, los aspectos que interviene en la generación de los mismos y las condiciones en las cuales se encuentra actualmente la planta de tratamiento.

JUSTIFICACIÓN

Actualmente en Colombia el tratamiento y disposición final de los subproductos generados en las plantas de tratamiento de agua potable, como es el caso de los lodos, es un proceso que no se ha implementado a cabalidad. Estos lodos presentan unas características físico-químicas y microbiológicas especiales que hacen necesario su tratamiento y adecuada disposición.

Por esta razón, con el fin de cumplir con la normatividad vigente y estar exentos de pagar altas tasas retributivas fijadas por las CAR's (Corporaciones Autónomas Regionales) y el MAVDT (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial), además de tener presente su compromiso ambiental y social con la comunidad, la planta de tratamiento de agua potable Villa Santana, debe realizar el tratamiento y disposición final de los lodos que se puedan generar en el proceso de potabilización.

De este modo se planteara la alternativa más viable para el tratamiento de los lodos que se generan en esta planta, teniendo en cuenta las condiciones económicas y técnicas actuales, además de las proyecciones futuras de esta.

1. PROBLEMA A INVESTIGAR

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Planta de tratamiento de agua potable Villa Santana, Tanque Las Margaritas, ubicada en la comuna Villa Santana, municipio de Pereira, Risaralda y que le sirve a su municipio vecino de Dosquebradas, Risaralda, le está suministrando a la población agua tratada a un nivel primario, las mismas son captadas del río Otún, el cual presenta altos niveles de contaminación aguas arriba de la bocatoma, debido principalmente a desarrollos agrícolas, pecuarios y centros poblados que se encuentran en esta extensión de la cuenca, estos han incidido tanto en las condiciones físicas y químicas como bacteriológicas del agua¹.

Debido a las condiciones del agua cruda que entra a la planta y su posterior tratamiento, se están generando grandes cantidades de lodo, los cuales se vierten sin ningún tratamiento a una fuente receptora cercana a la planta (Quebrada El Calvario).

¹ TREJOS GÓMEZ, Claudia Lorena; ISAZA VALENCIA, Liliana y PAREDES CUERVO, Diego. Estrategias para disminuir la Contaminación por Organismos Bacterianos Patógenos, En la fuente abastecedora de Agua del Acueducto de la ciudad de Pereira. 2003.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cuál es la tecnología más apropiada para el tratamiento de los lodos generados en la planta de tratamiento de agua potable Villa Santana, Tanque Las Margaritas, según las condiciones económicas, sociales, ambientales y físicas existentes?

1.3 SISTEMATIZACIÓN

¿En qué condiciones se encuentra actualmente la Planta de tratamiento?

¿A qué alternativa técnica se llegó con el estudio de selección?

¿Por qué es más viable la alternativa de tratamiento seleccionada?

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Proponer un sistema para el manejo de los lodos aluminosos generados en la planta de tratamiento de agua potable Villa Santana, municipio de Pereira, Risaralda.

2.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las condiciones históricas y actuales de la operación del sistema, frente a la generación de lodos.
- Caracterizar y cuantificar los lodos residuales generados en la planta de tratamiento.
- Identificar y Evaluar las posibles alternativas de tratamiento de lodos.
- Seleccionar una alternativa de tratamiento de lodos que se encuentre acorde con las condiciones de la planta de tratamiento.

3. ANTECEDENTES

La práctica usual de las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) que tratan las aguas superficiales por medio de los procesos de coagulación-floculación-sedimentación y filtración es eliminar los lodos acumulados en los sedimentadores y en los filtros descargándolos directamente a cursos superficiales, sin considerar que las características físicas y químicas de estos a menudo transgreden las normas relativas a descargas (GARCÉS *et al.*, 1996).

Por lo tanto, a medida que los recursos hídricos se vuelven más escasos y las normas medio-ambientales se tornan más estrictas en lo relativo a disposición de residuos, nace la necesidad de realizar investigaciones orientadas a tener un mayor conocimiento sobre las técnicas que pueden utilizarse para aumentar la cantidad de agua producida por m³ de agua cruda y para el tratamiento de los lodos generados en el proceso (GARCÉS *et al.*, 1996).

El potencial pues de los lodos producidos hoy en día va en ascenso y representa una alternativa económica como ecológica de grandes beneficios, que pueden contribuir en gran medida al saneamiento del entorno del trabajo del hombre. Cada día el medio ambiente sufre los efectos contaminantes y se hace imperiosa la necesidad de promover estrategias de control que ayuden a disminuir en gran medida los efectos colaterales de la contaminación (MUJICA *et al.*, 2006).

Las características de los lodos de alúmina varían de una planta a otra, dependiendo de la calidad de agua cruda, del tratamiento recibido y de la época del año, sin embargo, poseen características básicas similares (SANDOVAL *et al.*, 2002).

Los sólidos residuales de las plantas de tratamiento de agua están constituidos por sólidos suspendidos provenientes de los desechos de los procesos de coagulación-floculación, sedimentación y del retrolavado de los filtros. Generalmente tendrá un contenido bajo de sólidos, en el rango de 3000 a 5000 mg/L. Los sólidos suspendidos son del 75 al 90% de los sólidos totales (ST), con una cantidad de sólidos volátiles del 20 al 35% de los ST. La demanda bioquímica de oxígeno generalmente es de 30 a 100 mg/L. El pH del lodo está en un rango de 5 a 7, además se destacan los metales aluminio, hierro y sílice (SANDOVAL *et al.*, 2002), basados en esto se describen entonces a continuación varios estudios a nivel global tenidos en cuenta en este trabajo, cabe aclarar que algunos fueron realizados en aguas residuales pues los lodos generados en plantas de potabilización se consideran el mismo efluente, pero con concentraciones de elementos y compuestos físico-químicos y microbiológicos que pueden variar (ESPEJEL *et al.*, 2006).

RAMÍREZ *et al.* (2006) aprovecharon los lodos generados en la planta potabilizadora, Los Berros, sistema Cutzamala, primera etapa, estado de México, la cual suministra agua potable a las ciudades de Toluca y México, este estudio arrojó algunos resultados en cuanto a la selección de la mejores alternativas de manejo y aprovechamiento, obteniendo las mejores calificaciones las siguientes (en orden decreciente): 1) aplicación en suelos (66-67.5%); 2) elaboración de cemento-clinker (65% para lodo espesado); 3) elaboración de tabicones y productos cementantes 62.6% para lodo deshidratado, y 4) productos cerámicos (55.1%).

MONTEIRO *et al.* (2007) caracterizaron los residuos obtenidos a partir de la sedimentación de una planta de tratamiento de agua potable y los incorporaron en la arcilla utilizada para la fabricación de cerámica roja, esto llevó a algunas conclusiones como son la de que los residuos tienen una composición

mineralógica similar a la arcilla, por la presencia de materia orgánica, caolinita, cuarzo, goethita y gibbsita y la otra debido a la presencia de materia orgánica y arcilla mineral hacen que aumente el tamaño de las partículas llevando a una mayor plasticidad cuando estos lodos están secos.

HARA y MINO (2008) en Tokio, Japón realizaron una valoración ambiental de los lodos producidos en plantas de tratamiento de aguas residuales donde evaluaron varias alternativas, dentro de las cuales se utilizan los lodos como una opción energética alternativa para la elaboración de ladrillo, balastro, combustible derivado y escoria provenientes estos del producto y subproducto generado durante los años 1995 - 2001, dentro de la investigación, la disposición final en campo no ha sido abiertamente aceptada en Japón por el miedo a una posible contaminación del suelo causada por metales pesados, pero a la vez es considerada el método más sostenible técnica y económicamente, además se indica que la producción de combustible derivado como producto del tratamiento de los residuos sólido/líquidos fue el proceso de mayor consumo de energía entre las cuatro opciones, seguido por el proceso de producción de escoria; la producción de balastro fue la de menor consumo de energía, haciéndola la opción más ideal desde el punto de vista ambiental.

FYTILI y ZABANIOTOU (2006) basados en que la Unión Europea (EU) ha evaluado varias alternativas de manejo de los residuos sólido/líquidos que generan la plantas de tratamiento de aguas residuales llevaron a cabo una investigación en la cual recopilaron metodologías antiguas y actuales en cuanto a la disposición de los lodos generados por estas, teniendo en cuenta las siguientes: el rehúso agrícola por el contenido de nitrógeno y fósforo de estos compuestos, la incineración, la combustión, la oxidación húmeda, la pirolisis y la gasificación, estas dos últimas sobresalen por ser dos alternativas pocas nocivas con el ambiente.

MUJICA *et al.* (2006) determinaron que los lechos de secado constituyen la alternativa más apropiada para el tratamiento de lodos, debido a su bajo costo y mantenimiento; además de obtener un producto final que puede ser completamente aprovechado no generando pasivos ambientales ni problemas ambientales.

PAVÓN *et al.* (2004) realizaron la recuperación del aluminio y hierro utilizando ácido nítrico, clorhídrico y sulfúrico. Llevaron a cabo una especiación química para conocer los compuestos formados de acuerdo a las condiciones aplicadas. Después, aplicaron los coagulantes recuperados a un proceso de coagulación-floculación en laboratorio, para evaluar su eficiencia. Así mismo, realizaron análisis preliminares de toxicidad con semillas de lechuga, evaluando el crecimiento de su raíz con diversos porcentajes de lodo.

SANDOVAL *et al.* (1998) obtuvieron resultados en el laboratorio de la planta de Los Berros, del sistema Cutzamala, Estado de México, la cual suministra agua potable a las ciudades de Toluca y México, que muestran que la recuperación del aluminio y la disminución del volumen de los lodos, es técnicamente factible si se acondicionan con polímero y se acidifican con ácido sulfúrico. Pero si se requiere obtener una solución de aluminio más concentrada es conveniente espesar primero y posteriormente acondicionar con polímero, ya que esto proporcionó una mayor concentración de sólidos y por consiguiente una deshidratación más alta del lodo.

En Colombia actualmente no se le da mucha importancia el tema de los lodos generados en los sistemas de potabilización. Por tanto se puede asumir que es un tema que apenas está emergiendo en el campo ingenieril y por dicha razón en aun no se cuenta con grandes desarrollos tecnológicos que llamen la atención a los municipios o administraciones de las diferentes plantas de tratamiento existentes.

La planta de tratamiento de lodos de la empresa Acuacar S.A. E.S.P. obra que tiene como finalidad remover mediante deshidratación los sedimentos contenidos en las aguas provenientes del lavado de filtros y limpieza de tanques de agua cruda, como también de los sedimentadores de la Planta de Tratamiento y purgas en general, de tal manera que se permita mediante recirculación, la reutilización de estos volúmenes ya clarificados; este sistema tiene una capacidad de 18 toneladas de lodo por día. Las aguas para tratar son llevadas a unos espesadores (18 metros de diámetro) donde se recicla el sobrenadante para realizar su potabilización; de allí los lodos son bombeados a un sistema de deshidratación por medio de centrifugas de una capacidad de 10 m³/h (Aguas de Cartagena S.A. E.S.P. Agosto de 2006).

De igual forma en las universidades que involucran en su academia estos temas (potabilización y tratamiento de agua), se han venido adelantando proyectos de investigación en los cuales se maneja el tema del tratamiento de lodos generados en los sistemas de potabilización, y otros a su vez sobre la disposición final de estos.

De esta forma encontramos un estudio realizado en la planta de tratamiento de agua potable, Planta 2, de Cartago valle del cauca, la cual toma sus aguas del rio la vieja y realiza el vertimiento de sus residuos líquidos en el mismo.

El trabajo consistió en realizar el diseño de un sistema de tratamiento de lodos obteniendo de este estudio el dimensionamiento de las unidades de tratamiento Allí se determinaron los tiempos de producción de lodos en las diferentes condiciones climáticas para llegar a un valor promedio de carga, proponiendo así un sistema de tratamiento de lodos que consiste en evacuar los lodos de los sedimentadores por gravedad o bombeo, además del tratamiento del agua de lavado de filtros, con el fin de recircular el efluente a la planta. Se plantea de igual forma un último paso de tratamiento que consiste en un sistema de deshidratación

por medio de lechos de secado tratando de aprovechar las condiciones climáticas de la región (RAMÍREZ, 2003).

En el municipio de Supia (Caldas) en la planta de tratamiento el Bosque que se encuentra localizada en la cabecera municipal. se realizó un estudio similar al descrito anteriormente realizado por estudiantes de la universidad nacional de Colombia sede Manizales, en la cual realizan las caracterizaciones y cálculo de lodos producidos por la planta en las unidades de sedimentación y filtración; los muestreos se realizaron teniendo en cuenta dos periodos climáticos en los cuales se encuentra un periodo seco y otro periodo de lluvias, allí de acuerdo a los estudios realizados en cuanto a producción de lodos se propuso un diseño de lecho de secado con el fin de tratar los lodos producidos en esta planta por medio de deshidratación. (CAMPEÓN B. Alejandra M., JARAMILLO G. Lina P, 2004.)

Por último en la ciudad de Pereira encontramos un estudio para evaluar la potencialidad de aprovechamiento de los lodos aluminosos (LAP) generados en el sistema de potabilización de agua de Pereira, como agregado en la fabricación de ladrillos cerámicos, identificando la mayor fuente de generación, las necesidades de acondicionamiento y el tipo de material a ser reemplazado de acuerdo con sus características y las de los materiales comúnmente usados en la fabricación de ladrillos cerámicos en la región (HERNÁNDEZ, 2006).

4. GENERALIDADES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO VILLA SANTANA

4.1 UBICACIÓN

La planta de tratamiento de agua potable Villa Santana, se encuentra ubicada en la ciudad de Pereira departamento del Risaralda, específicamente en la comuna Villa Santana.

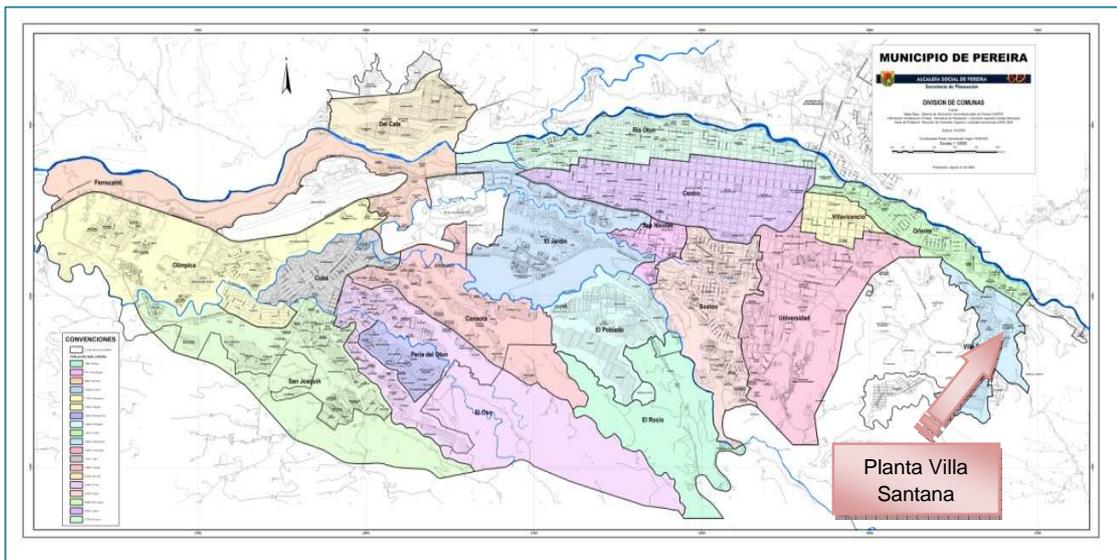


Figura 4.1. Ubicación de la planta Villa Santana en la ciudad de Pereira

Fuente: Alcaldía de Pereira, 2008.

El municipio de Pereira está localizado a 4 grados 49 minutos de latitud norte, 75 grados 42 minutos de longitud y a 1.411 metros sobre el nivel del mar; en el centro de la región occidental del territorio Colombiano. La ciudad cuenta con una

población de 488.839 personas de las cuales 410.535 se encuentran en el área urbana localizadas en 19 comunas y 78.304 en el área rural en 12 corregimientos (Alcaldía de Pereira, 2008)

4.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE POTABILIZACIÓN

El sistema se abastece de la cueca del río Otún, desde este punto se realiza la captación en la bocatoma Nuevo Libare; el agua es llevada a dos unidades de desarenación, eliminando así los residuos o partículas de gran tamaño que puedan obstruir las unidades de tratamiento. De allí el agua realiza un proceso de aducción, hasta las instalaciones ubicadas en la comuna Villa Santana.

Al llegar el agua a la planta se tiene una unidad que permite dividir el caudales para tres partes distintas; el primero es a través de un canal de rebose que conduce el agua hacia una hidroeléctrica, el segundo lleva las agua a la planta de tratamiento de Aguas y Aguas S.A - E.S.P y el tercero conduce el agua para realizar el tratamiento en la planta de Villa Santana.

Esta planta tiene una capacidad de tratamiento de 600 L/s, para los cuales se cuenta con dos módulos de tratamiento que presentan las siguientes unidades de tratamiento:

Desarenación

El canal de conducción al desarenador tiene un ancho de 0.90 m y una altura total de 1.20 m, funciona con una profundidad útil de 0.86 m. Este canal tiene una longitud de 16 m que conduce el agua hasta las unidades de desarenación.

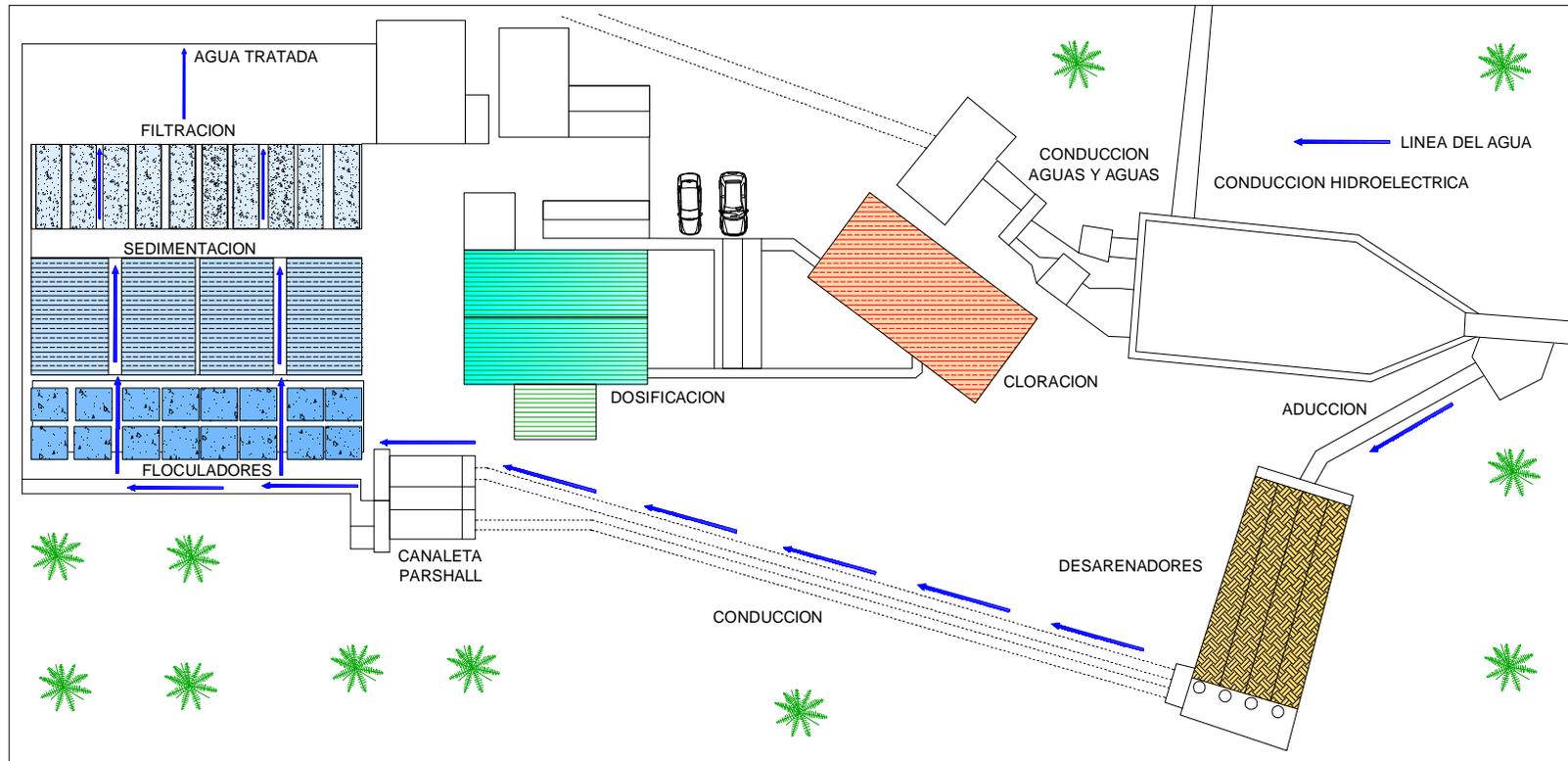


Figura 4.2. Esquema general del sistema de potabilización de la planta Villa Santa

El tanque desarenador está conformado por cuatro unidades de desarenación, de 2.42 m de ancho, 22.95 m de largo y 4.50 m de profundidad total.

El desarenador está constituido en cada unidad por una zona de placas planas de asbesto cemento de 2.40 x 1.20 m y 8 mm de espesor, inclinadas 45 grados y con espaciamientos libres de 5 cm. La inclinación de las placas es el sentido contrario al flujo del agua.

El agua es conducida por medio de una tubería de Ø 48" con una longitud aproximada de 80 m y la cual descarga a una cámara de aquietamiento y posteriormente en la canaleta Parshall.

Dentro de la cámara se encuentran instaladas dos (2) sondas que transmiten en línea e instantáneamente los parámetros de turbiedad, pH y temperatura del agua cruda.

Coagulación

La adición de productos químicos para la coagulación se realiza en la canaleta Parshall con el fin de realizar una mezcla rápida y homogénea del sulfato de aluminio que se utiliza en el proceso de coagulación, así mismo, este punto sirve para adicionar el PAC (policloruro de aluminio) como ayudante de coagulación.

La planta de tratamiento Villa Santana utiliza sulfato de aluminio como coagulante, el cual tiene unas características que se presentan en el cuadro 4.1.

