



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA
EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES MUNICIPALES**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN INGENIERÍA

INGENIERÍA AMBIENTAL - AGUA

P R E S E N T A

Ing. Judith Esmeralda Guzmán Tristán

TUTOR:

Dr. Pedro Martínez Pereda



2012



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Martínez Pereda Pedro
Secretario: Dr. De Victorica Almeida Jorge Luis
Vocal: Dr. César Váldez Enrique
1er. Suplente: Dr. González Barceló Oscar
2do. Suplente: M.I. Ramírez Camperos Mercedes Esperanza

Lugar donde se realizó la tesis:

Facultad de Ingeniería, UNAM

TUTOR DE TESIS

Dr. Martínez Pereda Pedro

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por abrirme sus puertas y brindarme la oportunidad de superarme.

Al Dr. Pedro Martínez Pereda por el apoyo y asesoramiento para el desarrollo de este proyecto.

A mi jurado Dr. Jorge De Victorica Almeida, Dr. Oscar González Barceló, Dr. Enrique César Váldez y M.I. Mercedes Esperanza Ramírez Camperos por sus valiosas aportaciones a mi proyecto de tesis.

A los profesores M.I. Ana Elisa Silva Martínez y Dr. Eduardo Vega, por su atención y el esfuerzo otorgado para la realización de este proyecto.

Al personal de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Cerro de la Estrella, por permitir el desarrollo de este trabajo aplicado a sus instalaciones.

DEDICATORIAS

A mi mamá: Gracias por permitirme ser quien soy, apoyándome y respetándome.

A mi papá: Por todo lo que me diste y porque sé que en donde estés, esto te hará feliz.

A Salvador, por estar siempre a mi lado. Gracias por acompañarme y darme tanto de ti.

A mis hermanas, Lourdes, Ara y Ale; porque tuve la ventaja de ser la más pequeña y aprender de sus experiencias. Gracias por enseñarme.

A mis sobrinas, July, Regi y Sofi; por ser tan adorables y darme tantos momentos de alegría.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO	PÁGINA
Índice de tablas.	iii
Índice de figuras.iv
Glosario de términos.	vi
Resumen.vii
Abstract.	viii
Introducción.	ix
Objetivos y alcances.	x
1. Metodología para el desarrollo del trabajo.1
2. Antecedentes.	2
2.1. Caracterización típica de aguas residuales municipales.	2
2.2. Capacidades actuales de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en el Distrito Federal.	4
2.3. Normatividad para la descarga y reúso del agua residual en México.7
3. Descripción de las operaciones y procesos unitarios de una planta para el tratamiento de aguas residuales de lodos activados convencional.	12
3.1. Variables que definen la capacidad de una planta.	12
3.2. Operaciones unitarias en sistemas de tratamiento de lodos activados convencionales. .14	
3.2.1.Desbaste.	14
3.2.1.1. Rejillas.	15
3.2.1.2. Tamices.16
3.2.2.Tanque de Homogeneización.	19
3.2.3.Desarenador.21
3.2.4.Cárcamo de bombeo.	23
3.2.5.Dispositivos para la medición de caudal.24
3.2.6.Sedimentador primario.26
3.2.7.Sedimentador secundario.	29
3.3. Procesos unitarios.	32
3.3.1.Sistema de Lodos Activados.	32
3.3.2.Desinfección.	41
4. Procedimiento para el diagnóstico del funcionamiento de una planta de lodos activados convencional.43
4.1. Diagnóstico.	44
4.1.1.Antecedentes de la planta de tratamiento.	44
4.1.2.Identificación del problema.	45
4.2. Planteamiento de alternativas.	46
4.2.1. Análisis de alternativas.	47
4.2.2. Selección de alternativas viables.	47

CAPÍTULO	PÁGINA
5. Aplicación de la metodología a la Planta de Tratamiento Cerro de la Estrella.	88
5.1. Diagnóstico.	88
5.1.1. Antecedentes.	88
5.1.2. Identificación del problema.	93
5.2. Planteamiento de alternativas.	101
6. Conclusiones y recomendaciones.	103
Bibliografía.	104
Referencias.	106

ÍNDICE DE TABLAS

NÚMERO DE TABLA	PÁGINA
2.1. Plantas Municipales de Tratamiento de Aguas Residuales en operación en el DF.	5
2.2. Contaminantes básicos NOM-001-SEMARNAT-1996.	8
2.3. Metales pesados y cianuros NOM-001-SEMARNAT-1996.	9
2.4. NOM-002-SEMARNAT-1996.	10
2.5. NOM-003-SEMARNAT-1997.	11
3.1. Clasificación de rejillas.	15
3.2. Diferencias de rejillas y tamices.	18
3.3. Diferencias de desarenadores.	22
3.4. Diferencias entre aforadores.	26
3.5. Tiempos típicos de retención celular y de razón F/M para tratamiento de aguas residuales por el proceso de lodos activados.	37
3.6. Parámetros de diseño para los procesos de lodos activados.	40
3.7. Dosis típicas de cloro para la desinfección.	42
4.1. Guía de solución de problemas de rejillas.	48
4.2. Solución de algunos problemas presentados en desarenadores.	49
4.3. Guía de solución de problemas del sistema de bombeo.	50
4.4. Guía de principales problemas presentados en sedimentadores primarios.	52
4.5. Posibles causas y soluciones por esponjamiento filamentoso.	69
4.6. Guía de solución de problemas por espumas.	74
4.7. Guía de solución de problemas de sedimentador secundario.	79
4.8. Guía de solución de problemas en desinfección.	82
4.9. Criterios de selección para la localización de puntos a adicionar químicos.	86

ÍNDICE DE FIGURAS

NÚMERO DE FIGURA	PÁGINA
2.1. Ejemplos de fluctuaciones típicas diarias del caudal de agua residual.	4
3.1. Factores que afectan la capacidad de la planta.	12
3.2. Variación de efluente.	13
3.3. Operaciones y procesos en el diagrama de flujo en una planta de tratamiento de agua residual.	14
3.4 Tamiz estático.	16
3.5. Esquema de tamiz dinámico o rotativo.	17
3.6. Tamiz de superficie móvil.	17
3.7. Tanque de sedimentación rectangular.	27
3.8. Tanque de sedimentación circular.	27
3.9. Tanque de sedimentación cónico.	28
3.10. Volumen de control y definición de parámetros usados para el análisis de un sistema de tratamiento de lodos activados.	32
3.11. Concentraciones aproximadas de remoción por un sistema de lodos activados convencional.	40
4.1. Metodología propuesta para la evaluación de sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales.	44
4.2. Número relativo de protozoarios.	56
4.3. Índice de resultados de las pruebas de sedimentación para la solución de problemas.	56
4.4. Prueba típica de observación para la solución de lavado de sólidos.	58
4.5. Prueba típica de observación para la solución de lodos voluminosos.	60
4.6. Prueba típica de observación de solución a la aglutinación y aumento de lodos.	63
4.7. Prueba típica de observación de solución a nubes en el efluente secundario.	64
4.8. Prueba típica de observación para la solución de cenizas en la superficie.	65
4.9. Prueba típica de observación para la solución de flóculos de alfiler y rezagados.	66
5.1. Vista aérea de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Cerro de la Estrella.	88
5.2. Sistema de criba tamiz Planta de Tratamiento Cerro de la Estrella.	89
5.3. Sedimentador primario Planta de Tratamiento Cerro de la Estrella.	90
5.4. Sistema de Lodos Activados Planta de Tratamiento Cerro de la Estrella.	91
5.5. Diagrama de flujo actual Planta de Tratamiento Cerro de la Estrella.	92
5.6. Caudal de diseño y actual tratado en la Planta de Tratamiento Cerro de la Estrella.	94
5.7. DQO y DBO de entrada a la Planta de Tratamiento Cerro de la Estrella.	94
5.8. Porcentaje de remoción de DQO en el sedimentador primario de la planta de tratamiento Cerro de la Estrella.	95
5.9. Relación F/M en el reactor biológico de la Planta de Tratamiento Cerro de la Estrella.	95
5.10. Índice Volumétrico de Lodos de la Planta Cerro de la Estrella.	96
5.11. Tiempo medio de retención celular en el reactor biológico en la planta de tratamiento Cerro de la Estrella.	96