Cuadro 4.1. Características del coagulante

Coagulante:	Sulfato de aluminio tipo B
Composición química:	Granulado
Alúmina soluble:	15.2 % Min
Hierro soluble total:	2.0 % Max
Material insoluble en agua:	8.0% Max
pH solución acuosa:	1 % : 3.45

Fuente: Planta de tratamiento Villa Santana.

Floculación

El modulo de floculación está constituido por dos unidades cada una conformada por ocho (8) cámaras de sección cuadrada, de 3.63 m de lado y 4.30 m de profundidad de agua, para un funcionamiento en serie. El periodo de retención en cada unidad para diferentes caudales es el siguiente (cuadro 4.2.):

Cuadro 4.2. Tiempo de retención en floculación

CAUDAL (L/s)	TIEMPO (minutos)
280	46
320	40
600	21

Fuente: Manual de operación, planta de tratamiento Villa Santana.

Las cuatro primeras cámaras de cada unidad operan como un floculador mecánico, para tal fin cada una de ellas dispone de un moto-reductor acoplado a su agitador, el motor es de 2 HP y la velocidad de agitación en cada cámara es la siguiente (cuadro 4.3)

Cuadro 4.3. Velocidad de agitación en cada cámara de floculación

CÁMARA	VELOCIDAD	FRECUENCIA DEL VARIADOR	GRADIENTE S
1	4.5	45	47.83
2	4	40	40.09
3	3	30	26.04
4	2	25	14.17

Fuente: Manual de operación, planta de tratamiento Villa Santana.

Las otras cuatro cámaras finales, operan como un floculador hidráulico.

Sedimentación

El modulo de sedimentación está constituido por dos unidades de sedimentación acelerada conformada por placas planas de asbesto-cemento de 8 mm de espesor, 1.20 x 2.40 de sección, inclinadas 60° con relación a la horizontal y separadas entre sí 6 cm.

La longitud útil de la zona de placas es de 11.42 m, el tanque de cada unidad tiene un ancho de 7.60 m y una profundidad de agua de 4.30 m.

El agua floculada ingresa por la parte inferior del tanque, asciende a través de las placas planas de asbesto cemento, donde se produce la sedimentación de partículas.

El agua ya sedimentada es recolectada en ocho (8) canaletas longitudinales de 0.40 x 0.40 m de sección, localizadas transversalmente. La recolección uniforme del agua sedimentada se produce a través de vertederos triangulares en V de 90°, de descarga libre, dispuestos a lo largo de la canaleta.

Para la purga de los lodos, cada unidad dispone de dos canales trapezoidales, el fondo de cada canal está cubierta con losas prefabricadas con 12 orificios de Ø 2”

El vaciado de los lodos se efectúa mediante las válvulas de mariposa de Ø 10” localizadas al final de cada canal.

Cuadro 4.4. Tiempo de retención en los sedimentadores

CAUDAL (L/s)	TIEMPO (minutos)
280	88
320	77
600	41

Fuente: Manual de operación, planta de tratamiento Villa Santana.

El agua sedimentada es recolectada en un canal central donde una sonda instalada al final nos determina en línea y forma instantánea la turbiedad del agua. Los canales centrales de ambos sedimentadores conducen el agua a un canal común localizado frente a todas las unidades de filtración.

Filtración

La batería de filtros consta de cinco (5) unidades dobles, con compartimientos de 2.50 m de ancho, 8.40 m de longitud, divididos longitudinalmente por un canal central de lavado de 1.30 m de ancho.

El área neta de filtración es de 43.68 m² por unidad y de 218.40 m² en toda la batería.

Cuadro 4.5. Tasa media de filtración

CAUDAL (L/s)	TASA m³/m² día
280	110.77
320	126.59
600	237.4

Fuente: Manual de operación, planta de tratamiento Villa Santana.

Los filtros son de lecho filtrante doble de arena y antracita, el sistema de soporte del filtro está constituido por bloques prefabricados perforados, en los cuales se encuentran instalados cribas en mallas de acero inoxidable, estas contienen arena de tamiz No 10.

La capa del filtro está constituida por 10 cm de arena y 70 cm de antracita.

Tanque de contacto de cloro

El proceso de desinfección se realiza a través de la dosificación de cloro gaseoso (MPA), el tanque de contacto de cloro tiene una longitud de 90 m, el ancho de la sección es de 1.90 y la altura del agua es de 2.70 m.

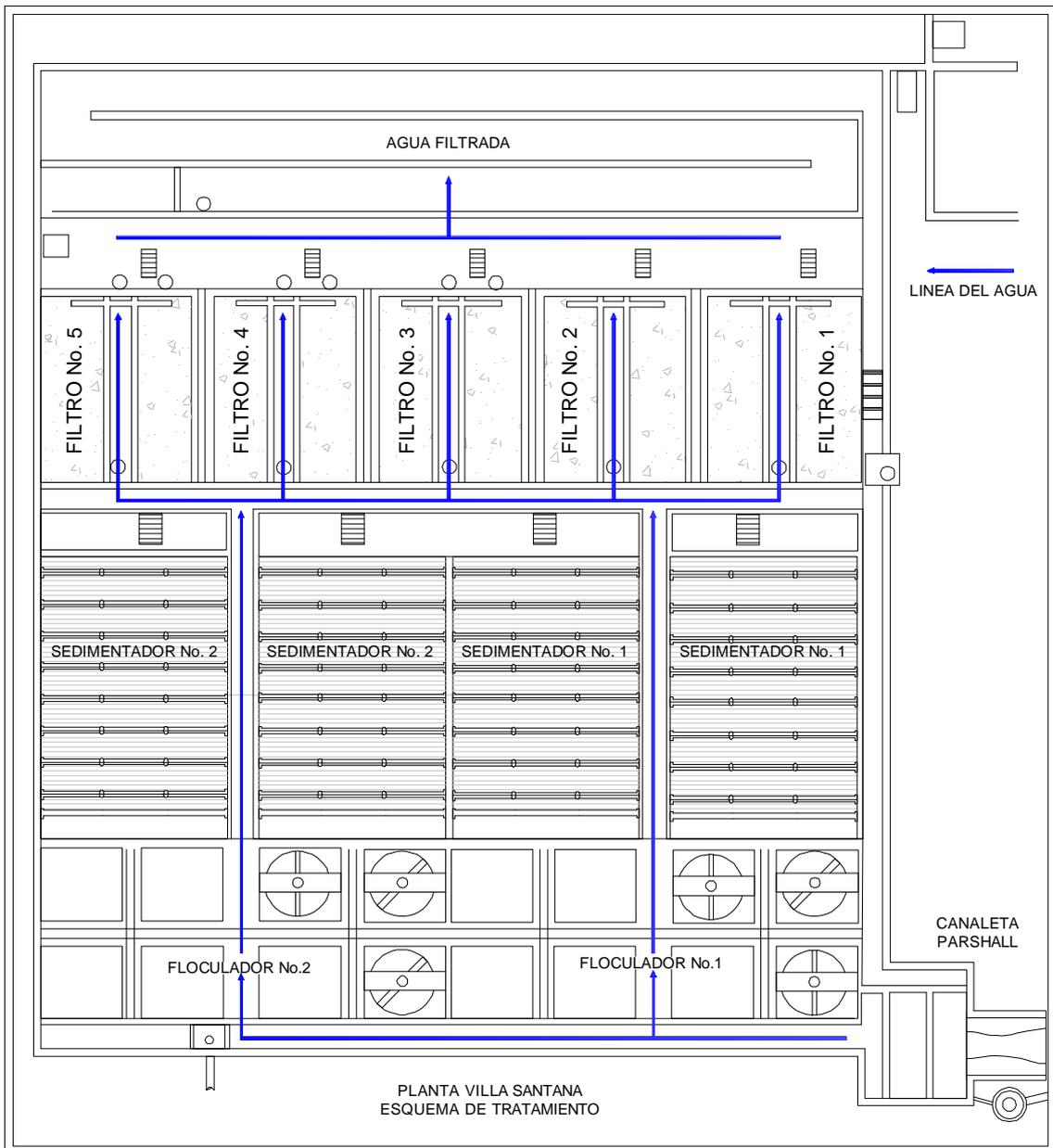


Figura 4.3. Esquema de los módulos de tratamiento – Planta de tratamiento Villa Santana

5. MARCO TEÓRICO

5.1 GENERALIDADES EN LA POTABILIZACIÓN DEL AGUA

Debido a las condiciones en las que se encuentra el agua en la naturaleza no es posible hablar de un estado puro, ya que se halla en un contacto constante con el suelo, la vegetación y centros poblados que descargan sus vertimientos líquidos en estas fuentes hídricas. Aunque el estado puro solamente puede ser alcanzado bajo ciertas condiciones especiales de laboratorio, una vez entra en contacto con el medio externo, se modifican sus características iniciales.

En el uso del agua para aprovechamiento y consumo humano, las condiciones de esta juegan un papel importante, debido a esta serie de modificaciones se hace necesario un respectivo tratamiento que garantice a las comunidades agua apta para su consumo y que además se encuentre en cumplimiento con la normatividad vigente en cada país.

En los proceso de potabilización de agua se involucran una serie de procesos y operaciones que facilitan la remoción de ciertos elementos que se encuentran presentes en el agua. Debido a que las condiciones del agua dependen de las características de la fuente abastecedora como condiciones climatológicas y de ubicación, entre otras; estas tecnologías de tratamiento varían de acuerdo a estos factores.

El agua es utilizada para múltiples propósitos como son el abastecimiento público que cubre el uso doméstico, industrial y comercial, la generación de energía eléctrica, el riego de cultivos, fines recreativos, entre otros, donde cada situación requiere de unas condiciones de calidad diferentes, siendo necesario en algunos casos acondicionar el agua para su adecuada utilización (PÉREZ, 2002).

Cuando se habla de agua apta para el consumo humano, es necesario tener en cuenta que se deben cumplir ciertas características desde un punto de vista físico, químico y microbiológico. En la búsqueda de alcanzar estas condiciones óptimas del agua, además de garantizar un grado de calidad que se vea representado en el bienestar de las personas que se abastecen de ella, la normatividad ha establecido los límites para los diferentes tipos de sustancias y elementos presentes en el agua.

5.2 PROCESO DE POTABILIZACIÓN DEL AGUA

Como el agua es un elemento en constante movimiento y transformación, al momento de ser captada para realizar el respectivo proceso de potabilización, presenta una serie de partículas disueltas y en suspensión que requieren ser removidas con el fin de cumplir con los parámetros establecidos en la normatividad. Por esta razón, el proceso de potabilización busca retirar esta cantidad de sustancias por medio de procedimientos físicos y químicos.

Los procesos que comúnmente realizan las plantas de tratamiento, en la búsqueda de retirar estas partículas presentes en el agua y las cuales impiden su consumo comienzan con la captación del agua cruda, en donde se conduce desde la fuente abastecedora (ríos, quebrada, lagos, entre otros) hasta la planta donde

se realiza la separación de los materiales sedimentables mediante la utilización de una unidad usualmente conocida como desarenador. La utilización de compuestos químicos es un proceso muy utilizado en la potabilización de agua, los cuales intervienen generalmente en el proceso de coagulación mediante la desestabilización de las partículas coloidales, favoreciendo el aglutinamiento de los mismos y la formación del floc².

El siguiente proceso en la potabilización de agua, tiene que ver con la sedimentación, en el cual se produce la decantación del floc formado ya sea por gravedad o mediante la utilización de otro medio que permita su arrastre. Aunque mediante la utilización del proceso de coagulación – floculación se puede eliminar gran cantidad de partículas de tamaño considerable, se hace necesario utilizar la filtración con el fin de retener aquellas que no se vieron influenciadas con la adición del coagulante.

Como paso final del proceso de potabilización se realiza la desinfección, en el cual se busca eliminar aquellos microorganismos patógenos como bacterias, virus y protozoarios que podrían afectar la salud de los consumidores.

Como se menciono anteriormente, la calidad del agua cruda varia de una fuente a otra, lo que determina en gran medida el tipo de tratamiento que se debe realizar con el fin de garantizar las condiciones óptimas para el consumo. Estos procesos asociados a la potabilización del agua se presentan en la cuadro 5.1.

En el proceso de potabilización de agua, la generación de lodos es un factor importante a tener en cuenta, por este motivo se hace necesario realizar su respectivo manejo y disposición, así mismo, es fundamental entender la

² Pequeñas masas que se aglutinan, las cuales presentan peso específico superior al agua (ARBOLEDA, 2000).

naturaleza de los procesos que involucran su generación. Debido a que el tema central de este trabajo es la generación de lodos, y su respectivo manejo en la planta de tratamiento de agua potable Villa Santana, a continuación se hace un análisis de los procesos asociados a su generación.

Cuadro 5.1. Procesos de purificación de agua

PROCESO	PROPÓSITO
TRATAMIENTO PRELIMINAR	
Cribado	Remoción de desechos grandes que pueden obstruir o dañar los equipos de la planta.
Pretratamiento químico	Remoción eventual de algas y otros elementos acuáticos que causan sabor, olor y color.
Presedimentación	Remoción de grava, arena, limo y otros materiales sedimentables.
Aforo	Medida del agua cruda por tratar.
TRATAMIENTO PRINCIPAL	
Aireación	Remoción de olores y gases disueltos; adición de oxígeno para mejorar el sabor.
Coagulación/Floculación	Conversión de sólidos no sedimentables en sólidos sedimentables.
Sedimentación	Remoción de sólidos sedimentables.
Ablandamiento	Remoción de dureza.
Filtración	Remoción de sólidos finos, floc en suspensión y la mayoría de microorganismos.
Adsorción	Remoción de sustancias orgánicas y color.
Estabilización	Prevención de incrustaciones y corrosión.
Fluoruración	Prevención de caries dentales.
Desinfección	Exterminios de organismos patógenos.

Fuente: ROMERO, 2002.

5.3 PROCESO DE COAGULACIÓN – FLOCULACIÓN

En la potabilización, la coagulación – floculación juega un papel importante al momento de intervenir sobre las diferentes impurezas presentes en el agua y la cual depende de las características iniciales de la misma. Inicialmente se refiere a un proceso en donde se produce una desestabilización de las partículas suspendidas, o sea la remoción de las fuerzas que las mantiene separadas (ARBOLEDA, 2000), facilitando el aglutinamiento y favoreciendo la formación del floc en pequeñas masas.

Existen diferentes tipos de mecanismos utilizados para generar estos dos procesos, los cuales se muestran en el cuadro 5.2.

Cuadro 5.2. Mecanismos de coagulación – Floculación

1. Desestabilización de partículas (coagulación)	Adsorción – neutralización	
	Puente químico	
	Sobresaturación	
2. Transporte de partículas (floculación)	Ortocinético (> μ)	Creado en el líquido por gradiente de velocidad
	Pericinético (< μ)	Por movimiento browniano
		Por sedimentación

Fuente: ARBOLEDA, 2000.

Dicho proceso se usa para (ARBOLEDA, 2000):

- a. Remoción de turbiedad orgánica o inorgánica que no se puede sedimentar rápidamente.
- b. Remoción de color verdadero y aparente.
- c. Eliminación de bacterias, virus y organismos patógenos susceptibles de ser separados por coagulación.
- d. Destrucción de algas y plancton en general.
- e. Eliminación de sustancias productoras de sabor y olor en algunos casos y de precipitados químicos suspendidos o compuestos orgánicos en otros.

La coagulación comienza en el mismo instante en que se agregan los coagulantes en el agua y dura solamente fracciones de segundo. Básicamente consiste en una serie de reacciones físicas y químicas entre los coagulantes, la superficie de las partículas, la alcalinidad del agua y el agua misma (ARBOLEDA, 2000).

5.4 PROCESO DE SEDIMENTACIÓN

La sedimentación es el proceso de remoción de los sólidos en suspensión en un fluido por la fuerza de gravedad. Los sólidos pueden estar presentes en el agua en la forma como ocurren naturalmente, como es el caso del limo o la arena, o en forma modificada de su estado natural, como es el resultado de la coagulación y la floculación (PÉREZ, 2002).

Según PÉREZ (2005) define la sedimentación como el proceso natural por el cual las partículas más pesadas que el agua, que se encuentran en su seno en suspensión, son removidas por la acción de la gravedad.

Las impurezas naturales pueden encontrarse en las aguas según tres estados de suspensión en función del diámetro. Éstos son:

- a) Suspensiones hasta diámetros de 10^{-4} cm.
- b) Coloides entre 10^{-4} y 10^{-6} cm.
- c) Soluciones para diámetros aún menores de 10^{-6} cm.

Estos tres estados de dispersión dan igual lugar a tres procedimientos distintos para eliminar las impurezas.

El primero destinado a eliminar las de diámetros mayores de 10^{-4} cm. Constituye la "sedimentación simple".

El segundo implica la aglutinación de los coloides para su remoción a fin de formar un "floc" que pueda sedimentar.

Finalmente, el tercer proceso, que esencialmente consiste en transformar en insolubles los compuestos solubles, aglutinarlos para formar el "floc" y permitir así la sedimentación.

Es decir que en muchos casos, las impurezas pueden ser, al menos en teoría removidas mediante el proceso de sedimentación.

5.5 GENERACIÓN DE LODOS EN SISTEMAS DE POTABILIZACIÓN

En el proceso de potabilización de agua, la generación de lodos es uno de los aspectos más críticos al momento de realizar su respectivo manejo, esto debido a las características físico-químicas que adquiere como producto de la coagulación con sulfato de aluminio o con algunos compuesto férricos; así mismo, el volumen es otro aspecto determinante que interviene en el manejo que se desee realizar.

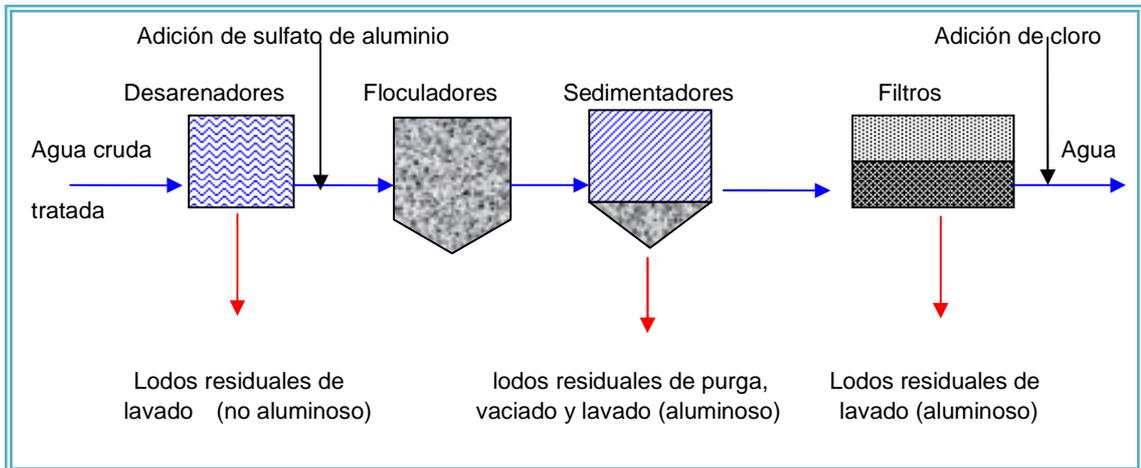
5.5.1 Origen del lodo

Los lodos en los sistemas de potabilización provienen básicamente de la eliminación de impurezas presentes en el agua. Este tipo de impurezas se presentan en condiciones como la turbiedad, color e iones; así mismo, en la presencia de partículas de arenas, limos y otros materiales disueltos y en suspensión.

Debido a las características de los diferentes procesos asociados a la potabilización del agua para consumo humano, los lodos presentan unas condiciones dependiendo de la unidad de tratamiento donde se genere, las cuales se indican en la figura 5.1.

Los lodos que se generan en las unidades decantadoras no presentan contenido de alumbre o sales de hierro, debido a que no ha sido agregado ningún tipo de coagulante; para el caso de los sedimentadores, el lodo residual es aluminoso como resultado del proceso de coagulación con sustancias químicas.

Figura 5.1. Unidades generadoras de lodos



Fuente: HERNÁNDEZ, 2006.

Las unidades en las que se genera mayor cantidad de lodos aluminosos en plantas de tratamiento convencionales son los sedimentadores, con un 60 y 70% del total de sólidos totales y en los filtros entre el 30% y 40% (ARBOLEDA, 2000).

En la potabilización del agua, los lodos se generan básicamente en las siguientes operaciones y procesos (ROMERO, 2002).

- **Sedimentación simple.** En algunas plantas se utilizan tanques de sedimentación de agua cruda, sin coagulación previa, para remover arena fina, arcilla y residuos orgánicos vegetales.
- **Remoción de hierro y manganeso.** En plantas de remoción de hierro y manganeso, los lodos están constituidos principalmente por los precipitados de hidróxido férrico y de óxidos mangánicos. Generalmente el volumen de estos sólidos es menor que el que se obtiene de plantas convencionales de coagulación.

- **Coagulación química.** Los residuos de coagulación química están constituidos, básicamente, por el lodo de los sedimentadores. El lodo está compuesto por los precipitados de aluminio o de hierro, provenientes del uso de sales de hierro como coagulantes, así como por el material orgánico e inorgánico removido, arena, limo, arcilla, polímeros o ayudantes de coagulación usados, y por el agua de arrastre utilizada para su transporte. Generalmente, los lodos de los sedimentadores de agua coagulada son estables, no se descomponen rápido ni causan problemas de septicidad.
- **Ablandamiento por precipitación.** El ablandamiento con cal (CaO) y soda ash (Na_2CO_3) produce un residuo de carbonato de calcio (CaCO_3), hidróxido de magnesio ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) y cal no reactiva. Además, como en algunas plantas de ablandamiento también se usa coagulación, se produce un residuo de hidróxido de aluminio ($\text{Al}(\text{OH})_3$) o de hierro ($\text{Fe}(\text{OH})_3$). El lodo será proveniente, predominantemente, del reactor de ablandamiento, pero también de la sedimentación de los coagulantes. En general, estos lodos son estables, densos e inertes.
- **Adsorción.** En plantas de purificación de agua con problemas de olores y sabores, el carbón activado usado para su tratamiento contribuye a la cantidad de sólidos que hay que disponer. Aunque este aporte es pequeño en cantidad, puede ser importante por su contribución a la DQO del lodo.
- **Lavado de filtros.** La operación de lavado de los filtros produce un lodo o agua residual de concentración baja de sólidos. La cantidad puede ser del orden del 2% al 6% de agua filtrada y los sólidos son los retenidos en el filtro durante la carrera de filtración. La porción de sólidos retenidos en el filtro depende del tipo de Pretratamiento y del tipo de filtro; en muchas

plantas de remoción de hierro, dicha porción puede ser del 50% al 90% de la porción total de sólidos removidos.