5.12. Oxígeno Disuelto en el tanque de aeración de la planta de tratamiento Cerro de la Estrella.97

5.13. DBO de descarga de la planta de tratamiento Cerro de la Estrella. 98

5.14. DQO de descarga de la planta de tratamiento Cerro de la Estrella. 99

5.15. Dosis de cloro suministrada en la planta de tratamiento Cerro de la Estrella. 99

5.16. Cloro Residual Libre en Planta de Tratamiento Cerro de la Estrella. 100

5.17. Coliformes fecales en la descarga de la planta de tratamiento Cerro de la Estrella. 100

GLOSARIO DE TÉRMINOS

- A: Área superficial.
- c: Contenido de oxígeno
- C: Concentración de sólidos.
- CO_c : Capacidad de oxigenación.
- C_s : Valor de saturación del contenido de oxígeno.
- Cv: Carga volumétrica.
- DBO_5 : Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días y 20 °C.
- DQO: Demanda Química de Oxígeno.
- F/M: Relación alimento-microorganismos.
- IVL: Índice Volumétrico de Lodo
- k: Coeficiente para el sistema de aeración.
- NMP: Número más probable.
- OD: Oxígeno Disuelto.
- Q: Caudal de influente.
- Q_e : Caudal de efluente.
- Q_{max} : Caudal máximo.
- Q_{med} : Caudal medio.
- Q_r : Caudal de lodos activados de retorno.
- Q_w : Caudal de lodo a purgar del reactor biológico.
- r_g : Fracción purgada de lodos activados.
- S: Concentración de sustrato en el tanque de aeración.
- S_0 : Concentración de sustrato en el efluente del sedimentador primario.
- SACM: Sistema de Aguas de la Ciudad de México.
- SSLM: Sólidos Suspendidos en el Licor Mezclado
- SST: Sólidos Suspendidos Totales.
- ST: Sólidos Totales
- SSV: Sólidos Suspendidos Volátiles
- SSVLM: Sólidos Suspendidos Volátiles en el Licor Mezclado.
- TMRC: Tiempo medio de residencia celular.
- v: Velocidad.
- V: Volumen del reactor.
- V_c : Velocidad de sedimentación.
- v_{max} : Velocidad máxima.
- v_{min} : Velocidad mínima.
- X: Concentración de microorganismos en el reactor biológico.
- X_0 : Concentración de microorganismos en el influente.
- X_e : Concentración de microorganismos en el efluente del sedimentador secundario.
- X_r : Concentración de microorganismos de lodos activados de retorno.
- X_w : Concentración de microorganismos en lodos activados de desecho.
- θ : Tiempo de retención hidráulico.

RESUMEN

La falta de tratamiento de aguas residuales es uno de los principales problemas que enfrentan los países en vías de desarrollo. Este problema no sólo impacta a la salud de las personas, también afecta los ecosistemas de aguas dulces y marinos, además de que contribuye al cambio climático por las emisiones de metano a la atmósfera que contribuyen al calentamiento global.

Con el tratamiento de las aguas residuales, se pretende disminuir, controlar o eliminar aquellos compuestos que alteran las condiciones originales del agua. El objetivo del tratamiento es producir agua limpia (efluente tratado) o reutilizable en el ambiente y un residuo sólido o lodo, con características tales que garanticen su inocuidad a la salud y al ambiente. Los sistemas de tratamiento involucran operaciones (emplean fuerzas físicas) y procesos (si se presentan cambios químicos o biológicos). Las plantas de tratamiento de aguas residuales que emplean el proceso de lodos activados convencional, son aquellas en las que se incluyen: desbaste, un desarenador, sedimentadores primario y secundario; mientras que los procesos constan del proceso de lodos activados convencional y/o variantes, y una desinfección que por lo común se realiza con cloro.

Estas plantas están diseñadas para un 85 a 90% de eficiencia de remoción de materia orgánica biodegradable. Según las Estadísticas del Agua en México (CONAGUA, 2011), las plantas de tratamiento en el Distrito Federal cumplen con esta eficiencia; sin embargo, la mayoría presenta problemas de operación, ya que en algunas de ellas el porcentaje de agua tratada respecto a la capacidad de diseño se encuentra hasta por debajo del 50%. Este problema puede deberse a una mala operación de la planta, o bien a las malas instalaciones con las que se cuenta; en cada planta será un caso en particular.

En este trabajo, se propone una metodología, que a diferencia de otras está enfocada particularmente a sistemas de tratamiento de aguas residuales con el proceso de lodos activados convencional y que sirve como guía para la identificación de posibles problemas en la operación de una planta, basada en un análisis de una serie de posibles problemas y soluciones a las que se puede recurrir en caso de presentarse. Se desarrolla esta metodología mediante investigación bibliográfica y se aplica a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales "Cerro de la Estrella".

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Cerro de la Estrella es la de mayor capacidad de las operadas por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México en el Distrito Federal, con una capacidad de diseño de $4 \text{ m}^3/\text{s}$, sin embargo, actualmente se encuentra operando a casi una cuarta parte de esta capacidad a pesar del gran número de modificaciones que se le han efectuado. Del resultado de estas modificaciones, actualmente el tren de tratamiento es de un sistema de lodos activados con bioselector anóxico; se dice que es una planta de tratamiento terciario por contar con un sistema de filtración. Sin embargo, actualmente está fuera de operación.

Los resultados del diagnóstico indican que la planta está trabajando a menos de la mitad de su capacidad de diseño, a pesar que la DBO y DQO no han superado los valores de diseño. El Oxígeno Disuelto en el reactor biológico es mayor del nivel recomendado en la bibliografía para su adecuada operación. Además se observa que la dosis de cloro no es suficiente provocando niveles de cloro residual libre muy bajos, así como que los coliformes fecales sobrepasen la norma.

Se sugieren pruebas de tratabilidad para determinar si la materia orgánica presenta o no problemas de resistencia a la degradación, además de la determinación de dosis de cloro. Se espera que con estas pruebas se determinen las acciones necesarias restantes para que la planta opere eficientemente.