En plantas con aplicación de carbón activado en polvo, antes de los filtros, el agua de lavado de los filtros contiene, además, el carbón activado aplicado y el material adsorbido.

- **Intercambio iónico.** En general, en este tipo de proceso el residuo más importante lo constituye la salmuera de cloruro de sodio NaCl, calcio (Ca) y magnesio (Mg), proveniente de la operación de regeneración de las resinas de ablandamiento. La salmuera puede representar entre 3% y 10% del agua tratada.

5.5.2 Características de los lodos

Las características de los lodos dependen en gran medida de las condiciones del agua cruda, el tratamiento que se realice para su potabilización, el tipo de sustancias químicas que se utilicen, la época del año y aspectos asociados al sistema de tratamiento.

El lodo de alúmina es un fluido no Newtoniano, voluminoso, de aspecto gelatinoso, compuesto principalmente por agua (más del 90%), hidróxido de aluminio ($\text{Al}(\text{OH})_3$), partículas inorgánicas (arcilla o arena), coloides, residuos de reactivos químicos añadidos durante el proceso de tratamiento, plancton, y otra materia orgánica e inorgánica removida del agua. El conocimiento de estas características son esenciales para determinar su tratamiento y su disposición final (SANDOVAL, 2002).

El lodo producido durante la coagulación contiene óxidos e hidróxidos metálicos y contaminantes orgánicos e inorgánicos como: microorganismos, arcilla y arena. En condiciones típicas de tratamiento de un agua proveniente de una fuente superficial y con una dosis de sulfato de aluminio ($Al_2(SO_4)_3$) cercana a 30 mg/L, la mayoría del aluminio en el lodo puede ser esperado como hidróxido de aluminio ($Al(OH)_3 \cdot 3H_2O$) (SANDOVAL, 2002).

5.5.3 Características físico-químicas

Las características del lodo residual proveniente de los procesos de potabilización dependen de las condiciones antes mencionadas, sin embargo poseen características básicas similares.

Estas características que presentan los lodos provenientes de la coagulación con sales de aluminio se presentan en el cuadro 5.3. Así mismo este lodo tiene unas condiciones viscosas y de difícil manejo.

Cuadro 5.3. Características de lodos de sales de aluminio

PARÁMETRO	RANGO
pH	6 – 8
DBO	30 – 300 mg/L
DQO	30 – 5000 mg/L
Sólidos	1% - 2% (típico 1 %)
Color	Gris a carmelita
Olor	Inodoro
Volumen	20 – 50 L/m ³
Conteo bacterial	Alto
Sedimentabilidad	50% en 8h
Secado	2 días sobre lechos de arena para 10% de sólidos

Fuente: Citado por ROMERO, 2002.

Según los reportes históricos que se han realizado al lodo residual (aluminoso) proveniente de los sistemas de potabilización, se ha demostrado una baja presencia de materia orgánica. En cuanto a nutrientes, estos están asociados básicamente a la presencia de nitrógeno y fosforo (5.4.).

Cuadro 5.4. Presencia de materia orgánica en términos de DBO y DQO

REPORTADO POR	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	pH	ST (%)
COLOMBIA				
Puerto Mallario A (Cali)		1201 - 9666	5.59 - 6.0	1.37 - 7.93
Planta San Antonio (Cali)		1466 - 15792	7.64	1.4 - 11.7
Panta Jamundi (Valle del C.)	521	2332.9	6.16 - 6.69	2
Aguas y Aguas de Pereira E.S.P (Risaralda)	45.16 - 244	54.89 - 835	6.25 - 7.13	0.23 - 4.28
Acuseo E.S.P (D/das. Risaralda)	43.7	226.4 - 301.9	7.5 - 7.13	0.018 - 0.168
La Virginia (Risaralda)	42.21	102.4	7.19	0.052
OTROS PAÍSES				
Missouri, USA				8.5 - 0.98
Los Berros				0.02 - 0.09
Berón C. Fabiola	30 - 300	30 - 5000	6.0 - 8	
Neubauer (1968)	30150	500 - 158000		
Sutherland (1969)	100 - 232	669 - 1100		0.11 - 1.6
Bugg (1970)	380	1162 - 15800		0.43 - 1.4
Albrecht (1972)	30 - 100	500 - 10000		0.438 - 2.56
Culp (1974)	40 - 150	340 - 5000		0.3 - 1.5
Nilsen (1974)	100	23000		1
Singer (1974)	30 - 300	30 - 5000		
Cordeiro (1981)	320	5150		8.2
CETESB (1990)	173	1776		0.63

Fuente: HERNÁNDEZ, 2006.

Las características físico – químicas del lodos varían de acuerdo con el tipo de coagulante que se utilice (SOTERO - SANTOS *et al.* 2005), analizaron los lodos residuales provenientes de dos sistemas de potabilización de agua (cuadro 5.5.), para los lodos de cloruro férrico y aluminosos se midieron diferentes parámetros físicos y químicos, de igual forma, para la fase húmeda y seca.

Cuadro 5.5. Características físicas y químicas de lodo de cloruro férrico y aluminoso

PARÁMETRO/ UNIDAD	Lodo de cloruro férrico		Lodo aluminoso	
	Húmedo	Seco	Húmedo	Seco
pH	10.6	6.8	9.8	6,2
Conductividad (µS/cm)	168.0	154.7	59.0	166.0
Turbiedad (NTU)	4500	897	71300	49200
Oxígeno disuelto (mg/L)	5.7	6.3	8.3	6.0
Sólidos totales (mg/L)	5074	2132	52345	29595
Sólidos fijos totales (mg/L)	3878	1510	39075	22207
Sólidos volátiles totales (mg/L)	1196	622	13270	7388
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	4600	2110	50920	14633
Sólidos fijos suspendidos (mg/L)	3960	1790	39910	11033
Sólidos suspendidos volátiles (mg/L)	640	320	11010	3600
Sólidos sedimentables (mL/L)	825	730	700	850
DQO (mg/L)	558	238	20500	11380
Dureza (mg CaCO ₃ /L) ^a	81.32	54.08	68.48	93.60
Nitrógeno total (mg/L) ^a	1.15	0.17	19.90	6.90
Fosforo total (mg/L) ^a	33.30	51.86	75.22	54.06
Metales (mg/kg)				
Zinc	31.5	39.5	64.0	29.0
Plomo	48.0	46.0	56.0	75.0
Cadmio	ND	ND	ND	ND
Níquel	78.0	50.0	50.0	79.5
Hierro	299500	124000	130500	392500
Manganeso	910	1265	1485	1415
Cobre	34.0	57.0	70.0	24.0
Cromo	42	34.0	34.5	38.5
Aluminio	95773	146224	171769	57730

Fuente: SOTERO-SANTOS *et al.*.,2005.

ND: No detectado

^a Medida realizada en el lodo sobrenadante

Como resultado de la investigación antes mencionada, (SOTERO - SANTOS *et al.* 2005). Concluyeron que de acuerdo a los parámetros analizados, se hace necesario realizar un tratamiento a los lodos tanto aluminosos como a los procedentes de la coagulación con cloruro férrico antes de su descarga en algún cuerpo hídrico.

Estas descargas pueden perjudicar la calidad del agua y tener efectos crónicos sobre las comunidades acuáticas (SOTERO – SANTOS *et al.*, 2005).

5.5.4 Características microbiológicas

Las características microbiológicas de los lodos residuales se encuentran asociadas a la presencia de organismos patógenos como coliformes totales, coliformes fecales, mesófilos y enterobacterias.

Cuadro 5.6. Características microbiológicas del lodo aluminoso

REPORTADO POR	PARÁMETRO			
	Recuentos de mesofilos (UFC/mL)	NPM de coliformes totales / 100 mL	NPM de coliformes fecales / 100 mL	Determ. De enterobacterias
Puerto Mallarino A	685	<3	<3	Negativo
Puerto Mallarino B	590	<3	<3	Negativo
San Antonio A	173×10^6	$>24 \times 10^{11}$	$>24 \times 10^{11}$	Enerobacter, aerogenes, E. Coli, Klebsiella pneumoniae
San Antonio B	113×10^7	$>24 \times 10^7$	$>24 \times 10^7$	Enerobacter, aerogenes

Fuente: MEJÍA y DELVASTO, Citado Por HERNÁNDEZ, 2006.

5.5.5 Alternativas de tratamiento lodos

El tratamiento que se debe realizar a los lodos residuales es un aspecto crítico y de gran importancia en cada sistema de potabilización. Debido a las características que este presenta, la disposición sin ningún tipo de tratamiento puede ser contraproducente para el medio donde sea vertido.

Inicialmente el contenido de agua es un factor importante al momento de realizar el tratamiento del lodo. Con el fin de disminuir estos niveles de agua, los lodos son sometidos a un proceso de deshidratación que se puede realizar de diferentes maneras, dentro de las alternativas más utilizadas para este tratamiento, se tiene el espesamiento por gravedad, en el cual se remueven estos excesos de agua por medio de la sedimentación de los sólidos, decantándolos y concentrándolos.

En el tratamiento de lodos, el objetivo principal es la reducción del volumen, debido a que se facilitan los procesos de transporte y disposición final. Dentro de las alternativas de tratamiento más utilizadas se encuentran el espesamiento, centrifugación, prensado, lechos de secado y lagunas de secado.

Existen métodos de deshidratación que son más eficientes que otros, esto debido a que involucran sistemas de mayor complejidad, estos se pueden clasificar en naturales como espesamiento por gravedad, lechos y lagunas de secado, y artificiales como centrifuga, prensado y filtro al vacío, entre otros. Los sistemas artificiales se diferencian de los naturales porque utilizan fuerzas externas que facilitan eliminar más cantidades de agua en el lodo, estas eficiencias están condicionadas a las características sólido/líquido. En el cuadro 5.7. Se presentan algunas alternativas de tratamiento de lodos, sus ventajas y desventajas.

Cuadro 5.7. Alternativas de tratamiento y disposición de lodos

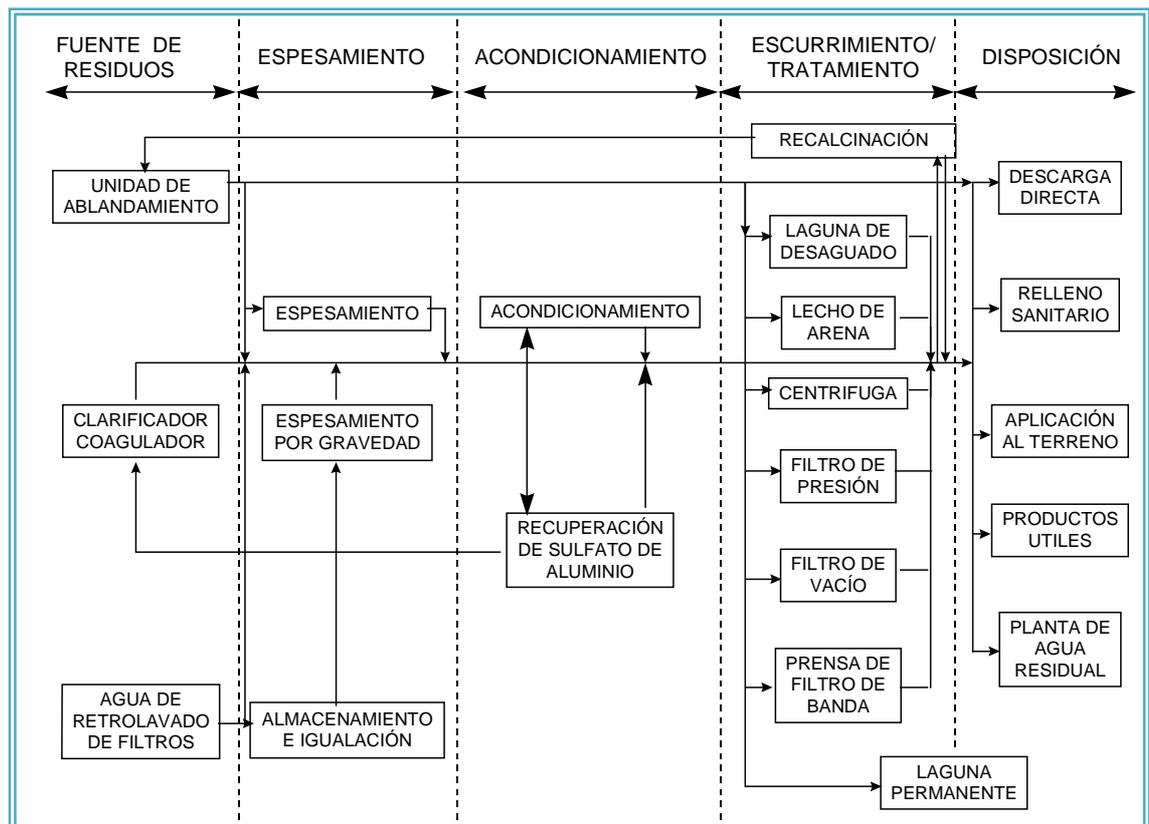
ALTERNATIVA	VENTAJA Y/O DESVENTAJA
Acondicionamiento químico	Se utilizan polímeros para incrementar la concentración de sólidos y liberar agua.
Tanques de espesamiento	Reducen el volumen del lodo antes de la disposición final
Deshidratación <ul style="list-style-type: none"> - Lechos de secado - Lagunas - Filtros prensa - Filtros a vacío - Centrifugación - Congelamiento - Acidificación 	<p>Aumenta la concentración de sólidos.</p> <p>Económicas cuando el terreno está disponible y es relativamente barato. El clima influye de manera importante en su efectividad.</p> <p>Utilizados después del acondicionamiento químico. Es capaz de aumentar la concentración de sólidos del 15 al 20%. El proceso es caro.</p> <p>Entre mayor sea la concentración de aluminio en el lodo, es más gelatinoso y difícil de filtrar.</p> <p>Requiere un espacio pequeño, no se recomienda para lodos de aluminio por su alto contenido de humedad y su alto consumo de energía.</p> <p>El congelamiento remueve agua y destruye la estructura coloidal. Se recomienda el espesamiento como una condición preliminar.</p> <p>El empleo de ácido puede romper las uniones del coagulante con los sólidos. El coagulante puede ser reutilizado en el sistema de tratamiento del agua.</p>
Disposición final <ul style="list-style-type: none"> - Descarga a aguas Superficiales - Relleno sanitario - Incineración 	<p>Es el método de disposición más económico, en términos de contaminación, esta práctica no debe ser utilizada.</p> <p>Los lodos de aluminio se mezclan con desechos de plantas residuales, de manera que no se afecten los procesos biológicos.</p> <p>Requiere de poca área y reduce el volumen del lodo del 80 al 95%. Requiere de altos costos de inversión, operación e inversión. Los metales aumentan su concentración en las cenizas.</p>

Fuente: SANDOVAL, 2002.

La necesidad de realizar el tratamiento al lodo radica como se menciono anteriormente, en facilitar su transporte a un lugar de disposición final, así mismo, en la facilidad del manejo o manipulación del producto deshidratado. El lodo con contenidos húmedas presenta una serie de desventajas, tal es el caso de la utilización del lodo en procesos de compostaje, en el cual se hace necesario la deshidratación con el fin de reducir el volumen de este.

En algunos casos, puede ser necesario eliminar el exceso de humedad para evitar la generación de olores (Metcalf & Eddy, 1996).

Figura 5.2. Procesos de tratamiento y disposición de lodos



Fuente: SANDOVAL, 2002.

5.5.5.1 Deshidratación del lodo

Como se mencionó anteriormente, el proceso de deshidratación del lodo se puede realizar de forma natural o artificial, pudiéndose utilizar el primero en lugares donde se cuente con el suficiente espacio, así mismo, es una alternativa económica debido a que la operación del sistema se debe a factores naturales como es el caso de los lechos de secado el cual depende de las condiciones climatológicas de la región, de igual manera, el volumen de lodos, el coagulante utilizado y las características del lodo, intervienen en la eficiencia del tratamiento.

La deshidratación por medios naturales es una alternativa sencilla, la cual no representa aspectos complejos de funcionamiento y mantenimiento. La desventaja que presenta este medio, está condicionada al área que sea requerida para la implementación del sistema, las condiciones climatológicas y el proceso de extracción del lodo seco.

El grado de deshidratación necesario para una planta dada, dependerá del método de disposición final. La concentración mínima normalmente aceptable puede ser de 20%, sin embargo, esto dependerá de que las instalaciones estén correctamente diseñadas para remover aproximadamente del 80 al 90% de los sólidos suspendidos en los tanques de coagulación - sedimentación (AWWA, 1991).

Los métodos de deshidratación de forma artificial, se basa en la eliminación del exceso de humedad por medios externos, estos sistemas utilizan medios mecánicos como es el caso de las centrifugas, en las cuales se aumenta la gravedad dentro de un recipiente cilíndrico. Adicionalmente, se puede realizar el tratamiento por medio de la separación del agua del lodo por presión externa, como es el caso de filtros prensa y filtro al vacío.

Espesamiento por gravedad

Uno de los métodos para tratamiento de lodos es el espesamiento. El espesamiento por gravedad remueve el exceso de agua mediante la decantación y concentra los sólidos por medio de la sedimentación.

El lodo espesado se procesa adicionalmente, o se dispone. El espesador se diseña con cargas hidráulicas superficiales de 18 a 20 m/d para lodos de alumbre y permite obtener lodo con un 5% de sólidos. De esta manera se concentra lodos con un 99.5% de agua, a lodos con un 95% de humedad y se reduce el volumen del lodo a 1/10 de su volumen original, al aumentar la concentración de 0.5% a 5% (ROMERO, 2002).

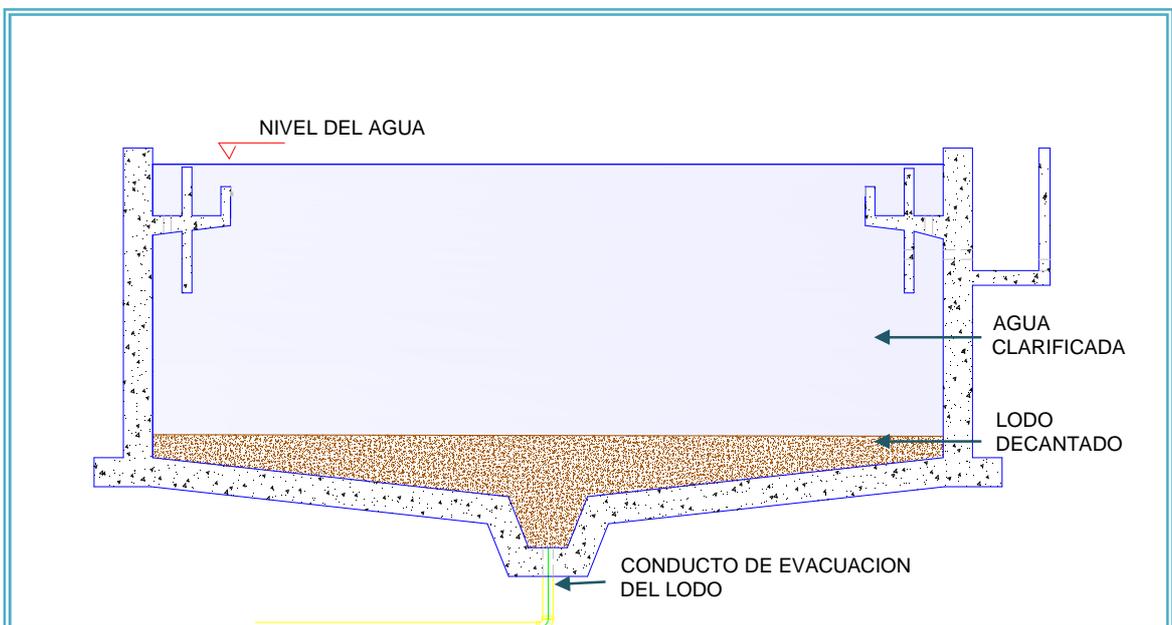


Figura 5.3. Esquema del espesador de lodos por gravedad

Fuente: Autores.

Lechos de secado

Los lechos de secado son una alternativa de tratamiento de lodos que usa mecanismos naturales como la acción del clima, estos son dispuestos en bases de arena y grava, en el cual, mediante la utilización de una tubería de drenaje, el agua drenada puede ser recirculada a la planta.

La eficiencia del lecho de secado de arena se puede mejorar mediante precondicionamiento del lodo con coagulante. De acuerdo con el clima predominante, el período de secado puede oscilar entre unos días y varias semanas. El lodo seco puede removerse finalmente a mano o con cargador frontal y ser transportado al sitio de disposición o de tratamiento adicional (ROMERO, 2002).

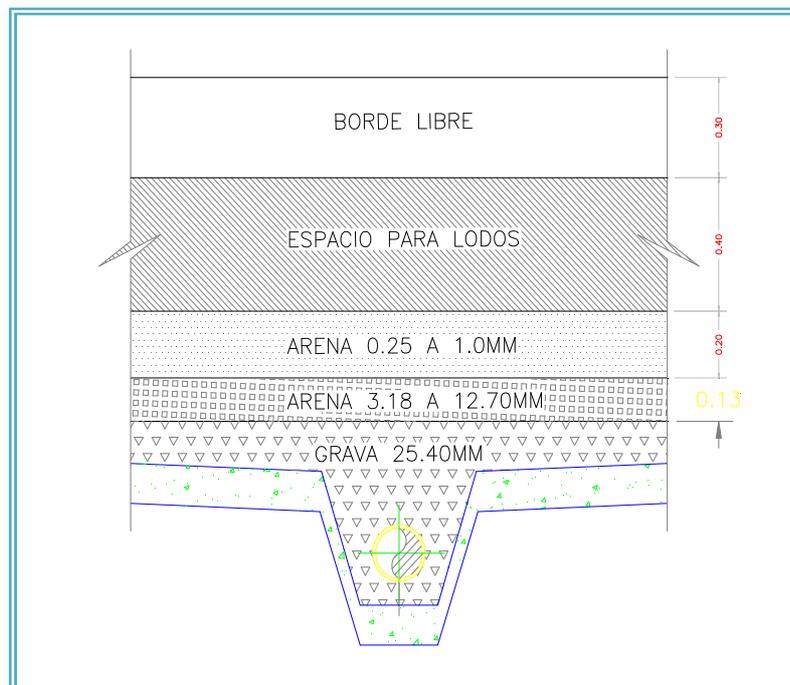


Figura 5.4. Esquema del lecho de secado

Los lechos de secado se pueden agrupar en cuatro tipos (SANDOVAL, 2002):

1. Lechos rectangulares convencionales, con una capa de arena sobre grava, y con tuberías de drenaje subterráneas para recoger el agua. Con o sin instalaciones para la remoción mecánica del lodo seco, y con o sin cubierta.
2. Lechos de secado pavimentados, con una faja central de arena para drenado y con, o sin cubierta.
3. Lechos con malla de alambre, los cuales tienen un fondo de malla de alambre e instalaciones para inundarlos con una capa poco profunda de agua, seguida de la introducción del lodo líquido sobre la capa de agua.
4. Lechos rectangulares de vacío, con instalaciones para la aplicación de vacío a fin de acelerar el drenado por gravedad.