ABSTRACT

The lack of waste water treatment is one of the principal problems that the developing countries face. This problem not only strikes to the health of the people, also it affects the marine ecosystems and sweet waters, besides that it contributes to the climate change for the emission of methane to the atmosphere, that contribute to the global warming.

With the waste water treatment, is tried to diminish, to control or to eliminate compounds that alter the original conditions of the water. The objective of the treatment is to produce clean or reusable water in the environment and a solid residue or sludge, with characteristics that guarantee innocuousness to the health and to the environment. The systems of treatment involve operations (if it is a question of physical forces) and processes (if it presents chemical or biological changes). The waste water treatment plants that use the conventional process of activated sludge, included: refine, a sand trap, clarifier primarily and secondarily; the processes consist of the conventional process of activated sludge and/or variants, and a disinfection that commonly is realized by chlorine.

These plants are designed for 85 to 90% of efficiency of removal of organic biodegradable matter. According to the Estadísticas del Agua en México (CONAGUA, 2011), the treatment plants in Distrito Federal satisfy this; nevertheless, the majority present operation problems, because in some of them the percentage of water treated respect to the capacity of design in some is below 50 %. This problem can be for a bad operation of the plant, or for the bad facilities which possesses; in every plant it will be an especial case.

In this work, I propose a methodology that serves as a guide for the identification of possible problems in the operation of a plant. This methodology develops by means of bibliographical investigation and is applied to the Waste Water Treatment Plant "Cerro de la Estrella".

The Waste Water Treatment Plant Cerro de la Estrella is the major capacity of the produced ones that operate the Sistemas de Aguas de la Ciudad de México in Distrito Federal, with a capacity of design of 4 m³/s, nevertheless, nowadays it is operating to almost a fourth part of this capacity in spite of the great number of modifications that have effected it. Of the result of these modifications, nowadays the train of treatment is of a system of activated sludge with "bioselector anóxico"; it is said that it is a plant of tertiary treatment for possessing a system of filtration. Nevertheless, nowadays it is out of operation.

The results of the diagnostic indicate that the plant is working to less than the half of its capacity of design, although the BOD and COD have not overcome the values of design. The DO in the biological reactor is major of the level recommended in the bibliography for his suitable operation. In addition is observed that the dose of chlorine is not sufficient provoking very low levels of residual chlorine free, as well as the fecal coliformes exceed the norm.

Tests are suggested to determine if the organic matter presents or not problems of resistance to the degradation, besides the determination of dose of chlorine.

It hopes that with these tests decide the necessary remaining actions for that the plant operates efficiently.

INTRODUCCIÓN

Alrededor del mundo, muchas de las plantas de tratamiento de aguas residuales trabajan a una capacidad menor que aquella para la cual fueron diseñadas. Las causas pueden ser varias, desde un mal diseño hasta problemas por una operación inadecuada debido a la falta de preparación del personal. Además, los problemas pueden deberse a cambios no controlados en el caudal de entrada a la planta, ya sea en su caudal, en su calidad, o en ambos, lo cual interfiere con los parámetros para los cuales fue diseñada la planta.

En México, del total de aguas residuales municipales solamente se trata el 37.1%, lo que lleva a que buena parte de agua contaminada llegue a ríos, lagos, lagunas y zonas costeras. A esto, se suma el problema de que algunas de las plantas de tratamiento trabajan por debajo de su capacidad instalada, como son las plantas de la zona del Valle de México, que en promedio trabajan tan sólo al 58.3% de su capacidad (CONAGUA, 2011).

En el Distrito Federal existen 28 plantas en operación con una capacidad total instalada de $6.77 \text{ m}^3/\text{s}$; sin embargo, el caudal tratado es de tan sólo $3.32 \text{ m}^3/\text{s}$; es decir, sólo se trata el 49.18% del agua que podría ser tratada (CONAGUA, 2010).

Debido a lo anterior, y a que en la literatura consultada no se informa del porque de esta situación, se consideró pertinente, elaborar establecer una metodología que permita evaluar no sólo el funcionamiento rutinario de las unidades, sino el estado en que ellas se encuentran, los defectos que presentan y las prácticas de operación, a fin de que puedan proyectarse los cambios y/o reparaciones que haya que ejecutarse para que estos sistemas trabajen adecuadamente.

Con el propósito de contribuir a mejorar el desempeño de los sistemas de tratamiento, en este trabajo se presenta una metodología de evaluación fácil y rápida que permite, con base en las condiciones generales y particulares bajo las que operan estos sistemas, identificar el origen de su mal funcionamiento, y así dar una solución factible para que estos sistemas cumplan con su función, sin la necesidad de pasar por largos periodos de pruebas y estudios.