Lagunas de deshidratación

Este sistema de deshidratación de lodos presenta similitud con los lechos de secado, aunque la diferencia radica en el tiempo de secado y las cargas iniciales las cuales son mucho mayores que los lechos.

Estos sistemas requieren gran área, en el cual se produce una sedimentación. El lodo húmedo se bombea a la laguna y se deja sedimentar, cuando la laguna se llena, se saca de servicio y se deja en reposo.

Al igual que los lechos de secado, el rendimiento de las lagunas de deshidratación depende del clima; las precipitaciones y las bajas temperatura inhiben el proceso de deshidratación. La mejor aplicación de lagunas de secado

se da en zonas con elevadas tasas de evaporación (METCALF & EDDY, 1996).

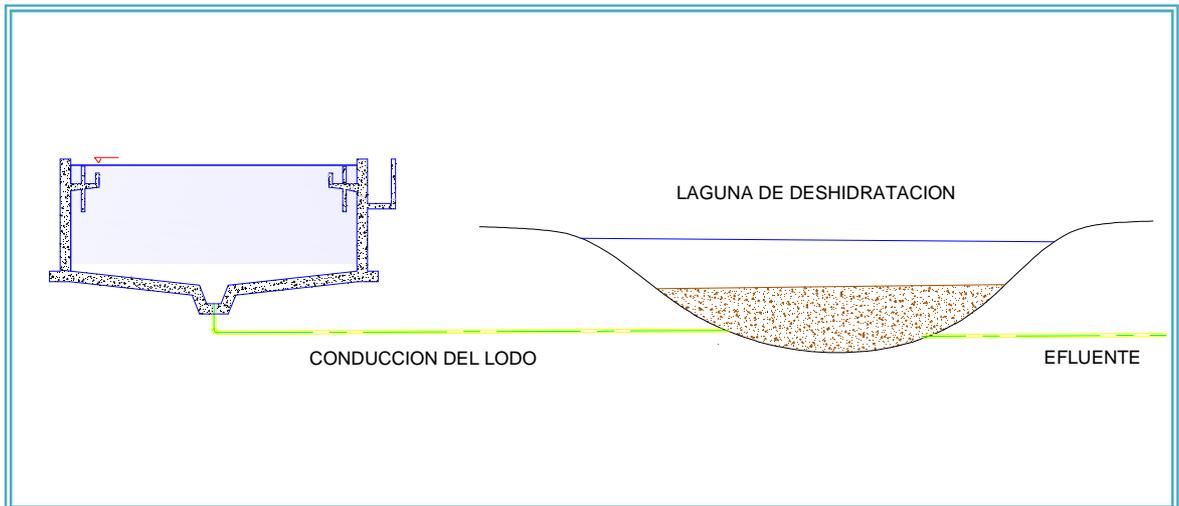


Figura 5.5. Esquema de laguna de deshidratación

Fuente: Autores.

Centrifugas

Este sistema de deshidratación es de tipo mecánico, en el se separa el lodo del agua hasta formar una torta. El principio básico de este sistema consiste en aumentar la fuerza de gravedad entre 500 y 3000 veces, logrando por medio de la diferencia de densidad entre los sólidos del lodo y el líquido eliminar gran parte de la humedad.

Las centrifugas se utilizan tanto para espesar lodos como para deshidratarlos. La deshidratación por centrifugación es un proceso que conlleva a la sedimentación de las partículas empleando la influencia de fuerzas centrifugas.

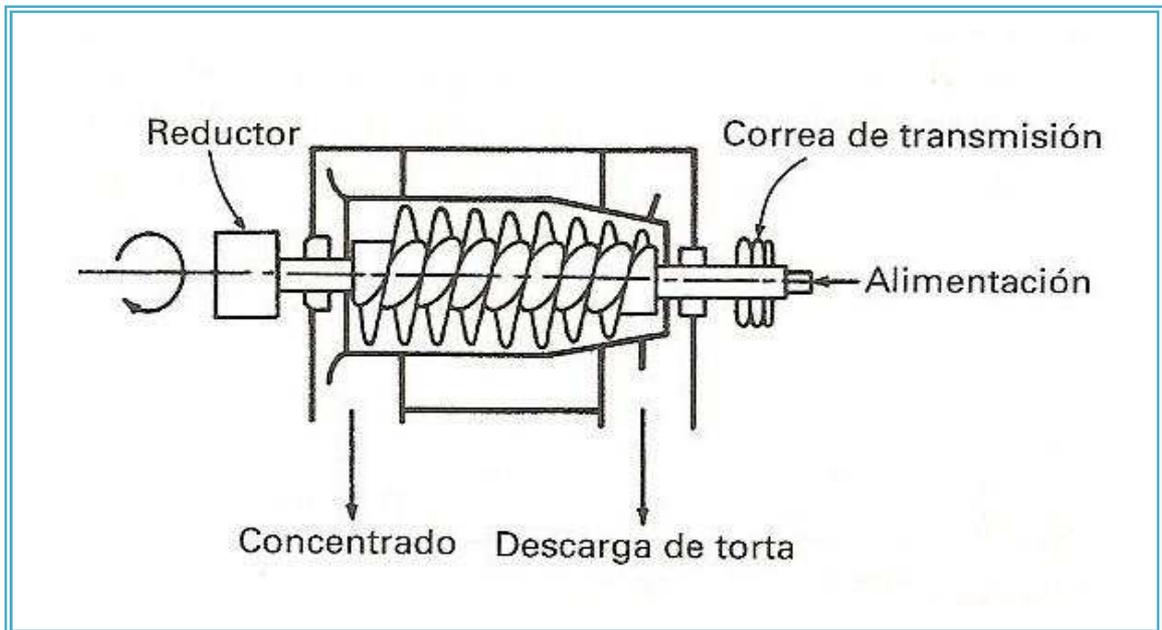


Figura 5.6. Esquema de centrifuga horizontal de tornillo

Fuente: METCALF & EDDY, 1996.

Filtros prensa

En un filtro prensa, la deshidratación se lleva a cabo forzando la evacuación del agua presente en el lodo por la aplicación de una fuerza elevada (Figura 5.7.). Las ventajas del filtro prensa incluyen (1) altas concentraciones de sólidos en la torta; (2) obtención de un filtrado muy clarificado, y (3) elevadas capturas de sólidos (METCALF & EDDY, 1996).

La principal ventaja de un sistema de filtro prensa consiste en que generalmente produce una torta más seca, que la de otras alternativas. En casos donde el contenido de sólidos en la torta deberá ser mayor del 35%, los filtros prensa pueden ser una alternativa costeable. Los filtros prensa también tiene una operación adaptable a una amplia gama de características de lodo, confiabilidad

mecánica aceptable, requerimientos comparables de energía a los sistemas de filtrado al vacío, y una alta calidad del filtrado, que disminuye los requerimientos de tratamiento de la corriente recirculada (SANDOVAL, 2002).

En la deshidratación de lodos por medio filtros prensa se pueden obtener la mayor eliminación de humedad. Este sistema presenta mayores eficiencias que los otros medios mecánicos de deshidratación; sin embargo, existen inconvenientes asociados al funcionamiento, costos del equipo y mantenimiento del sistema.

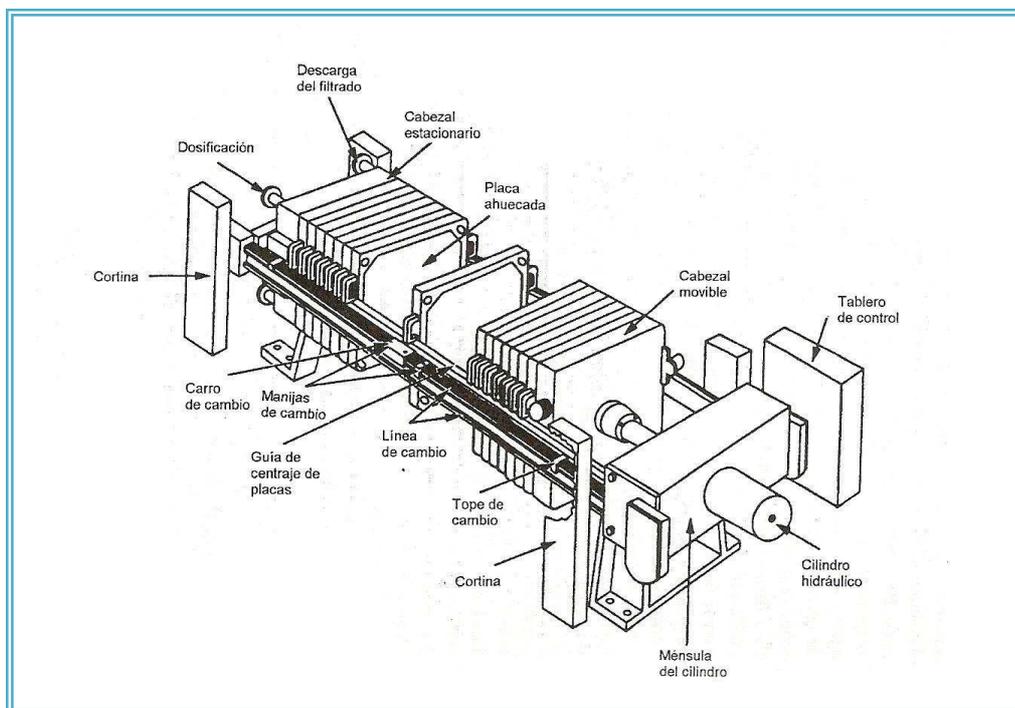


Figura 5.7. Esquema de filtro prensa

Fuente: citado por ROMERO, 2002.

Las principales desventajas de este método son su alto costo al momento de la implementación del sistema, el empleo de sustancias químicas necesarias para acondicionar el lodo, costos de operación y el empleo del medio filtrante el cual retiene la materia sólida.

Filtro de banda

Los filtros de banda son dispositivos de deshidratación de lodos de alimentación continua que incluyen el acondicionamiento químico, drenaje por gravedad, y aplicación mecánica de presión para deshidratar el lodo (METCALF & EDDY, 1996).

El lodo es desaguado en el filtro banda de forma secuencial, a través de 3 etapas operativas: acondicionamiento químico del lodo influente, drenado por gravedad hasta una consistencia no fluida y compactación del lodo en una zona de presión.

La operación de desaguado empieza al entrar el lodo floculado con polímero a la sección de drenado por gravedad, la que normalmente consiste de una banda continua porosa, que proporciona una gran área superficial a través del cual se lleva a cabo el drenado; un sistema de distribución aplica el lodo uniformemente sobre la banda. El filtrado de la zona de gravedad es recolectado y conducido por tubería al sistema de drenaje. El lodo espesado sale de la etapa de desaguado por gravedad y entra a la etapa de compresión, en la que el desaguado adicional se lleva a cabo al exprimir el lodo entre dos bandas porosas (SANDOVAL, 2002).

Las variables que afectan el rendimiento de los filtros banda son numerosas: (1) características del lodo, (2) el método y tipo de acondicionamiento químico, (3) las presiones aplicadas, (4) la estructura de la maquina y (5) la porosidad, velocidad y anchura de las bandas (METCALF & EDDY, 1996).

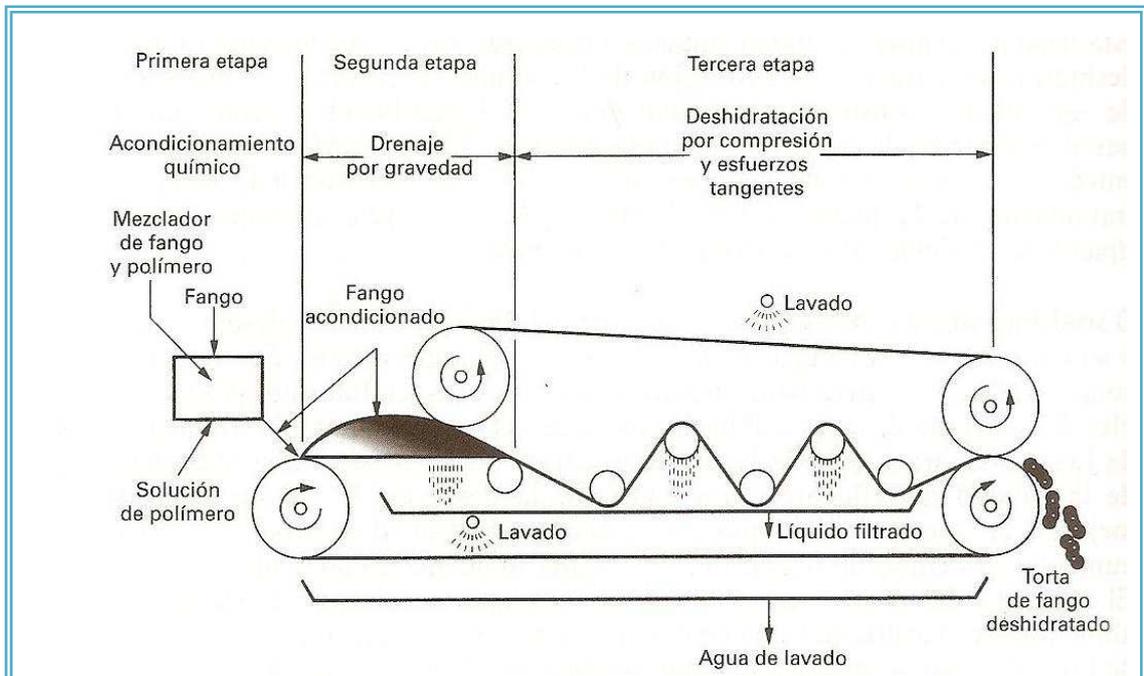


Figura 5.8. Esquema del filtro de banda

Fuente: METCALF & EDDY, 1996.

5.5.5.2 Disposición del lodo

Como alternativa de disposición, gran parte de las plantas de tratamiento vierten directamente los lodos a las fuentes hídricas sin realizar ningún tipo de tratamiento previo. Sin embargo en las plantas donde se realiza el tratamiento de los lodos se hace necesario disponer adecuadamente este subproducto resultante del proceso.

Estos lodos que han sido tratados y a los cuales se les ha eliminado gran parte de su humedad, deben ser dispuestos de tal manera que no representen ningún riesgo a las fuentes hídricas o al medio natural donde sean llevados.

Como alternativas de disposición final de lodos existen diferentes tipos, en las cuales se encuentran las descargas en cuerpos de agua, disposición en rellenos sanitarios y recuperación de subproductos.

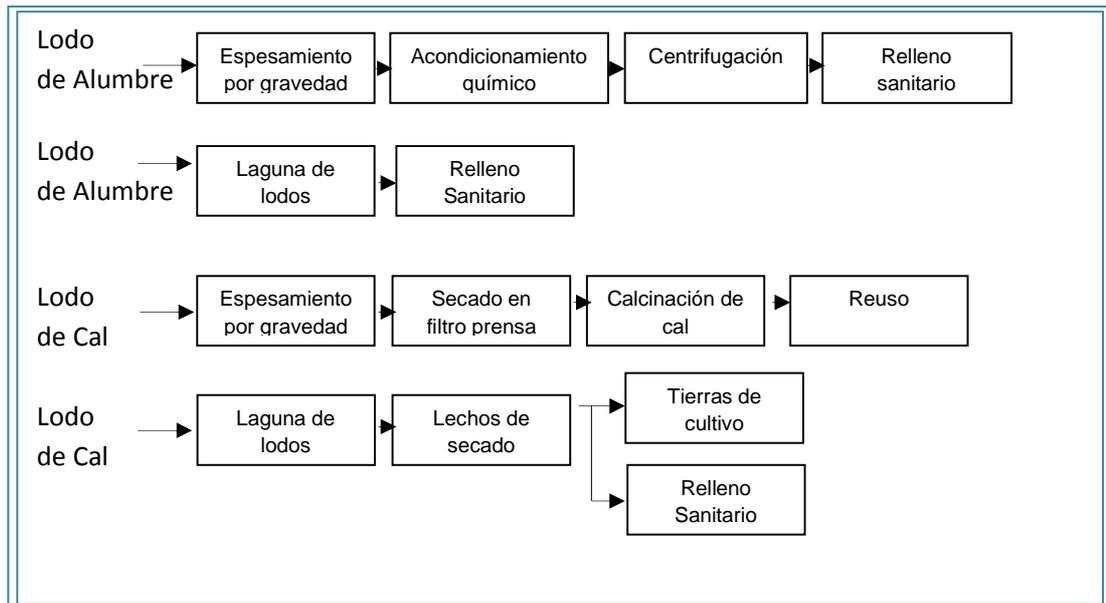


Figura 5.9. Procesos de tratamiento y disposición de lodos

Fuente: ROMERO, 2002.

6. MARCO JURÍDICO

DECRETO	CAPITULO	ARTÍCULOS/SUBCAPÍTULOS	DESCRIPCIÓN
Decreto 1594 de 1984 “usos del agua y residuos líquidos”		Artículos: 5, 6, 7, 10 y 12	En estos artículos se plantean algunas definiciones en lo que concierne a descargas de aguas residuales.
	Capítulo II Del ordenamiento del recurso	Artículo 24	Se presentan los parámetros para hacer el control o manejo a la fuente receptora
	Capítulo IV De los criterios de calidad para destinación del recurso	Artículo 47	Criterios de calidad aguas de dilución, asimilación y transporte
	Capítulo VI Del vertimiento de los residuos líquidos	Artículos: 61,66,68 y 70	Presentan unas disposiciones generales sobre los vertimientos.
	Capítulo VI De las normas de vertimiento	Artículos: 72, 78, 82,112 y 117	Se dan las normas de vertimientos con los valores máximos admisibles de las características de estos, para usuarios existentes y usuarios nuevos; además de otras instrucciones.
	Capitulo X De las autorizaciones sanitarias Disposiciones generales	Artículo 130	Muestra las obligaciones, y/o requerimientos que debe presentarse para realizar los vertimientos a un cuerpo hídrico.

	Capitulo XII De las tasas retributivas	Artículos: 142, 143, 144, 145, 146, 149, 148 y 147	Se dan las formulas para el cálculo de las tasas retributivas, la forma como se pagara y se recaudara esta, además de mencionar quienes tendrán la obligación de pagar dicha tasa.
	Capitulo XIII De los estudios de efecto ambiental o impacto ambiental	Artículos: 150, 151, 152, 154	Se presentan las personas o proyectos que deben de realizar estudios de impacto ambiental, además de la información mínima que debe presentarse en este documento.
	Capitulo XIV De los métodos de análisis y de la toma de muestras	Artículos: 155, 160, 161 y 173	Muestra los métodos de análisis para cada parámetro a analizar, donde se deben tomar las muestras y como se deben tomar.
REGLAMENTO TÉCNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO RAS - 2000 SECCIÓN II TÍTULO C SISTEMAS DE POTABILIZACIÓN	C.1.1 Alcance		En este capítulo trata sobre el alcance del documento, sobre todos los procedimientos que se deben tener en cuenta en una planta de potabilización.
	C.1.4 Procedimiento particular para el desarrollo de los sistemas de Potabilización	C.1.4.2 Ubicación de la planta	Se muestra algunos factores a tener en cuenta en el momento de construir una planta de potabilización.
	C.2.5.1 Ensayos de laboratorio	C.2.5.1.2 Otros ensayos	Se establecen los ensayos preliminares que se deben hacer en una planta potabilizadora para poder elegir sus procesos de tratamiento.
	C.6.5.2 Remoción y descarga de lodos	C.6.5.2.1 Remoción manual de lodos C.6.5.2.2 Remoción mecánica de lodos	Se plantea como debe realizarse la evacuación de los lodos producidos en el proceso de potabilización.

<p style="text-align: center;">REGLAMENTO TÉCNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO RAS - 2000</p> <p style="text-align: center;">SECCIÓN II TÍTULO C SISTEMAS DE POTABILIZACIÓN</p>	C.13.1 Alcance		Se presentan todo el contenido de este capítulo, el tipo de información técnica que se encuentra en el documento específicamente sobre el manejo de lodos.
	C.13.2 Clasificación de los procesos		Da a conocer porcentajes y unidades generadoras de lodos.
	C.13.3 Estudios previos	<p>C.13.3.1 Caracterización de los lodos</p> <p>C.13.3.2 Evacuación de los lodos</p> <p>C.13.3.3 Disposición final de lodos</p> <p>C.13.3.4 Minimización de la producción de lodos</p>	<p>En este capítulo se dan las formas como se deben realizar las caracterizaciones de los lodos describiendo dos procesos que son:</p> <p>Determinación de la concentración, peso de los lodos y peso específico de los lodos.</p> <p>Además se informa sobre las formas en que debe evacuar los lodos de la planta ya sea por Evacuación periódica o Evacuación continua.</p> <p>De igual forma, presenta las alternativas de tratamiento más usadas de acuerdo a la concentración de sólidos producidos en el sistema de potabilización; y Por último se dan unas recomendaciones sobre cómo se puede reducir el volumen de lodos producidos en el sistema de potabilización.</p>
	C.13.4 Descripción de los procesos	<p>C.13.4.1 Evacuación de los lodos</p> <p>C.13.4.2 Manejo y transporte</p> <p>C.13.4.3 Acondicionamiento de lodos</p>	<p>Se plantea una clasificación de los lodos de acuerdo, a su contenido de humedad y/o líquido, y se indican unos porcentajes de reducción según la anterior clasificación.</p> <p>A su vez presentan como deben hacerse</p>

		C.13.4.4 Disposición final de los lodos	la evacuación de los lodos en la unidad de tratamiento de los mismos presentando un Sistema de evacuación Y los diferentes tipos de evacuación. Por último presentan algunas alternativas de acondicionamiento para el manejo y disposición final de los lodos.
	C.13.5 Parámetros de diseño	C.13.5.1 Evacuación de los lodos C.13.5.2 Disposición final de los lodos	Se presentan los principales criterios que se deben tener en cuenta para el manejo y diseño de las unidades de tratamiento de lodos en todo lo que comprende su tratamiento.
	C.13.6 Control de los procesos y operación	C.13.6.1 Evacuación de los lodos C.13.6.2 Disposición final de los lodos	En este capítulo muestran los parámetros que se deben considerar en el momento de adoptar un sistema de tratamiento de lodos en su proceso de operación.

Fuente: Autores.

7. MARCO CONCEPTUAL

Agua cruda: Agua que no ha sido sometida a proceso de tratamiento.

Agua potable: Agua que por reunir los requisitos organolépticos, físicos, químicos y microbiológicos, en las condiciones señaladas en el Decreto 475 de 1998, derogado por el artículo 35, decreto nacional 1575 de 2007 puede ser consumida por la población humana sin producir efectos adversos a la salud.

Análisis físico-químico del agua: Pruebas de laboratorio que se efectúan a una muestra para determinar sus características físicas, químicas o ambas.

Análisis microbiológico del agua: Pruebas de laboratorio que se efectúan a una muestra para determinar la presencia o ausencia, tipo y cantidad de microorganismos.

Calidad del agua: Conjunto de características organolépticas, físicas, químicas y microbiológicas propias del agua.

Coagulación: Aglutinación de las partículas suspendidas y coloidales presentes en el agua mediante la adición de coagulantes.

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

Contaminación del agua: Alteración de sus características organolépticas, físicas, químicas, radiactivas y microbiológicas, como resultado de las actividades humanas o procesos naturales, que producen o pueden producir rechazo, enfermedad o muerte al consumidor.

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅): Expresa la cantidad de oxígeno necesario para la oxidación bioquímica, de los compuestos orgánicos degradables existentes en el líquido residual. Fijando ciertas condiciones de tiempo y temperatura, por ej. en 5 días y a 20 ° C. Cantidad de oxígeno consumida durante un tiempo determinado, a una temperatura dada, para descomponer por oxidación las materias orgánicas. Es una característica cuantificable del grado de contaminación del agua a partir de su contenido de sustancias biodegradables. Ese contenido se expresa en función de la demanda de oxígeno de los microorganismos participantes en la degradación de la materia orgánica presente a 20 oC en un tiempo predeterminado. (Usualmente 5 días. DBO₅).

Demanda Química de Oxígeno (DQO): Expresa la cantidad de oxígeno necesario para la oxidación química de la materia orgánica. Generalmente es mayor que el valor de la DBO₅, porque suele ser mayor el número de compuestos que se oxidan por vía química que biológica, ante la presencia de un oxidante fuerte como los dicromatos. La fijación química se debe al oxígeno consumido por los cuerpos reductores sin intervención de organismos vivos, esto es común en los efluentes industriales. Es una característica cuantificable del grado de contaminación del agua por la presencia de sustancias orgánicas mensurando la cantidad de oxígeno necesario para su oxidación. El dicromato de potasio es generalmente utilizado como agente oxidante. La D. Q. O. generalmente produce valores superiores a la D. B. O. y a veces considera sustancias que no son biodegradables.

Desarenador: Componente destinado a la remoción de las arenas y sólidos que están en suspensión en el agua, mediante un proceso de sedimentación.

Filtración: Proceso mediante el cual se remueve las partículas suspendidas y coloidales del agua al hacerlas pasar a través de un medio poroso.

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

pH : Es una medida de la concentración del ión hidrógeno en el agua. Se expresa la concentración de este ión como pH, y se define como el logaritmo decimal cambiado de signo de la concentración de ión hidrógeno. Símbolo que se utiliza para la concentración de hidrogeniones, los valores de pH abarcan de 0 a 14 correspondiendo un valor de pH 7 si es neutro siendo menor a 7 ácido y mayor a 7 alcalino. Concentración del ion hidrógeno y de la acidez de soluciones acuosas. El agua pura tiene pH 7 y es considerado como neutro. Por encima de este se trata de soluciones básicas y por debajo de soluciones ácidas. El agua de lluvia oscila entre un pH 4.6 y 5.6.

Patógenos: Microorganismos que pueden causar enfermedades en otros organismos, ya sea en humanos, animales y plantas.

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

Sólidos Disueltos (SD): Mezcla de un sólido (solute) en un líquido solvente en forma homogénea.

Sólidos Sedimentables (SS): Son aquellos Sólidos Suspendidos que sedimentan en el fondo de un recipiente de forma cónica (cono Imhoff), en un tiempo fijado por ejemplo en 10 minutos o en 2 horas. Constituyen una medida aproximada de la cantidad de barro que se obtendrá en el proceso de decantación.

Sólidos Suspendidos (SS): Pequeñas partículas de sólidos dispersas en el agua; no disueltas.

Sólidos Totales (ST): Son los materiales suspendidos y disueltos en un agua. Se obtienen después de someter al agua a un proceso de evaporación a temperaturas comprendidas entre 103 y 105 °C.. La porción filtrable representa a los Sólidos Coloidales Totales Disueltos y la no - filtrable son los Sólidos Totales en Suspensión.

Sólidos Volátiles (SV): El contenido de sólidos volátiles se interpreta en términos de materia orgánica, teniendo en cuenta que a $550\pm 50^{\circ}\text{C}$ la materia orgánica se oxida formando el gas carbónico y agua que se volatilizan. Sin embargo, la interpretación no es exacta puesto que la pérdida de peso incluye también pérdidas debido a descomposición o volatilización de ciertas sales minerales como por ejemplo las sales de amonio o carbonato de magnesio.

8. METODOLOGÍA

8.1 MUESTREO DE LODOS

El término original usado para describir todos los residuos de una planta tratamiento fue lodos. De hecho lodo es realmente el componente sólido o líquido de algunos tipos de corrientes residuales. En términos residuales se usa ahora para describir todos los residuos de procesos de una planta de tratamiento, bien sean líquidos, sólidos o gaseosos (AWWA, 2002).

Las sales metálicas hidrolizadas (Sulfato de Aluminio) o polímeros orgánicos sintéticos (Policloruro de Aluminio - PAC-) se añaden en el proceso de tratamiento de agua para coagular contaminantes suspendidos y disueltos y conseguir un agua relativamente clara adecuada para la filtración. La mayoría de estos coagulantes y las impurezas remueven los sedimentos del fondo del tanque de sedimentación donde llegan a formar parte de la corriente de residuos. Estos residuos se conocen como lodos de aluminio, hierro o polímeros (incluso aquellos que estén formados en gran parte de agua) reconociéndose por el nombre del coagulante principal utilizado. Estos residuos cuentan con aproximadamente el 70 % de los sólidos generados en la planta de agua (AWWA, 2002).

Es, por otra parte notorio y aparente que la mayoría de la generación de residuos donde se producen sólidos implica a las plantas de tratamiento de agua que utilizan procesos de coagulación o ablandamiento. Los residuos anteriores son residuos sólidos / líquidos en los que el residuo líquido (agua) contiene sólidos en

suspensión (que, como se ha indicado antes se conocen como lodos) (AWWA, 2002).

La mayoría de las plantas de coagulación producen dos residuos principales: residuos tanque de sedimentación (comúnmente llamados lodos) y residuos del filtro de retrolavado conocidos como agua residual de retrolavado de filtro (AWWA, 2002).

Las aguas superficiales contienen sólidos suspendidos que son removidos durante el proceso de sedimentación, generando lodos químicos que representan del 0.3 al 1% del agua tratada. Actualmente estos lodos son dispuestos sin ningún tratamiento en presas, terrenos o en las mismas fuentes de suministro ocasionando daños al medio ambiente y en algunas ocasiones son descargados al alcantarillado y tratados en conjunto con las aguas residuales domésticas (SANDOVAL, 2002).

La toma de muestras fue llevada a cabo en la unidad de sedimentación 1, y en la quebrada El Calvario a una distancia aproximada de 40 metros aguas arriba y 50 metros aguas abajo del punto de descarga de la planta a la misma; para el muestreo aguas arriba, se tomo una sola muestra ya que se pretendió medir las condiciones normales de la corriente superficial y el muestreo aguas abajo se llevo a cabo durante la actividad de vaciado y lavado de la unidad.

Puntos de muestreo y toma de muestras

Sedimentador 1: Las muestras procedentes del sedimentador 1 fueron tomadas en las válvulas de purga, las cuales se encuentran ubicadas en el canal de descarga, donde confluyen las aguas residuales de retrolavado, lodos y perdidas de agua

procedentes de los sedimentadores y los filtros (Figura 8.1.), el cual los conduce a la quebrada El Calvario.

Se tomaron muestras compuestas del sedimentador 1 durante el proceso de vaciado y lavado, con alícuotas de 500 mililitros cada 5 minutos; el tiempo de duración para cada uno de los procesos fue de 40 minutos, con la cual se pudo realizar un total de 8 alícuotas en cada una de las dos actividades.

Cada alícuota fue vertida a un recipiente de plástico, una vez terminado este proceso se homogenizo la mezcla, llenándose un recipiente plástico de 4 litros para su posterior análisis.

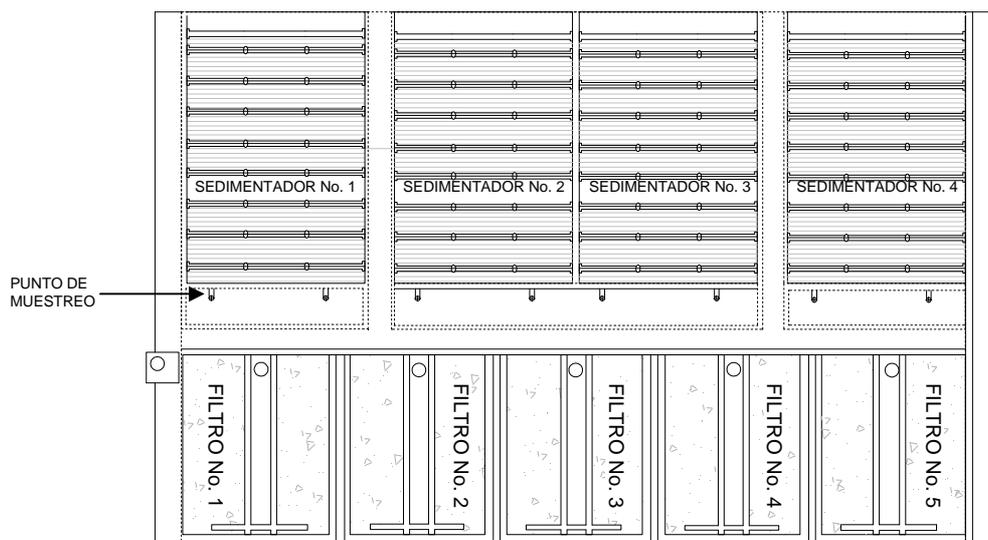


Figura 8.1. Punto de muestreo del sedimentador 1

Fuente: Autores.

Para realizar el análisis microbiológico de los lodos se utilizó un recipiente de vidrio previamente esterilizado de 50 mililitros y con una cubierta de papel con el fin de evitar el contacto con la luz.

Figura 8.2. Válvulas de purga del sedimentador 1



Fuente: Autores

Quebrada El Calvario: Las muestras tomadas en la quebrada El Calvario se realizaron dividiendo el ancho de la sección en 10 partes. Se tomaron alícuotas de 200 ml cada 10 cm aproximadamente a lo ancho de la misma, obteniendo un total de 2 litros de muestra cada 5 minutos, esto se realizó durante el transcurso de las actividades de vaciado y lavado de la unidad de sedimentador 1, en la figura 8.3. se puede observar cómo cambian las condiciones del cuerpo de agua cuando se efectúa el lavado de la unidad.

Figura 8.3. Condiciones del agua antes y después del muestreo de la quebrada El Calvario



Antes de la descarga



Después de la descarga

Al igual que las muestras obtenidas del sedimentador 1, cada alícuota fue vertida en un recipiente plástico con el fin de homogenizar la muestra y obtener el volumen necesario para los respectivos análisis.

Es importante tener en cuenta que las muestras realizadas en el sedimentador 1 y en la quebrada el calvario se efectuaron al mismo tiempo, desde el inicio de la actividad de vaciado y hasta culminar el lavado de la unidad.

8.2 EVALUACIÓN DE LAS VARIACIONES DE TURBIEDAD Y DOSIFICACIÓN DE COAGULANTE

Las variaciones de turbiedad que se presentan en una planta de tratamiento, dependen en gran medida de las condiciones climáticas, de las características de la cuenca y de factores naturales y antropicos que se puedan presentar a lo largo de su cauce. Sin embargo, el clima es el factor más determinante en las variaciones de turbiedad.

A fin de conocer las variaciones de la turbiedad en periodos de un año y con el fin de determinar los periodos climáticos de invierno y verano, se evaluaron los datos históricos de este parámetro. Para esto se utilizaron datos de turbiedad correspondientes a los promedios diarios reportados por el laboratorio de la planta de Villa Santana y los cuales abarcan desde Junio de 2006 hasta Mayo 2007 (Año 1) y Junio 2007 hasta Mayo 2008 (Año 2).

De igual manera que la turbiedad, se evaluaron los datos de dosificación de coagulante reportados por la planta con el fin de conocer la relación que existe entre las variaciones de turbiedad y la generación de lodos en la planta.

Para realizar la evaluación de los datos de turbiedad y dosificación de coagulante, y poder analizar los resultados obtenidos, se utilizo el concepto de media móvil simple. Esta herramienta tiene la función principal de suavizar la serie de datos sobre la cual se calcula, permitiendo evidenciar de forma más clara y detallada la tendencia de los datos.

Se utilizaron periodos de tiempo semanales, es decir, se tomaron promedios utilizando la media móvil simple cada 7 días en el transcurso de los años de estudio.

8.3 PLANTEAMIENTO DE LAS ALTERNATIVAS PARA EL TRATAMIENTO DEL LODO

Se evaluaron las principales características de cada una de las alternativas con el fin de darle un valor a los aspectos que se tomaran en cuenta en la matriz de decisión. Las alternativas de tratamiento de lodos que se describen a continuación, se establecieron teniendo en cuenta su utilización a nivel nacional.

Cuadro 8.1. Características de las alternativas para el tratamiento de lodos

ALTERNATIVA	CARACTERÍSTICAS
Lechos de secado	<p>Como resultado se obtienen lodos con 60 a 80 % de humedad con tiempos de 10 a 15 días.</p> <p>Las ventajas de los lechos de secado son su fácil construcción, bajo costo de inversión, necesidad de mano de obra no especializada, poco y fácil mantenimiento. Presentan como desventajas la necesidad de terreno y mano de obra para el retiro del lodo seco, así como también puede haber problema de olores.</p>
Centrifugación	<p>La eficiencia suele ser alta, pero generalmente el líquido arrastra sólidos no sedimentables. La torta contiene de 60 y 90 % de humedad dependiendo del tipo de sólidos y de la carga utilizada. El acondicionamiento químico del lodo suele mejorar considerablemente la separación. Las capacidades disponibles están en el rango de 2 a 180 m³/h.</p> <p>Debido a la alta velocidad de giro es importante tener cuidados especiales tanto en la instalación como en el mantenimiento, de forma de evitar ruido y vibración.</p> <p>Dentro de las ventajas de esta tecnología se destacan la alta eficiencia y el poco requerimiento de espacio. Como desventajas se señalan el desgaste mecánico, la potencia</p>

	consumida y la presencia de los sólidos finos en el efluente.
Filtros de banda	<p>El ancho de la banda varía entre 0,5 y 3,5 m, las cargas volumétricas oscilan entre 2 a 5 m³/m.h y las másicas entre 90 a 680 kg/m.h.</p> <p>Dependiendo del tipo de lodos se pueden obtener tortas con 10 a 35 % de sólidos.</p> <p>Como ventajas se pueden señalar el bajo consumo de energía y la reducida necesidad de mano de obra. Dentro de las desventajas tenemos la alta sensibilidad al tipo de lodo y la corta vida útil de la tela filtrante.</p>
Filtros prensa	<p>Se utilizan presiones elevadas de 40 a 150 N/cm² durante períodos de hasta tres horas. La capacidad de filtración oscila entre 5 a 15 kg/m². h, logrando tortas de 2 a 3 cm de espesor. Se obtienen tortas con 40 a 60 % de sólidos y una separación prácticamente completa del material en suspensión.</p> <p>Finalmente las placas se separan y la torta cae por gravedad, luego se lavan los filtros, se inspeccionan y se vuelve a repetir el ciclo. El ciclo completo puede durar hasta 5 horas. El lodo puede requerir acondicionamiento químico previo o se puede utilizar una capa de pre-revestimiento como ayuda filtrante.</p> <p>Las ventajas son la alta eficiencia de la separación de sólidos, el alto porcentaje de sólidos en la torta, la gran variedad de tamaño de placa (hasta 2x2 m) y la posibilidad de usar hasta 150 placas o más. Como desventajas tenemos costos de inversión mayores que para las centrífugas y los filtros de bandas, además del mantenimiento de los filtros y la mano de obra requerida.</p>

Fuente: Tomado del sitio oficial del Centro Internacional de Investigaciones para El Desarrollo. [En línea] Disponible en la dirección URL: www.idrc.ca/uploads/user-S/11437610781gr-02_2da-parte-4lodos_pag127-132.pdf

8.4 METODOLOGÍA DE LA SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO DEL LODO

Basados en (MORGAN J.M., LÓPEZ J. y NOYOLA A., 1998) se adaptó la matriz de decisión para la selección de tecnología relacionada con el tratamiento de aguas residuales, pues los aspectos evaluados en esta matriz no difieren entre agua residual y potable.

Para evaluar las posibles alternativas del tratamiento de los lodos se debe hacer principal énfasis en el factor evaluado para poder dar un valor a la ponderación (cuadro 8.2.)

Cuadro 8.2. Ponderación de los factores a evaluar

FACTOR EVALUADO	COMENTARIOS	PONDERACIÓN
Aplicabilidad del proceso	Ante la alta generación de lodos aluminosos en la planta de tratamiento y el impacto ambiental que estos producen sobre el medio ambiente, se hace necesario implementar una alternativa tanto técnica como económicamente viable para esta.	5
Calidad del lodo obtenido	Evaluando la alternativa más viable, se deberán tener en cuenta las características finales de la torta de lodo, para su posterior disposición final o recirculación en alguno de los procesos de la planta.	15
Generación del producto con valor agregado o reutilización	Se refiere a la cantidad de lodo obtenido después del proceso de tratamiento con alguna de las alternativas, teniendo en cuenta las características del mismo que permitan	5

	su comercialización, reutilización o disposición final.	
Vida útil	Se deberá tener en cuenta la vida útil de cada una de las alternativas, partiendo de la base de que se destinaran unos recursos limitados para construcción, operación y mantenimiento que a futuro si se les da un buen direccionamiento puedan recuperar la inversión inicial o en cambio desfavorecer esa inversión si la experiencia y la manipulación de los recursos, equipos o unidades de tratamiento no son las mejores.	10
Requerimiento de área	Para la ubicación de la alternativa de manejo de lodos aluminosos, se tendrá en cuenta el área disponible en la planta de tratamiento para tal fin, cabe aclarar que algunas alternativas pueden ocupar grandes extensiones de terreno pero son más viables tanto económica como técnicamente.	10
Costos	<p>A la hora de elegir una alternativa de tratamiento de lodos en este caso aluminosos, es importante estudiar los alcances. Ya que estos no solo se basan en los recursos con que se cuenten en el momento para la consecución de la obra, sino que además garantice el sostenimiento de esta más adelante.</p> <p>Si se elige una alternativa económica y más eficiente, dichos recursos podrían ser destinados al mantenimiento de esta a futuro, permitiendo así hacerla más optima y brindarle un mejor servicio a la población y a la protección del medio natural.</p> <p>En cuanto a la parte de operación y</p>	20

	<p>mantenimiento es importante como se recalco anteriormente, hacer una buena elección, pues en países en vía de desarrollo como Colombia este es unos de los aspectos que desfavorece la puesta en marcha de proyectos de agua potable y saneamiento.</p>	
Insumos	<p>Los insumos es otro aspecto importante a tener en cuenta a la hora de la evaluación de la alternativa, pues se debe considerar que algunos coagulantes o polielectrolitos son importados y a veces con unos precios muy elevados, además de las distancias recorridas para transportarlos hacia la planta que aumentan aun mas su valor.</p> <p>Unido a esto la disponibilidad económica con que se cuente para la parte energética da un valor agregado a este aspecto de evaluación, pues si no se hace una buena elección y la administración del recurso es ineficiente, de nada valdrá ahondar esfuerzos en una alternativa de tratamiento pues la energía es parte esencial de todo proceso, pero en unos puede ser más necesaria que en otros, es allí donde está el éxito de la elección de una metodología técnica y económicamente viable.</p>	10
Diseño y construcción	<p>Para el diseño y construcción se debe tener en cuenta, que el personal que ejecute el proyecto este en la capacidad técnica y que responda a las necesidades de la población, además los criterios de diseños deben estar ajustados a la normatividad y que la alternativa seleccionada haya sido ampliamente probada a nivel no solo</p>	5

	nacional sino internacional.	
Operación	Si se hace una buena elección, no solo se ahorraran costos, sino que la planta podrá ser operada por personal con poca capacitación, además las proyecciones de operación y mantenimiento deben garantizar que los repuestos e insumos estén cercanos a la planta de tratamiento y que ante cualquier inconveniente técnico o humano halla un centro de atención cercano a la población.	15
Aspectos ambientales	La importancia del manejo y disposición de los residuos solido/líquidos que se generan en una planta de tratamiento de agua potable, ameritan su respectivo estudio para elegir la alternativa que mejor se adapte a las características de la planta, este estudio debe estar estrictamente ligado con el aspecto ambiental que contempla no solo la generación de olores, vectores, ruidos, contaminación visual, etc. sino la mitigación de los mismos.	5

Fuente: Adaptada de la matriz de decisión para la selección de tecnología relacionada con el tratamiento de aguas residuales. (MORGAN J.M., LÓPEZ J. y NOYOLA A., 1998).

8.5 ACONDICIONAMIENTO DE LOS LODOS ALUMINOSOS PROVENIENTES DE LA OPERACIÓN DE VACIADO DEL SEDIMENTADOR, PARA SIMULAR LAS CONDICIONES DE SEDIMENTACIÓN Y DESHIDRATACION

El espesamiento de los lodos puede realizarse en un tanque o deposito de concentración por gravedad. El espesamiento puede ser económicamente atractivo porque reduce el volumen de lodos y produce un lodo más concentrado para su posterior tratamiento en el proceso deshidratador o quizás para transportarlo al lugar de aplicación en el terreno (AWWA, 2002).