OBJETIVOS Y ALCANCES

Objetivo principal:

Proponer una metodología aplicable en el menor tiempo posible para la evaluación del funcionamiento de sistemas de tratamiento que emplean el proceso convencional de lodos activados.

Objetivos particulares:

1. Identificar la problemática que pueden presentar las operaciones unitarias y los procesos que integran las plantas de tratamiento de lodos activados convencionales.
2. Diagnosticar el origen de los problemas en una planta.
3. Establecer un procedimiento para la detección de problemas en el funcionamiento de plantas del tipo de lodos activados convencional.
4. Proporcionar una herramienta sencilla y útil de apoyo a la toma de decisiones para el buen funcionamiento de plantas de tratamiento de lodos activados.

Alcances:

- La metodología está dirigida hacia el análisis del funcionamiento de los procesos y operaciones unitarias para definir las adecuaciones necesarias para que estos sistemas de tratamiento cumplan con su función. En este análisis no se consideran los costos que puedan resultar de las acciones requeridas para el funcionamiento de estos sistemas.

1. METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DEL TRABAJO

En este primer capítulo se describe la metodología usada para el desarrollo de la tesis. Esta metodología consistió en los siguientes pasos:

1. Revisión bibliográfica de aspectos generales como son: las plantas de tratamiento ubicadas en el Distrito Federal, la normatividad de la región para tomarla como referencia del buen o mal funcionamiento de la planta.
2. Revisión bibliográfica de aspectos específicos a plantas de tratamiento de aguas residuales municipales con sistema de lodos activados convencional. En este punto, la investigación se enfocó a la selección de los principales parámetros de diseño y operación que se consideran en los procesos y operaciones unitarias que integran la planta de tratamiento.
3. Desarrollo de la metodología propuesta. Para la definición de posibles soluciones, se estableció una metodología que establece los siguientes puntos:
 - a. Diagnóstico: En este punto el primer paso a seguir es la investigación de los antecedentes de la planta, es decir toda aquella información disponible que será de utilidad para la evaluación. Como segundo punto se identifican los problemas, mediante la comparación de los parámetros de diseño de la planta con los que está operando en la actualidad.
 - b. Planteamiento de alternativas: Se presentan una serie de tablas que ayudan a la identificación de posibles problemas, además de soluciones.
4. Aplicación de la metodología. Visita e inspección física de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Cerro de la Estrella, para el acopio de información útil. Las observaciones se enfocaron en:
 - a. Información general:
 - i. Datos de diseño.
 - ii. Datos de operación de la planta (pruebas de laboratorio de control).
 - b. Arreglo general del tren de tratamiento.
 - c. Estado físico del tren de tratamiento.
 - d. Funcionamiento de los equipos.
 - e. Condiciones de seguridad.
 - f. Capacitación del personal.
5. Diagnóstico con ayuda de las guías o tablas de identificación de problemas, así como el análisis de los datos de laboratorio proporcionados, respecto a la norma a cumplir.
6. Presentación final del informe.

2. ANTECEDENTES

2.1 Caracterización de aguas residuales municipales

Se denomina agua residual a un agua que, durante su uso de tipo doméstico, industrial, agrícola u otro, ha sufrido modificaciones en su composición inicial.

Aguas Residuales Municipales

Las aguas residuales municipales se componen principalmente, en su carga contaminante, de materia orgánica en forma soluble o coloidal y de sólidos en suspensión. Tales materias representan gran carga contaminante para el medio receptor y pueden modificarlo si no se trata el agua que allí se vierte.

Algunas características de la calidad de las aguas residuales municipales son:

- a) Color y transparencia: Por lo común el agua residual es turbia, de poca transparencia. La turbidez se debe a la presencia de sustancias insolubles, especialmente del tipo coloidal. Cuando el agua se hace pútrida, puede ennegrecer. La turbidez del agua se determina mediante un turbidímetro, ésta prueba está estandarizada y puede consultarse en otras fuentes (APHA, AWWA, WPCF, 1992).
- b) Olor: El agua residual fresca tiene olores típicos desagradables que se incrementan con la descomposición.
- c) Temperatura: La temperatura del agua residual puede ser un poco más alta que la del agua utilizada o la del agua potable consumida, dependiendo del tipo de descargas. La temperatura influye en el proceso de sedimentación, las variaciones de densidad y la actividad biológica. Una temperatura elevada favorece el proceso por la disminución de la densidad del agua, y la depuración biológica por el aumento de la actividad bacteriana.
- d) Materias orgánicas e inorgánicas: Las materias inorgánicas ya están presentes en el agua potable, como sales disueltas; mientras que la materia orgánica son contaminantes. La determinación de materia orgánica en el agua se efectúa por medio de una oxidación química o bioquímica; el consumo de oxígeno durante la oxidación sirve como indicador del contenido en materia orgánica (Demanda Bioquímica de Oxígeno y Demanda Química de Oxígeno).
- e) Materia insoluble: El agua contiene materia insoluble que se puede clasificar de la siguiente manera:

- Coloides responsables de la turbidez del agua
- Materias de sedimentación que se depositan en el fondo
- Materias en suspensión que no se sedimentan
- Materias flotantes que suben a la superficie dada su densidad inferior a la del agua

Las materias que se sedimentan son retenidas en la sedimentación, mientras que las materias flotantes son eliminadas en gran parte del agua residual en el momento del desbaste. Las sustancias coloidales y las materias en suspensión son degradadas en parte en el tratamiento biológico o retenidas en el lodo.