Para el acondicionamiento de los lodos aluminosos, se tomaron alícuotas de 4 litros cada cinco minutos en las válvulas de purga del sedimentador 1, el tiempo de vaciado de la unidad fue de 40 minutos. Posteriormente, se homogenizo en un recipiente de plástico, obteniendo una muestra de 2 litros y ser enviada a su respectivo análisis de laboratorio, además del llenado de una unidad de vidrio para simular las condiciones de sedimentación.

Según (HERNÁNDEZ, 2006) teniendo en cuenta la alta concentración de humedad de los lodos aluminosos (99,77 %) en las etapas de vaciado y lavado de sedimentadores, se hace necesario eliminar el mayor contenido de humedad posible por medio de la deshidratación, para tal fin los lodo se deben someter a una sedimentación inicial, teniendo en cuenta esto, se procedió como se describió anteriormente a llenar una unidad de vidrio de 50 x 30 x 30 (cm) hasta un 80 % aproximadamente de su capacidad (30,6 Litros) con los lodos de la muestra homogenizada y se dejaron decantando por un periodo de 48 horas.

Luego de transcurridas las 48 horas se podían notar claramente dos fases, un sobrenadante o fase clarificada con una altura aproximada de 20,1 cm y una concentración de lodo en el fondo con una altura de 8,1 cm aproximadamente.

Figura 8.4. Prueba piloto de sedimentación



Muestra homogenizada



Muestra decantada en 48 horas

Para obtener el lodo concentrado fue necesario eliminar el sobrenadante, luego de realizado este proceso el lodo fue depositado en una unidad de vidrio que simulaba un lecho de secado con las mismas dimensiones de la unidad anterior de sedimentación, compuesto por una capa de antracita, una de arena y una de grava.

Para evitar algún tipo de contacto entre lecho de secado y el lodo, se acondiciono una tela de filtro y se dejo deshidratando el lodo durante 48 horas, además se hizo necesario cubrir el lodo evitando así una concentración mayor de humedad, pues se presentaron algunas precipitaciones durante el transcurso de la prueba.

9. RESULTADOS OBTENIDOS

9.1 CARACTERIZACIÓN DEL LODO

La caracterización física de los residuos de las plantas de agua está dirigida principalmente a las corrientes de residuos sólido/líquidos con concentraciones diversas de sólidos en suspensión. Residuos sólido/líquidos son términos utilizados para describir líquidos fluyendo libremente que son, predominantemente, mezclas de aguas con sólidos principalmente y que se comporta como textura terrosa. Además, siempre referido a las propiedades físicas del lodo, es importante saber la concentración de sólidos en suspensión de la mezcla sólido/líquidos para sedimentar el estado sólido (AWWA, 2002).

La caracterización química de una planta sólido/líquidos de agua está principalmente relacionada con la determinación de las concentraciones de metales, metales lixiviables y minerales de nutrientes (AWWA, 2002), para el caso de estudio de este trabajo solo se medirá la concentración de aluminio.

Según (AWWA, 2002) la fuente de los metales puede ser el agua bruta así como el coagulante mismo. Los metales que se encuentran a menudo en lodos coagulantes incluyen alúmina, arsénico, ocasionalmente cadmio, cromo, cobre, hierro, plomo, manganeso, níquel y zinc.

La planta de tratamiento de Villa Santana, Tanque Las Margaritas, actualmente está generando lodos principalmente en la operación de vaciado y lavado de las

unidades de sedimentación, un porcentaje de (5% - 30%)³ en el retrolavado de los filtros (diario), vaciado y lavado de desarenadores y unidades de floculación, cabe aclarar que los lodos generados en los desarenadores comparados con los de los sedimentadores no son muy significativos pues en esta unidad no se agrega ningún tipo de compuesto químico (Coagulante o ayudante de coagulación).

Basados entonces en que las unidades de sedimentación, en el caso de que se aplique sulfato de aluminio ((SO₄)₃Al₂) como coagulante, son las mayores generadoras de lodos residuales (AWWA, 2006) se realizó la caracterización de los lodos en el sedimentador 1 que tiene una frecuencia de vaciado y lavado bimensual, se analizaron los siguientes parámetros: demanda biológica de oxígeno (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), sólidos disueltos (SD), temperatura T°, potencial de hidrogeno (pH), Coliformes Totales y Coliformes Fecales.

Como se menciono anteriormente, se realizó el muestreo de los lodos para cada uno de las operaciones de vaciado y lavado del sedimentador. En el cuadro 9.1, se presentan los resultados de la caracterización de los lodos, en los cuales obtuvieron los valores para los parámetros antes mencionados

Cuadro 9.1. Caracterización de los lodos

PARÁMETRO	UNIDAD	VACIADO SEDIMENTADOR 1	LAVADO SEDIMENTADOR 1
DQO	(mg O ₂ / L)	6371	8413
DBO ₅	(mg O ₂ / L)	415	535
SST	(mg / L)	35390	48580
SD	(mg / L)	< 2.01	2970
pH	Unidades de pH	6.4	6.2

³ Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico. RAS 2000. Título C.

Coliformes totales	UFC	-	89×10^8
Coliformes fecales	UFC	-	2×10^8
T° Agua	°C	18.4	18,6
T° Ambiente	°C	20.2	20.5

Fuente: Autores.

Los valores que se obtiene de DQO al comparar con la DBO₅ siempre serán mas altos. Lo cual nos representa la resistencia a la degradación biológica de los materiales orgánicos presentes en el agua residual.

Algunas Investigaciones realizadas en la región con relación al manejo de lodos en plantas de potabilización de agua se presentan en el cuadro 9.2, es importante tener en cuenta que las características del lodo varían de acuerdo a diferentes factores antes mencionados.

Cuadro 9.2. Caracterización de lodos realizada en plantas de tratamiento

PARÁMETRO	UNIDAD	VACIADO SEDIMENTADOR 1 PLANTA VILLA SANTANA	LAVADO SEDIMENTADOR 1 PLANTA VILLA SANTANA	PLANTA SUPIA ¹	PLANTA CARTAGO ²
DQO	(mg O ₂ / L)	6371	8413	8400 - 28000	7000 - 45000
DBO₅	(mg O ₂ / L)	415	535	150 – 450	50 – 800
SST	(mg / L)	35390	48580	90000 - 128500	80000 - 180000
SD	(mg / L)	< 2.01	2970	-	-
pH	Unidades de pH	6.4	6.2	6.8 - 7	5.8 – 6.9
Coliformes totales	UFC	-	89×10^8	-	-
Coliformes fecales	UFC	-	2×10^8	-	-
T° Agua	°C	18.4	18,6	20 - 22	
T° Ambiente	°C	20.2	20.5	-	-

¹ Adaptado de (CAMPEÓN, A. y JARAMILLO, L. 2004).

² Adaptado de (RAMÍREZ, G. 2003).

Los parámetros analizados del lodo procedente de la operación de lavado presentan valores superiores a los obtenidos durante el vaciado del sedimentador 1, esto se puede presentar debido a que una vez se culmina la operación de vaciado queda en el fondo del sedimentador una capa de lodo decantado de mayor concentración en sólidos y la cual se elimina durante el lavado.

9.2 VOLUMEN DE LODOS GENERADOS EN LA PLANTA

Una de las tareas más difíciles que encara la instalación o ingeniería en la planificación y diseño del proceso de tratamiento de residuos es determinar la cantidad de materia (volumen y sólidos) a tratar. La cantidad de lodos de alúmina (o hierro) generados pueden calcularse fácilmente y cerrarse al considerar la reacción de la alúmina en el proceso de coagulación. Cuando la alúmina se añade al agua como sulfato de alúmina, la reacción con respecto a la producción de lodos esta típicamente representada en la ecuación simplificada que incluyen tres aguas de hidratación en el producto (Citado por AWWA, 2002).

La adición de sulfato de aluminio en el agua se encuentra representada en la siguiente ecuación:



Las tres aguas de hidratación satisfacen el enlace covalente de 6 para la alúmina. No incluyendo las aguas de hidratación en la reacción se tendera a sobreestimar la cantidad de sólidos que se producen. Este enlace químico del agua aumenta la cantidad de lodos, incrementa el volumen de lodos y también hace más difícil la reparación del agua porque el agua químicamente enlazada no puede retenerse

por medios mecánicos. La alúmina comercial tiene un peso molecular de 594 y contiene 2 moles de alúmina, cada uno con un peso molecular de 27. Además, el aluminio es aproximadamente 9,1% de alúmina (54/594). La especie resultante de hidróxido aluminico ($\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) tiene un peso molecular de 132, y además, un mg/L de alúmina producirá 4,89 mg de sólidos (132/27), o un mg/L añadido al agua de alúmina producirá aproximadamente 0,44 mg/L de sólidos aluminicos inorgánicos ($0,091 \cdot 4,89$) (AWWA, 2002).

La cantidad de lodos que se pueden producir en una planta donde se realice la coagulación a través de la dosificación de sulfato de aluminio se puede calcular por medio de la siguiente fórmula:

$$S = 86.4 Q (0.44\text{Al} + \text{SS} + \text{A})$$

Donde:

S = lodo producido Kg/día

Q = caudal de la planta m^3/seg

Al = dosis de aluminio seco mg/L (con 17.1% de Al_2O_3)

SS = sólidos Suspendidos del agua cruda mg/L

A = otros aditivos (mg/L) añadidos como polímeros, arcilla o carbón activado en polvo.

La cantidad de sólidos que se generan en la planta de tratamiento Villa Santana se calcularon de la siguiente manera:

Q = 0,320 m^3/seg

Al = 7,02 mg/L (con 17.1% de Al_2O_3)

SS = 5,6 mg/L (Promedio mes de invierno, Octubre 2008)

A = 9,35 (mg/L)

$$S = 86,4 * 0,320((0,44 * 7,02) + 5,6 + 9,35)$$

$$S = 498,737 \text{ Kg/día}$$

Densidad del lodo: 1040 Kg/m³ (90% de humedad)

Volumen del lodo: 4,32 m³/día

9.3 CARACTERIZACIÓN DE LA FUENTE RECEPTORA

La caracterización de la fuente receptora, en este caso la Quebrada el Calvario, se realizó con el fin de conocer las condiciones en las cuales se encuentra antes y después de la descarga de los lodos residuales.

Cuadro 9.3. Caracterización de la quebrada el Calvario

PARÁMETRO	UNIDAD	PUNTO DE CONTROL ¹	VACIADO SEDIMENTADOR ²	LAVADO SEDIMENTADOR ²
DQO	(mg O ₂ / L)	< 2	1634	1477
DBO ₅	(mg O ₂ / L)	< 2	80	106
SST	(mg / L)	27	8010	392
SD	(mg / L)	96	762	9548
pH		6.97	6.7	6.64
T° Agua	°C	20.2	19.2	19.9
T° Ambiente	°C	29.9	34.6	31.1

¹ Muestra tomada 40 metros aguas arriba de la descarga de la planta a la quebrada.

² Muestra tomada 50 metros aguas abajo de la descarga de la planta a la quebrada.

Según los resultados expuestos en el cuadro anterior, la quebrada el Calvario se encuentra en buenas condiciones en el punto de control, caso contrario cuando se realiza la descarga de los lodos residuales en el cual aumenta la DQO y DBQ₅, así mismo, los sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos disueltos (SD) se incrementan considerablemente.

De acuerdo con esto, el tratamiento de los lodos residuales puede favorecer la disminución del impacto ambiental que se pueda generar en la fuente receptora. La información relacionada con la quebrada el Calvario se limita a las caracterizaciones que se presentan en el cuadro 9.4, las cuales fueron tomadas en la desembocadura de esta fuente al río Otún.

Cuadro 9.4. Caracterizaciones realizadas a la quebrada el Calvario

PARÁMETROS	UNIDADES	MUESTREO 1996 ¹	MUESTREO 2008 ²
CAUDAL	L/s	-	147
TEMPERATURA DEL AGUA	°C	16,5	19,6
TEMPERATURA AMBIENTE	°C	19,5	22,4
TURBIEDAD	N.T.U.	29,5	35
pH	Unidades de pH	7,35	7,87
Sólidos totales	mg/L	198,5	236
Sólidos Suspendidos totales	mg/L	74,5	71,4
D.Q.O.	mg/L de O ₂	38	54
DBO ₅	mg/L de O ₂	3,7	22,9
Oxígeno disuelto	mg/L de O ₂	7,43	7,91
Coliformes Totales	NMP/100 mL	33600	2200000
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	26650	500000

Fuente: ¹ Monitoreo limnológico del río Otún, quebrada el Calvario. 1997.

² Laboratorio de análisis de agua, Carder. 2008.

9.4 ANÁLISIS DE LAS CURVAS MEDIAS DE TURBIEDAD Y DOSIFICACIÓN DEL COAGULANTE

Variaciones de turbiedad

Una vez aplicado la metodología de evaluación para los datos de turbiedad, se obtuvieron curvas medias que evidencian las variaciones que presenta este parámetro en cada año de estudio (Figura 9.1.).

Debido a que la planta de tratamiento Villa Santana, inicio las actividades de potabilización a finales del Mayo de 2006, se hizo necesario procesar los datos de turbiedad y dosificación de coagulante a partir de Junio del mismo año hasta Mayo de 2008, con un total de 2 años para la evaluación de los datos.

Fue necesario procesar los datos de esta manera debido a que se requiere 2 años o más para el análisis, logrando así, evidenciar las variaciones que sufren estos parámetros e identificando la relación que existe entre ellos, es decir, si presentan alguna similitud entre años o periodos de tiempo.

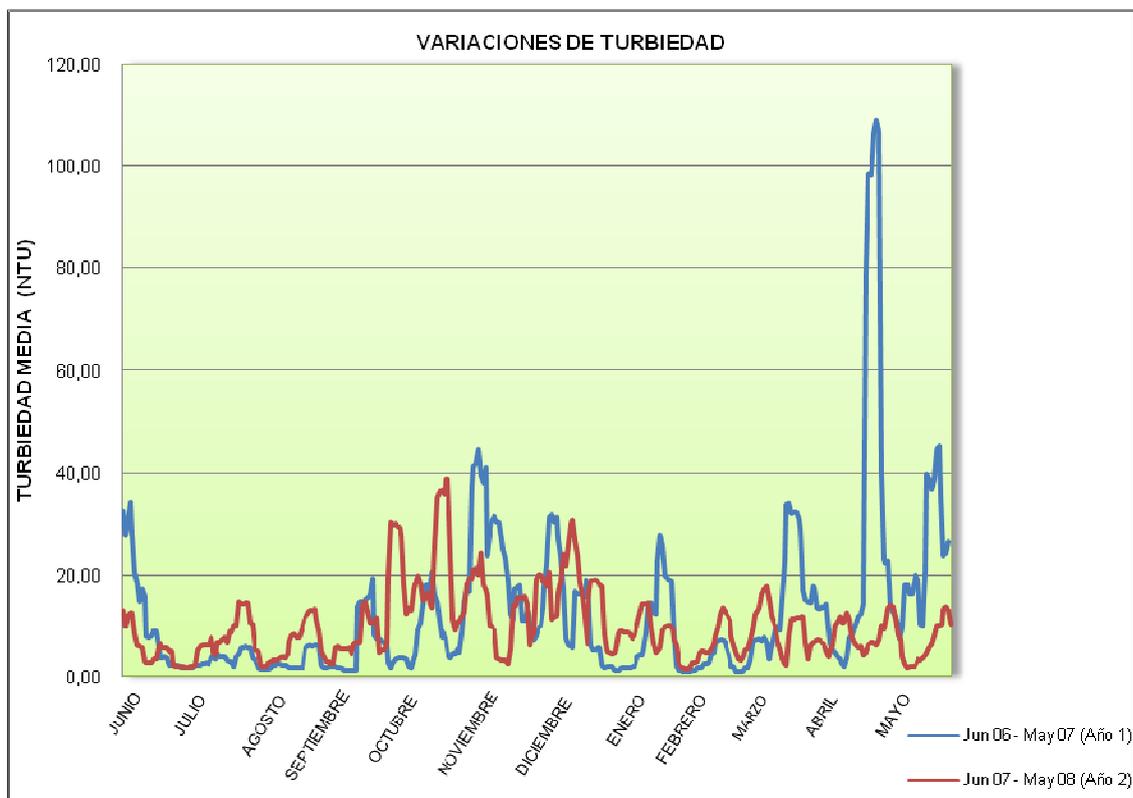


Figura 9.1. Variaciones de turbiedad utilizando el método de media móvil simple

Fuente: Autores

Como se puede apreciar en la Figura 9.1, las curvas medias de turbiedad varían de acuerdo a las fluctuaciones de este parámetro, evidenciando cierto grado de similitud con base en los periodos climáticos acontecidos en estos dos (2) años.

Haciendo un análisis del comportamiento de las figuras, se puede relacionar los picos más altos con los periodos de invierno, de igual manera, relacionar los periodos de verano con los valles que se forman en la figura.

Tanto en la figura del año 1 (Junio 2006 – Mayo 2007) como la del año 2 (Junio 2007 – Mayo 2008), se puede apreciar que la turbiedad comienza con una

variación elevada en Junio, la cual disminuye en el transcurso del mes hasta principios de Julio, indicando que existe un periodo de invierno es estos meses.

A partir de Julio y hasta los primeros días de septiembre, se observa como la figura tiene un comportamiento en forma de valle, en la cual la turbiedad presenta unas fluctuaciones bajas. Este periodo de tiempo se encuentra asociado a la época de verano con una turbiedad media entre 2.11 NTU y 14.79 NTU.

Existe otro periodo de verano que está ubicado desde los primeros días de Enero hasta finales del Marzo. Este presenta unas variaciones de turbiedad que van desde 1.38 NTU hasta 55.55 NTU. En el mes de Abril de 2007 se presentó una turbiedad de 482.09 en el promedio diario, pero de acuerdo a los informes de calidad reportados por la planta, ingreso agua a la planta con turbiedades de hasta 5261 NTU, esto sucedió debido a problemas de deslizamientos presentados en el río Otún, no asociado este incremento directamente a la precipitación y por lo cual fue necesario para las actividades de potabilización en la planta.

El periodo de invierno para los dos años de estudio, comprende desde los primeros días de Septiembre y se prolonga hasta finales del mes de diciembre, con turbiedades promedio entre 3.63 NTU y 45 NTU.

Debido a que las figuras comienzan a partir del mes de Junio y llegan hasta Mayo, se presenta dificultad para identificar el segundo periodo de invierno. Este periodo se encuentra ubicado desde finales de Marzo hasta los últimos días de Junio y presenta turbiedades que oscilan entre 1.26 NTU y 137.29 NTU.

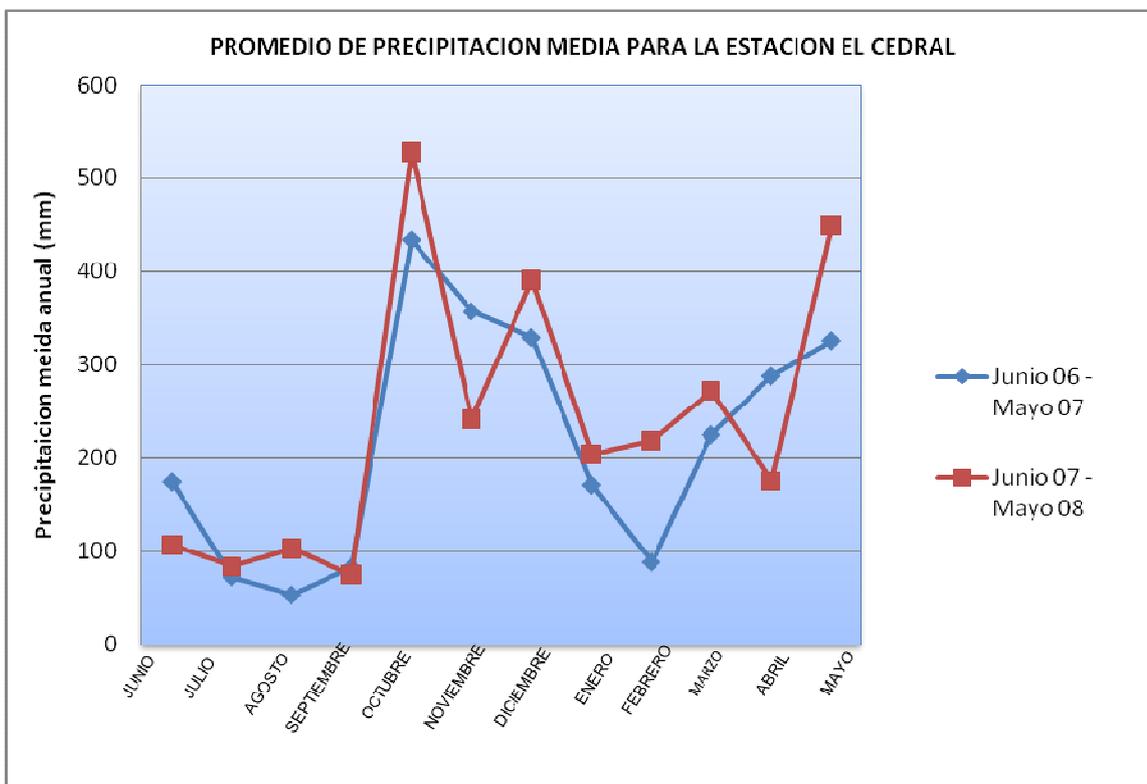


Figura 9.2. Promedio de precipitación anual reportados para la estación el Cedral

Fuente: Autores.

En la figura 9.2 se puede observar el comportamiento de la precipitación media anual para la estación el Cedral, ubicada en la cuenca media del río Otún. Relacionando esta figura con la turbiedad media en los años de estudio, se puede observar un comportamiento similar, como es el caso de los picos más altos ubicados entre los meses de septiembre y diciembre, los cuales corresponden a los meses de invierno.

Los valores altos de turbiedad se pueden presentar no solo en los periodos de invierno, como es común, sino también en periodos de verano a causa de lluvias intempestivas que puedan ocurrir en la cuenca del río Otún. En el cuadro 9.5 se

puede apreciar los valores históricos de turbiedad, identificando los máximos y mínimos en cada mes.