- f) Materias solubles: Se entiende por materia soluble toda la materia que en la evaporación de una muestra filtrada de agua residual, queda en forma de residuo seco. Se trata principalmente de sales inorgánicas y de numerosas combinaciones orgánicas, solubles en el agua.
- g) Sales: Cualquier agua natural contiene sales; por consiguiente, el agua residual las tiene. Cuando las dosis de sal en el agua residual son muy elevadas, perturban la depuración.
- h) Aceites y grasas: Son materias orgánicas que en pequeñas cantidades, son componentes usuales del agua residual; se trata sobre todo del aceite vegetal y animal.
- i) Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO): Es el parámetro que indica el contenido de materia orgánica biológicamente degradable. Los microorganismos consumen oxígeno durante la degradación de la materia orgánica, el consumo de oxígeno depende por consiguiente de la cantidad de materia orgánica contenida en el agua residual. Pero si hay presencia de sustancias tóxicas en el agua residual, ya no corresponde a dicha cantidad; en este caso el valor de DBO es demasiado pequeño, pues la acción tóxica interfiere con la actividad de las bacterias. La DBO se basa en las reacciones bioquímicas y depende entonces como ellas, de la duración, de la temperatura, de la clase de microorganismos y sustancias nutritivas.
- j) Demanda Química de Oxígeno (DQO): Así como la DBO, la DQO es un parámetro que indica el contenido de materia orgánica en el agua residual. En el caso de la DQO, la materia orgánica sufre una oxidación química. En general, la DQO es más alta que la DBO, ya que hay más materia orgánica que sólo puede ser oxidada por sustancias químicas.
- k) Oxígeno: La solubilidad del oxígeno en el agua depende de la presión y la temperatura. En general, el influente de una planta de tratamiento no contiene oxígeno, la aeración abastece el oxígeno necesario para la depuración biológica. El contenido de oxígeno de un agua residual purificada biológicamente es en principio de 2 a 3 mg O₂/L (Winkler, 1994).

La composición del agua residual sufre importantes fluctuaciones diarias, además de que varía en su caudal en función de la producción diaria. Dicha producción por su parte depende de las costumbres de la población (horarios de trabajo, horas de comidas, tipo de diversiones, días de lavado de ropa, baño, ducha, etc.), así como del tipo de población de la que hablamos; además que en días laborales, los caudales de agua residual no son los mismos que los de los días feriados. La figura 2.1 ilustra los resultados de tres comunidades con diferente número de habitantes.