Cuadro 9.5. Turbiedades máximas y mínimas reportadas en la Planta Villa Santana

MES	TURBIEDAD	AÑO 1 (Junio 2006 – Mayo 2007)	AÑOS 2 (Junio 2007 – Mayo 2008)
Junio	Máxima	56,29	30,39
	Mínima	1,91	1,88
Julio	Máxima	15,63	38,13
	Mínima	1,84	1,84
Agosto	Máxima	28,83	31,11
	Mínima	1,63	1,74
Septiembre	Máxima	86,99	53,00
	Mínima	1,30	1,57
Octubre	Máxima	38,20	98,23
	Mínima	1,49	1,57
Noviembre	Máxima	147,63	61,52
	Mínima	2,81	1,78
Diciembre	Máxima	81,78	77,22
	Mínima	1,71	2,21
Enero	Máxima	74,91	36,01
	Mínima	1,38	1,71
Febrero	Máxima	15,71	22,92
	Mínima	1,23	1,43
Marzo	Máxima	55,55	40,77
	Mínima	1,26	1,52
Abril	Máxima	482,09	27,87
	Mínima	1,41	1,71

Mayo	Máxima	137,99	30,10
	Mínima	2,71	1,62

Fuente: Planta de tratamiento Villa Santana. Parámetros históricos del agua cruda.

Variaciones en la dosificación de coagulante

De igual manera que se evaluaron los datos históricos de turbiedad utilizando la metodología de media móvil simple, se evaluaron los datos de dosificación de coagulante.

Como resultado de esto, se obtuvieron las figuras 9.3 y 9.4 en la cual se aprecia la relación que existe entre la dosificación de coagulante y la turbiedad del agua cruda que ingresa en la planta.

El comportamiento de la dosificación de coagulante en la figura 9.3, entre julio y octubre no se asemeja a la turbiedad, eso se puede deber a que la planta inicio las actividades de tratamiento utilizando sulfato de aluminio granulado y liquido al mismo tiempo, por esta razón, se hizo difícil correlacionar estos valores debido a la diferencia de concentración al momento de realizar la dosificación.

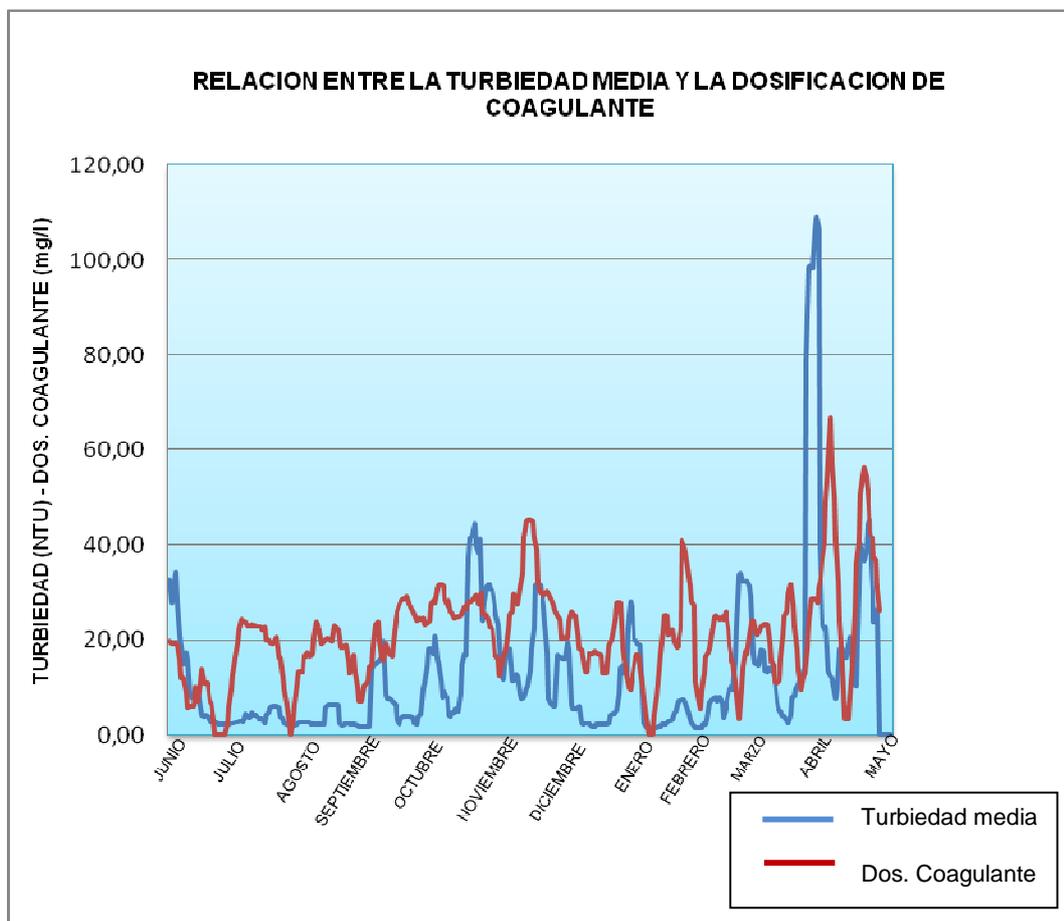


Figura 9.3 Relación Turbiedad media – dosificación de coagulante para el año 2 (Junio 2007 – Mayo 2008)

Fuente: Autores.

En la figura 9.4, el comportamiento de la dosificación de coagulante fue más similar con relación a la turbiedad, con lo cual se corrobora que la generación de los lodos en sistemas de potabilización de agua depende de las condiciones climatológicas, las características de la cuenca, el sistema de tratamiento y la dosificación de coagulante, entre otros factores.

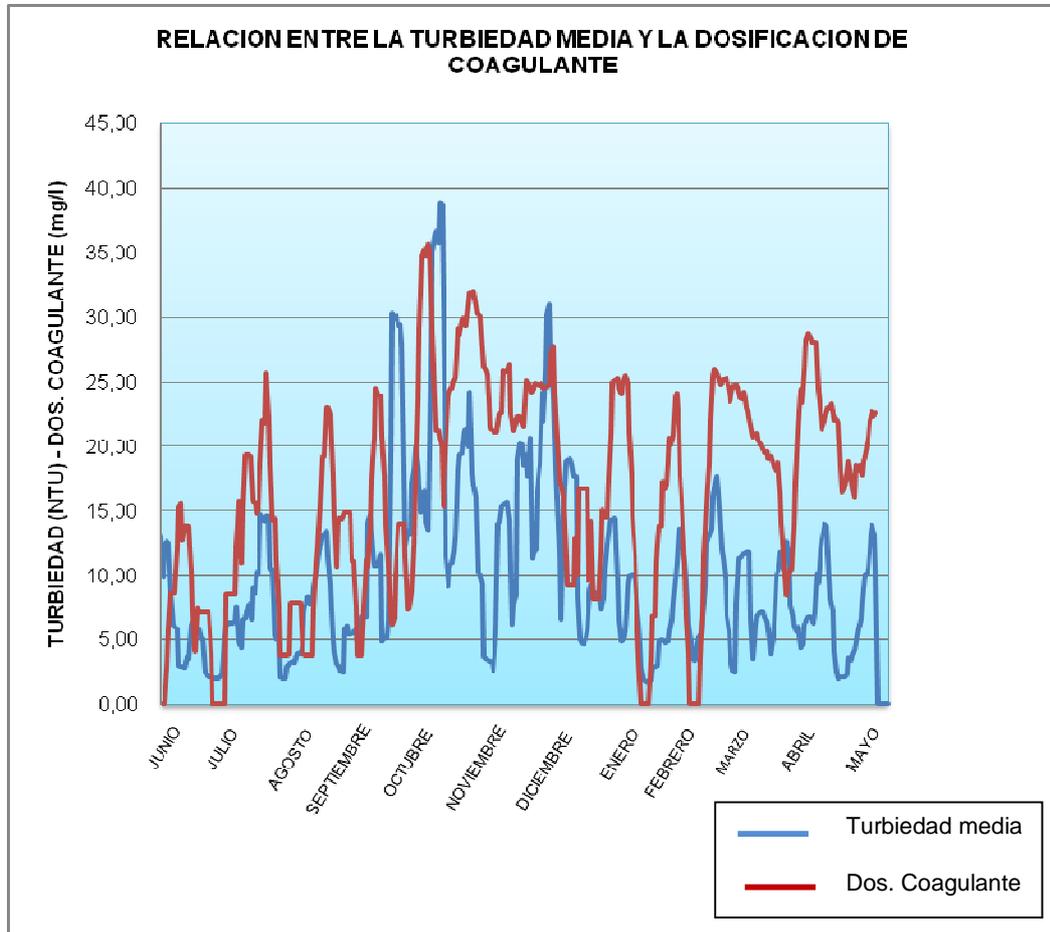


Figura 9.4. Relación Turbiedad media – dosificación de coagulante para el año 2 (Junio 2007 – Mayo 2008)
 Fuente: Autores.

9.5 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE SELECCIÓN PARA LAS ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PROPUESTAS

Se dio una calificación a cada aspecto de acuerdo al criterio del diseñador y a la bibliografía consultada, esta calificación se puede analizar en el cuadro 9.6.

Cuadro 9.6. Criterios de calificación

CALIFICACIÓN	
Alto	5
Medio	3
Bajo	1
No aplica	0

Además de esta calificación, la aplicabilidad de cada alternativa está sujeta a la implementación a nivel no solo local sino nacional, al aspecto económico, ambiental y técnico con que cuente la planta de tratamiento y a los recursos que a futuro se requieran para dicha implementación, se dará un valor como se muestra en el cuadro 9.7.

Cuadro 9.7. Criterios de afectación

CALIFICACIÓN
Más (+) = Afectación Positiva
Menos (-) = Afectación Negativa

De acuerdo a lo anterior, una alternativa podrá obtener un porcentaje mayor de aplicación pero se tendrán en cuenta a la hora de elegir la mejor, el mayor número de aspectos positivos pues se acomodan a las condiciones actuales y a futuro de la planta de tratamiento.

Cuadro 9.8. Calificación de los procesos de tratamiento

FACTOR EVALUADO	COMENTARIO	CALIFICACIÓN	CALIFICACIÓN	CALIFICACIÓN	CALIFICACIÓN
		Centrifugación	Filtros de Banda	Lechos de Secado	Filtros Prensa
Aplicabilidad del proceso	<p>Estas alternativas fueron evaluadas teniendo en cuenta la aplicabilidad a nivel nacional. Los lechos de secado son muchos más viables tanto económica como técnicamente que las centrifugas, filtros de banda y filtros prensa, pues estas son alternativas más eficientes pero el costo de operación y mantenimiento es muy elevados y más para un país en vía de desarrollo, donde la destinación de los recursos es muy limitada.</p> <p>La aplicabilidad de alguna de estas tecnologías, queda a consideración dependiendo de la calidad del lodo que se quiere obtener y en cuanto tiempo.</p>	3	3	(+) 5	3
Calidad del lodo obtenido	Las calificaciones se dieron teniendo en cuenta los porcentajes de humedad contenida en el lodo resultante en cada proceso.	3	1	3	(+) 5
Generación del	El lodo dependerá no solo de los porcentajes de humedad, sino de las condiciones	5	5	3	5

producto con valor agregado o reutilización	físico-químicas de este y del valor agregado que se le dé por los gastos en cada uno de los diferentes procesos. De igual forma, la generación se verá afectada en términos de cantidad o producción por el tiempo transcurrido, ya que cada alternativa maneja un periodo para el acondicionamiento y tratamiento del lodo diferente.				
Vida útil	Se calificó en base a que una máquina podría tener menos probabilidades de duración que una obra civil en términos de funcionamiento del sistema, en este caso un lecho de secado comparado con filtro prensa podría tener un tiempo de operación más largo.	3	3	(+) 5	3
Requerimiento de área	Cada alternativa requiere de un espacio diferente pero algunas demandan de un área bastante extensa, lo que impide que algunas plantas puedan implementar una alternativa más económica puesto que el espacio disponible no está acorde con los dimensionamientos del sistema.	1	1	(-) 5	1
Costos de inversión	Para evaluar este factor se hizo principal énfasis en que algunas alternativas, en el caso del lecho de secado necesitan de una inversión un poco alta, pero a larga estas se verá representada en bajos costos de operación y mantenimiento, caso contrario ocurre con las otras alternativas, las cuales no son muy utilizadas en países en vía de desarrollo pues sus costos de inversión son bastante altos debido a que son tecnologías donde hay que importar algunos equipos, capacitar al operario y sus costos de operación y mantenimiento son muy elevados; caso contrario para un país desarrollado.	(-) 5	(-) 5	3	(-) 5
Costos de operación y mantenimiento	Como se indico en el factor de evaluación anterior los costos de operación y mantenimiento están ligados a la tecnología seleccionada.	(-) 5	(-) 5	(+) 3	(-) 5
Criterios de diseño	Se estableció un valor dependiendo del sistema y los estudios previos para la ejecución de esta alternativa. Presentando un valor alto negativo los lechos de secado por los estudios y requerimiento de datos para el diseño de estos.	(+) 1	(+) 1	(-) 5	(+) 1
Experiencia del contratista	Cada alternativa requiere cierto grado de experiencia por parte del diseñador. Se consideraron los lechos de secado con una calificación alta y negativa, ya que se requiere un amplio conocimiento en el tema y un cierto nivel de experiencia.	3	3	(-) 5	3
Tecnología	Se tuvo en cuenta la experiencia a nivel local y nacional, pues muchas de estas	(-)	(-)	(+)	(-)

ampliamente aprobada	son aplicadas a nivel mundial pero en países desarrollados, siendo los lechos de secado la más aplicada en países en vía de desarrollo.	1	1	5	1
Complejidad en la construcción y equipamiento	Se le dio un valor a cada alternativa dependiendo del tipo de obra civil y la maquinaria necesaria para el funcionamiento de esta. Las alternativas de centrifugación, filtros de banda y filtros prensa, se les dio una calificación de cinco (5) con signo negativo (-) ya que requieren de equipos con precios bastante elevados.	(-) 5	(-) 5	(+) 1	(-) 5
Flexibilidad de la operación	De acuerdo a las características con que llega el agua cruda a la planta de tratamiento de agua potable, la operación de cada una de las alternativas deberá garantizar su funcionamiento a condiciones pico de carga de sólidos. Se deberá considerar si el proceso es capaz de soportar variaciones en el caudal y los sólidos presentes en el agua, es allí donde se le da un valor más bajo a los lechos de secado pues estos dependen directamente de las condiciones climatológicas de la zona.	3	3	(-) 1	3
Confiabilidad del proceso	En sí, los filtros prensa garantizan un lodos con unas condiciones finales muy buenas, lo mismo que las centrifugas y filtros banda, pero cabe tener en cuenta que si no se garantizan recursos a futuro para operación y mantenimiento, los lechos de secado son la alternativa más viable.	(+) 5	(+) 5	3	(+) 5
Complejidad en la operación del proceso	Este factor se califico partiendo de la idea que si un proceso está más instrumentado que otro, requiere de bastantes equipos para su funcionamiento, por ende es necesario un personal más calificado. Los lechos de secado comparados con las otras alternativas presentan la desventaja de que el área requerida podría ser muy extensa, pero no se hace necesario la implantación de equipos complejos para su funcionamiento ni requiere de un personal con un alto nivel técnico.	(-) 5	(-) 5	(+) 1	(-) 5
Requerimiento de	Se le dio un valor a cada alternativa dependiendo del nivel profesional requerido de	3	3	1	3

personal	acuerdo a la capacidad a tratar de la planta de tratamiento y de la futura implementación de una alternativa para el manejo de los lodos generados.				
Disponibilidad de repuestos	Este factor se evaluó dependiendo de las capacidades comerciales locales y nacionales para acceder al tipo de repuesto que requiere cada alternativa en sus etapas de operación y mantenimiento, siendo los lechos de secado la que menor calificación recibió pues no requiere de mucha maquinaria.	3	3	0	3
Influencia de la temperatura	Los lechos de secado es la única alternativa que por su forma de operar se ve más influenciada por la temperatura de la zona.	0	0	(-) 5	0
Producción de ruido	Se califico teniendo en cuenta, que si el proceso trabaja con una maquinaria, una mala sincronización del la misma podría producir algún tipo de ruido que perturbe al personal que allí labora o a las comunidades cercanas, es por esto que las centrífugas, filtros de banda y filtros prensa recibieron las calificaciones más altas negativas por su posible producción de ruido, mientras que los lechos de secado pues no producen ruido.	(-) 5	(-) 5	0	(-) 5
Contaminación visual	Por ser los lechos de secado la alternativa que mayor área podría tener y si se le asocia un mal manejo de su infraestructura y de las zonas que la rodean, se generaría un efecto negativo en cuanto al paisaje que circunda a la planta de tratamiento.	(+) 1	(+) 1	(-) 3	(+) 1
Generación de malos olores	Los lechos de secado por estar expuestos al ambiente y por el contenido de materia orgánica en los lodos podrían en la deshidratación de esto generar algún tipo de olor que perturbe a los operarios de la planta y la comunidad del sector.	0	0	(-) 3	0
Generación de vectores	Por la humedad de los lodos en los lechos de secado sería posible la presencia de algunos insectos.	0	0	1	0
Generación de residuos	Se asocia a los repuestos, fluidos y aceites u otro tipo de materiales necesarios para la operación y mantenimiento de los equipos requeridos en cada una de las alternativas. A los lechos de secado se les asigno una calificación más baja pues no generan tantos residuos comparados con otras alternativas.	3	3	0	3

9.5.1 Aplicación de la matriz de decisión

Con base en los valores establecidos en el cuadro 9.8, se aplicó la matriz de decisión para las alternativas de tratamiento, obteniéndose los resultados que se observan en los siguientes cuadros.

Cuadro 9.9. Matriz de decisión para la evaluación de lechos de secado

#	%	ASPECTO EVALUADO	Calificación 0 = No aplica 1 = Bajo 3 = Medio 5 = Alto	SIGNO +/-	C/5	%*A
1	5	APLICABILIDAD DEL PROCESO	5	+	1	5
2	15	CALIDAD DEL LODO OBTENIDO	3		0,6	9
3	5	GENERACIÓN DEL PRODUCTO CON VALOR AGREGADO O REUTILIZACIÓN	3		0,6	3
4	10	VIDA ÚTIL	5	+	1	10
5	10	REQUERIMIENTO DE ÁREA	5	-	1	10
6	20	COSTO				
6.1		Inversión inicial	3		0,6	6
6.2		Operación y mantenimiento	3	+	0,6	6
6.3		TOTAL COSTO				12
7	10	INSUMOS				
7.1		Requerimiento de reactivos	0	+	0	0
7.2		Requerimiento energéticos	0	+	0	0
7.3		TOTAL INSUMOS				0
8	5	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN				
8.1		Criterios de diseño	5	-	1	1,25
8.2		Experiencia del contratista	5	-	1	1,25
8.3		Tecnología ampliamente aprobada	5	+	1	1,25
8.4		Complejidad en la construcción y equipamiento	1	+	0,2	0,25
8.5		TOTAL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN				4
9	15	OPERACIÓN				
9.1		Flexibilidad de la operación	1	-	0,2	0,6

9.2		Confiabilidad del proceso	3		0,6	1,8
9.3		Complejidad de operación del proceso	1	+	0,2	0,6
9.4		Requerimiento de personal	3		0,6	1,8
9.5		Disponibilidad de repuestos	0	+	0	0
9.6		TOTAL OPERACIÓN				4,8
10	5	ASPECTOS AMBIENTALES				
10.1		Influencia de la temperatura	5	-	1	0,83
10.2		Producción de ruido	0	+	0	0,00
10.3		Contaminación visual	3	-	0,6	0,50
10.4		Producción de malos olores	0		0	0,00
10.5		Generación de vectores	1		0,2	0,17
10.8		Generación de residuos	0	+	0	0,00
10.9		TOTAL ASPECTOS AMBIENTALES				1,500
11	100	TOTAL				59,300

Cuadro 9.10. Matriz de decisión para la evaluación de filtros prensa

#	%	ASPECTO EVALUADO	Calificación 0 = No aplica 1 = Bajo 3 = Medio 5 = Alto	SIGNO +/-	C/5	%*A
1	5	APLICABILIDAD DEL PROCESO	3		0,6	3
2	15	CALIDAD DEL LODO OBTENIDO	5	+	1	15
3	5	GENERACIÓN DEL PRODUCTO CON VALOR AGREGADO O REUTILIZACIÓN	5		1	5
4	10	VIDA ÚTIL	3		0,6	6
5	10	REQUERIMIENTO DE ÁREA	1	+	0,2	2
6	20	COSTO				
6.1		Inversión inicial	5	-	1	10
6.2		Operación y mantenimiento	5	-	1	10
6.3		TOTAL COSTO				20
7	10	INSUMOS				
7.1		Requerimiento de reactivos	3		0,6	3
7.2		Requerimiento energéticos	5	-	1	5
7.3		TOTAL INSUMOS				8

8	5	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN				
8.1		Criterios de diseño	1	+	0,2	0,25
8.2		Experiencia del contratista	3		0,6	0,75
8.3		Tecnología ampliamente aprobada	1	-	0,2	0,25
8.4		Complejidad en la construcción y equipamiento	5	-	1	1,25
8.5		TOTAL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN				2,5
9	15	OPERACIÓN				
9.1		Flexibilidad de la operación	3		0,6	1,8
9.2		Confiabilidad del proceso	5	+	1	3
9.3		Complejidad de operación del proceso	5	-	1	3
9.4		Requerimiento de personal	3		0,6	1,8
9.5		Disponibilidad de repuestos	3	-	0,6	1,8
9.6		TOTAL OPERACIÓN				11,4
10	5	ASPECTOS AMBIENTALES				
10.1		Influencia de la temperatura	0	+	0	0,00
10.2		Producción de ruido	5	-	1	0,83
10.3		Contaminación visual	1	+	0,2	0,17
10.4		Producción de malos olores	0		0	0,00
10.5		Generación de vectores	0		0	0,00
10.8		Generación de residuos	3		0,6	0,50
10.9		TOTAL ASPECTOS AMBIENTALES				1,500
11	100	TOTAL				74,400