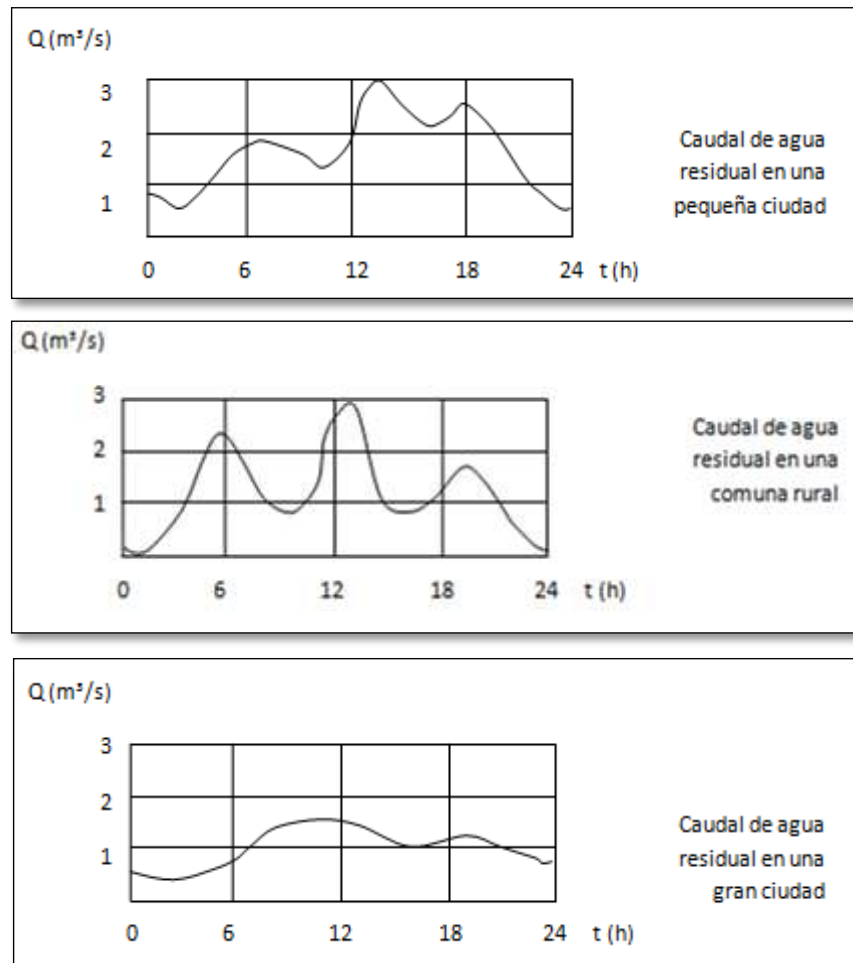


Figura 2.1. Ejemplos de fluctuaciones típicas diarias del caudal de agua residual (Vater, 1992).

2.2 Capacidades actuales de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en el Distrito Federal

Actualmente en el país, del total de aguas residuales municipales se trata el 37.1% (CONAGUA, 2011), mientras que en el Distrito Federal solo el 49.18% de las aguas que se generan reciben tratamiento (CONAGUA, 2010). La tabla 2.1 muestra las plantas de tratamiento de agua residual municipales dentro del Distrito Federal, con sus capacidades instaladas y operadas.

Tabla 2.1. Plantas Municipales de Tratamiento de Aguas Residuales en operación en el DF (CONAGUA, 2010)

Municipio	Localidad	Nombre de la planta	Proceso	Capacidad instalada (L/s)	Caudal tratado (L/s)	Cuerpo receptor o reuso	Observaciones
Álvaro Obregón	Álvaro Obregón	Santa Fe	Lodos Activados	280	150	Barrancas	Se incorporó en 2009
Azcapotzalco	Azcapotzalco	U.H. El Rosario	Lodos Activados	25	16	Riego de áreas verdes. Regado del Parque Tezozomoc	Opera SACM
Coyoacán	Coyoacán	Ciudad Universitaria	Lodos Activados	60	30	Áreas verdes	Operada por la UNAM, servicios propios
	Coyoacán	Ciudad Universitaria "FCPS"	Lodos Activados	7.5	0.8	Áreas verdes	Operada por la UNAM, servicios propios
	Coyoacán	Coyoacán	Lodos Activados	400	150	Áreas verdes, reuso industrial y comercial en las Delegaciones de Coyoacán, Xochimilco, Benito Juárez y Álvaro Obregón	Opera SACM
Cauhtémoc	Cauhtémoc	U.H. Nonoalco Tlatelolco	Lodos Activados	22	15	Áreas verdes	Opera SACM
Gustavo A. Madero	Gustavo A. Madero	Acueducto de Guadalupe	Lodos Activados	110	102	Áreas verdes e industrial	Concesionada a "Aguas Industriales de Vallejo, S.A. de C.V."
	Gustavo A. Madero	San Juan de Aragón	Lodos Activados	500	198	Áreas verdes, llenado del Lago de San Juan de Aragón y Alameda Oriente	Opera SACM
Iztacalco	Iztacalco	Ciudad Deportiva	Lodos Activados	230	107	Áreas verdes e industrial	Operada por SACM
	Iztacalco	U.H. Picos Iztacalco	Lodos Activados	13	10	Áreas verdes	Opera SACM
Iztapalapa	Iztapalapa	Cerro de la Estrella	Lodos Activados	4000	2000	Áreas verdes, industrial, zona agrícola y chinampera de Xochimilco y Tlahuac	Opera SACM
	Iztapalapa	Santa Martha Acatitla	Lodos Activados	14	8	Áreas verdes	Inició operación en 2005
Miguel Hidalgo	Miguel Hidalgo	Bosques de Las Lomas	Lodos Activados	55	25	Áreas verdes Delegación Miguel Hidalgo	Opera SACM
	Miguel Hidalgo	Campo Militar no. 1-A	Lodos Activados	30	25	Áreas verdes	Opera SEDENA