Cuadro 9.11. Matriz de decisión para la evaluación de centrifugas

#	%	ASPECTO EVALUADO	Calificación 0 = No aplica 1 = Bajo 3 = Medio 5 = Alto	SIGNO +/-	C/5	%*A
1	5	APLICABILIDAD DEL PROCESO	3		0,6	3
2	15	CALIDAD DEL LODO OBTENIDO	3		0,6	9
3	5	GENERACIÓN DEL PRODUCTO CON VALOR AGREGADO O REUTILIZACIÓN	5		1	5
4	10	VIDA ÚTIL	3		0,6	6
5	10	REQUERIMIENTO DE ÁREA	1	+	0,2	2
6	20	COSTO				
6.1		Inversión inicial	5	-	1	10
6.2		Operación y mantenimiento	5	-	1	10
6.3		TOTAL COSTO				20
7	10	INSUMOS				
7.1		Requerimiento de reactivos	3		0,6	3
7.2		Requerimiento energéticos	5	-	1	5
7.3		TOTAL INSUMOS				8
8	5	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN				
8.1		Criterios de diseño	1	+	0,2	0,25
8.2		Experiencia del contratista	3		0,6	0,75
8.3		Tecnología ampliamente aprobada	1	-	0,2	0,25
8.4		Complejidad en la construcción y equipamiento	5	-	1	1,25
8.5		TOTAL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN				2,5
9	15	OPERACIÓN				
9.1		Flexibilidad de la operación	3		0,6	1,8
9.2		Confiabledad del proceso	5	+	1	3
9.3		Complejidad de operación del proceso	5	-	1	3
9.4		Requerimiento de personal	3		0,6	1,8
9.5		Disponibilidad de repuestos	3		0,6	1,8
9.6		TOTAL OPERACIÓN				11,4
10	5	ASPECTOS AMBIENTALES				
10.1		Influencia de la temperatura	0	+	0	0,00

10.2		Producción de ruido	5	-	1	0,83
10.3		Contaminación visual	1	+	0,2	0,17
10.4		Producción de malos olores	0		0	0,00
10.5		Generación de vectores	0		0	0,00
10.8		Generación de residuos	3		0,6	0,50
10.9		TOTAL ASPECTOS AMBIENTALES				1,500
11	100	TOTAL				68,400

Cuadro 9.12. Matriz de decisión para la evaluación para filtros banda

#	%	ASPECTO EVALUADO	Calificación 0 = No aplica 1 = Bajo 3 = Medio 5 = Alto	SIGNO +/-	C/5	%*A
1	5	APLICABILIDAD DEL PROCESO	3		0,6	3
2	15	CALIDAD DEL LODO OBTENIDO	1		0,2	3
3	5	GENERACIÓN DEL PRODUCTO CON VALOR AGREGADO O REUTILIZACIÓN	5		1	5
4	10	VIDA ÚTIL	3		0,6	6
5	10	REQUERIMIENTO DE ÁREA	1	+	0,2	2
6	20	COSTO				
6.1		Inversión inicial	5	-	1	10
6.2		Operación y mantenimiento	5	-	1	10
6.3		TOTAL COSTO				20
7	10	INSUMOS				
7.1		Requerimiento de reactivos	3		0,6	3
7.2		Requerimiento energéticos	5	-	1	5
7.3		TOTAL INSUMOS				8
8	5	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN				
8.1		Criterios de diseño	1	+	0,2	0,25
8.2		Experiencia del contratista	3		0,6	0,75
8.3		Tecnología ampliamente aprobada	1	-	0,2	0,25
8.4		Complejidad en la construcción y equipamiento	5	-	1	1,25
8.5		TOTAL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN				2,5
9	15	OPERACIÓN				
9.1		Flexibilidad de la operación	3		0,6	1,8

9.2		Confiabilidad del proceso	5	+	1	3
9.3		Complejidad de operación del proceso	5	-	1	3
9.4		Requerimiento de personal	3		0,6	1,8
9.5		Disponibilidad de repuestos	3		0,6	1,8
9.6		TOTAL OPERACIÓN				11,4
10	5	ASPECTOS AMBIENTALES				
10.1		Influencia de la temperatura	0	+	0	0,00
10.2		Producción de ruido	3	-	0,6	0,50
10.3		Contaminación visual	1	+	0,2	0,17
10.4		Producción de malos olores	0		0	0,00
10.5		Generación de vectores	0		0	0,00
10.8		Generación de residuos	3		0,6	0,50
10.9		TOTAL ASPECTOS AMBIENTALES				1,167
11	100	TOTAL				62,067

De acuerdo con los resultados obtenidos en las matrices de decisión, los filtros prensa obtuvieron la mayor calificación con base en los aspectos evaluados, sin embargo presenta más calificaciones negativas acompañado de las centrifugas y filtros de banda.

Por otra parte los lechos de secado obtuvieron la calificación más baja, pero presenta el mayor número de aspectos positivos, por dicha razón y de acuerdo a los criterios de aplicación en la metodología, esta sería la alternativa más viable para el tratamiento de lodos en la planta de tratamiento Villa Santana, pero esta decisión está sujeta a la extensión de terreno con que cuente la planta, de lo contrario, los filtros banda son la alternativa más viable.

9.6 PRUEBA PILOTO DE SEDIMENTACIÓN Y DESHIDRATACIÓN

Los lodos procedentes del acondicionamiento y posterior deshidratación, fueron enviados al laboratorio de análisis de aguas y alimentos de la Universidad Tecnológica de Pereira, donde se examinaron basados en procedimientos que se encuentran en el Standard methods for the examination of water and wastewater⁴, obteniéndose los resultados que se describen en el cuadro 9.13.

Cuadro 9.13. Caracterización del acondicionamiento de los lodos

Parámetro	Unidad	Muestra Sedimentador 1	Fase clarificada a las 48 horas	Fase concentrada a las 48 horas	Metodología
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg / L	32440	21	69420	Gravimétrico
Sólidos disueltos (SD)	mg / L	< 2.01	278	712	Gravimétrico
Sólidos totales (SV)	mg/l	-	-	18189	Gravimétrico
Cenizas	mg/l	-	-	51943	-
pH	unidades	6.29	6.75	6.12	pH - Metro
T° Agua	°C	18	22.2	23.3	pH - Metro
T° Ambiente	°C	31.3	28	28	Termómetro

Fuente: Autores

Como se aprecia en el cuadro 9.13 la concentración de SST en la fase concentrada se aumenta en un 113.99 % en comparación con la muestra del sedimentador 1, lo contrario ocurre con la fase clarificada que disminuye casi en 99.93 %, lo que indica que con 48 horas de sedimentación el lodo decantado está alcanzando unos valores muy altos de SST que sobrepasan los tomados al inicio

Standard methods for the examination of water and wastewater, American water works association. 20th edition, 1998.

de la prueba, en cuanto a los SD los valores aumentan abruptamente con respecto al vaciado para la fase clarificada y para la fase concentrada, esto indica los altos niveles de concentración de SD en la sedimentación de estos lodos aluminosos, en lo que al pH se refiere se observa un aumento en el sobrenadante y disminuye en el lodo decantado con respecto a los valores de la muestra inicial, luego de las 48 horas de sedimentación se obtuvieron 30.15 L de fase clarificada y 12.150 Kg de fase concentrada.

Los lodos luego de ser decantados por 48 horas como de describió anteriormente fueron vertidos a una unidad de vidrio para su posterior deshidratación, posteriormente fueron enviados al laboratorio de análisis químico de suelos y foliares de la Universidad Tecnológica de Pereira, quienes se basaron en la Guía para el servicio regional de análisis de suelos del Centro de investigaciones del café (CENICAFE), obteniéndose los resultados que se describen en el cuadro 9.14.

Cuadro 9.14. Caracterización del lodo deshidratado

Parámetro	Unidad	Lodo deshidratado (48 horas)	Metodología del análisis
Humedad	Porcentaje (%)	91.4	Granulometría
pH	unidad	5.8	Potenciométrico
Materia Orgánica	Porcentaje	9.3	Walkley - Black
T° Ambiente	°C	24	Termómetro
Sólidos suspendidos totales	mg/l	17574	Gravimétrico
Sólidos disueltos	mg/l	714	Gravimétrico
Sólidos volátiles	mg/l	13125	Gravimétrico
Aluminio	mg/l	202,74	Absorción atómica, llama oxido nitroso

Fuente: Autores

El Cuadro 9.14. muestra una humedad de 91.4 %, la cual es muy alta comparada con el estudio realizado por (HERNÁNDEZ, 2006) que reporto una humedad a las 48 horas 72. 69 %, esto podría estar influenciado porque durante el transcurso de la prueba se presentaron lluvias bastante fuertes que ameritaron el cubrimiento de los lodos con un plástico negro o por la humedad relativa de la zona de estudio la cual fue 72 %⁵.

Figura 9.5. Proceso de deshidratación de la muestra de lodo



⁵ Estación meteorológica Aeropuerto Matecaña. Octubre 2008

9.7 DIMENSIONAMIENTO DE LAS UNIDADES

A través de la metodología realizada durante el desarrollo del trabajo, donde se evaluaron las variaciones de turbiedad y en las cuales se identificaron los periodos de invierno y verano (asociados a mayor y menor generación de lodos), además, de la selección de una alternativa por medio de una matriz de decisión, se obtuvo que los lechos de secado son la alternativa más viable para el manejo de los residuos sólidos/líquidos que se producen en esta planta de tratamiento.

Con base en RAMÍREZ (2003), se realizó el dimensionamiento de este sistema utilizando la siguiente metodología:

- Sólidos producidos: 498,73 Kg/día
- Caudal promedio de la planta: 0,32 m³/s

Debido a que la planta está constituida por dos módulos de tratamiento, y cada uno se compone de dos unidades de sedimentación, se tiene que la cantidad de lodo producido por modulo es de 249,39 Kg/día.

Cuadro 9.15. Criterios de diseño para los lechos de secado

DATOS NECESARIOS		
Tasa evaporación ¹	mm	1270
Espesor del lodo aplicado D(i) ²	m	0,3
Contenido de sólidos iniciales DS(i) ³	%	5
Contenido de sólidos finales DS(f) ⁴	%	30
Cantidad de lodo por modulo	kg/día	249,39

¹ Ideam. [En línea] Disponible en la dirección URL: www.ideam.gov.co/atlas/mclima.htm

² RAS 2000, Título C, C.13.6.2.2 Tratamiento

³ RAS 2000, Título C, C.13.4 Descripción de los procesos

⁴ RAS 2000, Título C, C.13.3.3 Disposición final de lodos

Teniendo en cuenta que en la planta de tratamiento se realiza el vaciado y lavado de los dos sedimentadores de un modulo en promedio cada dos (2) meses, tiempo en el cual se puede obtener una buena calidad de lodo deshidratado por medio de los lechos de secado, pues así se puede someter este a un tiempo de deshidratación más largo.

Con base en la cantidad de lodos que se genera en cada modulo se realizo el dimensionamiento de los lechos de secado.

Calculo de carga inicial de lodos:

$$IA \text{ (kg/m}^2\text{)} = 10DS(i)D(i)$$

$$IA \text{ (kg/m}^2\text{)} = 15$$

Calculo de la profundidad final D(f):

$$D(f) = D(i)DS(i) / DS(f)$$

$$D(f) = 0,05 \text{ m}$$

Calculo del cambio en la profundidad, DD:

$$DD = D(i) - D(f)$$

$$DD = 0,25 \text{ m}$$

La cantidad de agua drenada, DD(u):

$$P = 40 - 50 \%$$

$$DD(u) = D(i) * P$$

$$DD(u) = 0,15$$

El cambio de espesor debido a la evaporación, DD(e):

$$DD(e) = D(i) - DD(u)$$

$$DD(e) = 0,15$$

El tiempo necesario para evaporar el resto del agua:

$$T = DD(e) / E$$

$$T = 150 \text{ mm} / 1270,2 \text{ mm/año} = 0,118 \text{ años (1,44 meses)}$$

El número de aplicaciones, AA, a cada lecho, que se puede lograr en un año:

$$AA = 12 / T$$

$$AA = 12 \text{ meses} / 1,44 \text{ meses} = 8,35$$

Rendimiento del lecho:

$$Y = IA * AA$$

$$Y = 15 \text{ Kg/m}^2 * 8,35$$

$$Y = 125,3 \text{ kg/m}^2$$

Área requerida para el lodo producido = 726,52 m²

Dimensionamiento de los lechos

- Se considera un ancho del lecho de: 10 m
- Con longitud de: 23 m
- El área de un lecho: 230 m²
- Número de lechos : 3 lechos
- Volumen de lodo en un lecho: 69 m³

Los lechos de secado estarán compuestos de una tubería perforada (tubería de percolación) que estará situada en el fondo del lecho, esta tendrá un diámetro de 4" y una inclinación de 1% con el fin de facilitar el drenaje del agua.

Así mismo, con base en PÉREZ (2002), el lecho se conformara por una capa de grava de 10 cm en el fondo con un tamaño de partículas entre 3/8 de pulgada y 3/4 de pulgada, seguido por otra capa de grava de 10 cm, con tamaño de partículas entre 1/8 de pulgada y 3/8 de pulgada, finalmente el lecho contara con una capa de arena de 25 cm y con un tamaño de partículas entre tamiz No. 00 y No. 04.

La capa de lodo que se deposita en el lecho de secado tendrá un espesor de 30 cm, por tal motivo el lecho tendrá una profundidad de 1 m con lo cual se garantiza un borde libre de 25 cm.

10. CONCLUSIONES

- Las variaciones de turbiedad del agua cruda que entra a la planta se ve influenciada significativamente por los periodos climáticos, con lo cual se puede establecer la estrecha relación que existe con la generación de lodos.
- La mayor generación de lodos aluminosos en la planta de tratamiento Villa Santana se da principalmente en los sedimentadores.
- Los lodos aluminosos producidos en la planta de tratamiento de agua potable, al ser vertidos a la quebrada el Calvario influyen en sus características físico-químicas; de igual forma al esta tener su desembocadura en el rio Otún podría repercutir en la de dicho cuerpo hídrico.
- Los resultados obtenidos en las pruebas de sedimentación y deshidratación muestran que es recomendable realizar un proceso de espesamiento con el fin de aumentar la concentración del lodo y así garantizar un menor volumen de lodo a tratar.
- Las alternativas de tratamiento de lodos planteadas en este trabajo, hacen parte de una recopilación bibliográfica y de experiencias que se han tenido a nivel nacional e internacional, todas estas aplican en el tratamiento de lodos que se generan en plantas de potabilización y pretenden dar solución al problema ambiental que generan estos. Es importante tener en cuenta que unas son más usadas que otras debido a sus costos de operación y mantenimiento.

- Según los resultados arrojados por la matriz de decisión, los lechos de secado representaría la alternativa más viable para el tratamiento del lodo, siempre y cuando la planta cuente con el área requerida para su implementación.
- Para que el tratamiento de los lodos generado en los sistemas de potabilización llegue a obtener un grado de importancia y sea económicamente viable, es necesario obtener un valor agregado del subproducto producido por el tratamiento de estos.

11. RECOMENDACIONES

- Si la extensión de terreno requerida por los lechos de secado no está acorde con la existente en la planta, es más viable la implementación de acuerdo a la matriz de decisión, del tratamiento por medio de centrifugas o filtros banda, dependiendo de las características de la torta de lodo que la planta quiera obtener.
- Se hace necesario realizar posteriores investigaciones en esta planta, con el fin de cuantificar de manera precisa la generación de lodos para los diferentes periodos de invierno y verano.
- Los procesos de mantenimiento y operación que contemplen el vaciado y lavado de las unidades de sedimentación y filtración, deben realizarse con un cronograma preciso, para que el sistema de tratamiento de lodo propuesto tenga un buen funcionamiento y rendimiento adecuado.
- El espesamiento por gravedad es importante realizarlo para obtener lodo más concentrado, por esta razón se recomienda como un tratamiento previo antes de la implementación de alguna de las alternativas mencionadas en este trabajo. El dimensionamiento de las estructuras de espesamiento del lodo debe estar acompañado de estudios a escala piloto con el fin de determinar el menor tiempo en el cual se puede obtener la mayor concentración de lodo.

- Los lechos de secado deben protegerse con una estructura tipo invernadero, ya que las condiciones climáticas del sitio podrían influir negativamente en la deshidratación del lodo si este es dejado en la intemperie.
- Se hace necesario realizar un estudio de todo el proceso productivo, con el fin de aumentar la eficiencia de todos los procesos y evitar la pérdida de materia prima (sulfato de aluminio, PAC y cloro, entre otros) y el producto final (agua tratada).
- Se recomienda realizar estudios en cuanto a la recirculación del sulfato de aluminio por medio del acondicionamiento y posterior tratamiento por acidificación (ácido sulfúrico), además, es importante llevar a cabo estudios con humedales artificiales y tecnologías ecosostenibles.
- Se recomienda realizar estudios en cuanto a la reutilización del subproducto generado en lo que se refiere a materiales de construcción como ladrillos, tejas y cerámicas entre otros además de disposición en el terreno tipo granjeo (land farming).

BIBLIOGRAFÍA

ARBOLEDA V, Jorge. Teoría y práctica de la purificación del agua. McGraw-Hill. 3ª Edición, 2000.

AWWA (American Water Works Association). Calidad y Tratamiento del Agua. Manuales de suministro de agua comunitaria. McGraw-Hill, 2002.

CAMPEÓN B. Alejandra M., JARAMILLO G. Lina P. Caracterización y disposición de los lodos residuales de la planta de tratamiento de agua potable en el municipio de Supía (caldas). Universidad Nacional sede Manizales. 2004.

Centro Nacional de Investigaciones del Café – CENICAFE. Evapotranspiración de referencia en la región Andina de Colombia. [En línea] Disponible en la dirección URL: www.cenicafe.gov.co

ESPEJEL Fabricio, RODRÍGUEZ Arturo, CERÓN Oswaldo y RAMÍREZ Rosa María, 2006. Valoración de los lodos generados en una planta potabilizadora para elaborar productos cerámicos. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Coyoacán, Distrito Federal México, México.

FAIR, Gordon Maskew. OKUN, Daniel Alexander. GEYER, John Charles. Ingeniería sanitaria y de aguas residuales. Tomo II: Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales. 2ª Edición. Editorial Limusa. 1979.

Funcionamiento Del Sistema de Tratamiento de Lodos en la Planta de Filtros de Agua Potable, Aguas de Cartagena S.A E.S.P. [En línea] Disponible en la dirección URL: <http://www.acuacar.com/?q=node/292>

FYTILI D. y ZABANIOTOU A., 2006. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods - A review. Aristotle University of Thessaloniki. Thessaloniki, Grecia.

GARCÉS A. Fernando, DÍAZ A. Juan Carlos y DELLEPIANE N. Oscar Manuel, 1996. Acondicionamiento de lodos producidos en el tratamiento de agua potable. Santiago de Chile, Chile.

HARA K. y MINO T., 2008. Environmental assessment of sewage sludge recycling options and treatment processes in Tokyo. Osaka University. The University of Tokyo. Tokio, Japón.

HERNÁNDEZ S, Darwin. Aprovechamiento de los lodos aluminosos (etapa de sedimentación) de sistemas de potabilización como agregado en la fabricación de ladrillos cerámicos. Universidad del Valle. Cali, 2006.

MCGHEE, Terrence J. Abastecimiento de agua y alcantarillado: Ingeniería Ambiental. 6ª Edición. McGhhe (Editorial McGraw-Hill). 1999.

METCALF & EDDY. Ingeniería de Aguas Residuales, Tratamiento, vertido y reutilización. McGraw-Hill. 3ª Edición, 1996.

MONTEIRO S. N., ALEXANDRE J., MERGEM J.I., SÁNCHEZ R. y VIEIRA C.M.F., 2007. Incorporation of sludge waste Fromm water treatment plant into red ceramic. State University of the North Fluminense Darcy Ribeiro (UENF).

Parque de Alta Tecnología do Norte Fluminense (TECNORTE). Rio de Janeiro, Brasil.

MORGAN J.M., LÓPEZ J. y NOYOLA A., Matriz de decisión para la selección de tecnología relacionada con el tratamiento de aguas residuales. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

MUJICA F Viky C., PÉREZ Cathy, LEDEZMA Gaudy y ORTEGA Mario, 2006. Propuesta técnica para el tratamiento y disposición final de los lodos provenientes de una planta potabilizadora. Universidad de Carabobo. Carabobo, Venezuela.

PAVÓN S. Thelma Beatriz, PACHECO S. Víctor F. y CÁRDENAS Z. Luz María, 2004. Tratamiento de lodos de una planta potabilizadora para la recuperación de aluminio y hierro como coagulantes. Trabajo presentado en el XXIX Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental en San Juan, Puerto Rico, 2004. Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM). Ciudad de México, Distrito Federal México, México.

PÉREZ FARRÁS, Luis E., 2005. Teoría de la sedimentación. Cátedra de hidráulica aplicada a la ingeniería sanitaria. Área de hidráulica. Instituto de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina.

PÉREZ P, Jorge Arturo. Manual de potabilización del agua. Universidad Nacional sede Medellín, Facultad de minas. 4ª Edición, 2002.

RAMÍREZ F. Guillermo A. Manejo de lodos producidos en la planta de tratamiento de agua potable, Planta II, Cartago Valle. Universidad Nacional sede Manizales. 2003.

RAMÍREZ Z. Rosa María, CHANTAL C. Roberte, MILLÁN H. Sandra, ESPEJEL A. Fabricio, RODRÍGUEZ C. Arturo y ROJAS Marcelo, 2006. Aprovechamiento de los lodos generados en la planta potabilizadora, Los Berros, sistema Cutzamala, primera etapa. Ciudad de México, Distrito Federal México, México.

REGLAMENTO TÉCNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO RAS – 2000. Ministerio de Desarrollo Económico. Título C. 2000.

ROMERO R, Jairo Alberto. Purificación del agua. Escuela Colombiana de ingeniería Julio Garavito. 2ª Edición, Bogotá 2006.

SANDOVAL Y, Luciano. Tratamiento de lodos provenientes de plantas potabilizadoras. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). México. Junio, 2002.

SANDOVAL Y. Luciano, MARTÍN D. Alejandra, PIÑA S. Martín y MONTELLANO P. Leticia, 2002. Estudio piloto para reducir el volumen de lodos de plantas potabilizadoras. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos, México.

SANDOVAL Y. Luciano, MOTELLANO P. Leticia, MARTÍN D. Alejandra, SÁNCHEZ G. Laura, SANTANA R. Ma. De Lourdes y MORÁN P. Mario, 1998. Tratabilidad de los lodos producidos en la potabilización del agua. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos, México.

SOTERO S. Rosana B., ROCHA Odete y POVINELLI Jurandyr. Evaluation of water treatment sludges toxicity using the Daphnia bioassay. Escola de Engenharia de Sao Carlos—Universidade de Sao Paulo. 2005.