Municipio	Localidad	Nombre de la planta	Proceso	Capacidad instalada (L/s)	Caudal tratado (L/s)	Cuerpo receptor o reuso	Observaciones
Miguel Hidalgo	Miguel Hidalgo	Lomas de Chapultepec	Lodos Activados	160	100	Áreas verdes de la primera y segunda sección del Bosque de Chapultepec, llenado de lagos y corredor turístico de la Avenida Paseos de la Reforma	Opera SACM
Milpa Alta	San Pedro Atocpan	San Pedro Atocpan	Lodos Activados	60	30	Riego Agrícola	Opera SACM
Tlahuac	San Andrés Mixquic	San Andrés Mixquic	Primario Avanzado	30	30	Riego de hortalizas	Opera SACM
	San Juan Ixtayopan	Paraje El Llano	Lodos Activados	250	100	Riego agrícola y recarga del acuífero	Opera SACM
	San Juan Ixtayopan	San Juan Ixtayopan (La Lupita)	Lodos Activados	15	14	Zona Agrícola	Opera SACM
	San Nicolas Tetelco	San Nicolas Tetelco	Lodos Activados	30	7	Zona Agrícola de la Delegación Tlahuac, Pueblo de San Nicolas Tetelco	Opera SACM
	Tlahuac	San Lorenzo	Lodos Activados	225	80	Llenado de canales y recarga del acuífero	Opera SACM
Tlalpan	Parres (El Guarda)	Parres	Lodos Activados	8	1	Áreas verdes	Opera SACM
	Tlalpan	Abasolo	Lodos Activados	15	7	Áreas verdes y control de la contaminación de las Barrancas del Ajusco	Opera SACM
	Tlalpan	H. Colegio Militar	Lodos Activados	30	26	Áreas verdes	Requiere ampliación/opera SEDENA
	Tlalpan	San Miguel Xicalco	Lodos Activados	8	4	Áreas verdes	Opera SACM
	Tlalpan	U.H. Pemex Picacho	Lodos Activados	13	10	Áreas verdes de la Delegación Tlalpan	Opera SACM
Xochimilco	Xochimilco	Reclusorio Sur	Lodos Activados	30	19	Riego áreas verdes del Reclusorio Sur y Río San Lucas, Delegación Xochimilco	Opera SACM
	Xochimilco	San Luis Tlaxialtemalco	Lodos Activados	150	65	Agrícola/Áreas verdes	Opera SACM
Total de plantas			28	6 770.5	3 329.8		

2.3 Normatividad para la descarga y reúso del agua residual en México

Según el uso para el que esté destinada el agua tratada, deberá cumplir con la siguiente normatividad:

- a) Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996

Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

La concentración de contaminantes básicos para las descargas de aguas residuales a aguas y bienes nacionales, no debe exceder el valor indicado como límite máximo permisible en la tabla 2.2. Además de considerar otros parámetros como son:

- i. pH de 5 a 10 unidades.
- ii. Para descargas vertidas a suelo (uso en riego agrícola), es de 1000 y 2000 como número más probable (NMP) de coliformes fecales por cada 100 mL para el promedio mensual y diario, respectivamente.
- iii. Para las descargas vertidas a suelo (uso en riego agrícola), el límite es de 1 huevo de helminto por litro para riego restringido, y de 5 huevos por litro para riego no restringido.

Tabla 2.2. Contaminantes básicos NOM-001-SEMARNAT-1996

Parámetros (mg/L, excepto cuando se especifique)	Ríos						Embalses naturales y artificiales				Aguas costeras						Suelo				
	Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano (C)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		Estuarios (B)		Uso en riego agrícola (A)		Humedales naturales (B)		
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	
Temperatura °C (1)	N.A.	N.A.	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	N.A.	N.A.	40	40
Grasas y aceites (2)	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	
Materia flotante (3)	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	
Sólidos sedimentables (mL/L)	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	N.A.	N.A.	1	2	
Sólidos suspendidos totales	150	200	75	125	40	60	75	125	40	60	150	200	75	125	75	125	N.A.	N.A.	75	125	
Demanda Bioquímica de Oxígeno5	150	200	75	150	30	60	75	150	30	60	150	200	75	150	75	150	N.A.	N.A.	75	150	
Nitrógeno Total	40	60	40	60	15	25	40	60	15	25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	15	25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
Fósforo Total	20	30	20	30	5	10	20	30	5	10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	5	10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	

(1) Instantáneo; (2) Muestra Simple Promedio Ponderado

(3) Ausente según el Método de Prueba definido en la NMX-AA-006

P.D. = Promedio Diario; P.M.= Promedio Mensual; N.A. = No es aplicable

(A), (B) y (C): Tipo de Cuerpo Receptor según la Ley Federal de Derechos.

Tabla 2.3. Metales pesados y cianuros NOM-001-SEMARNAT-1996

Límites máximos permisibles para metales pesados y cianuros																				
Parámetros (*)	Ríos						Embalses naturales y artificiales				Aguas costeras						Suelo			
	Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano (C)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		Estuarios (B)		Uso en riego agrícola (A)		Humedales naturales (B)	
(mg/L)	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Arsénico	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2
Cadmio	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.05	0.1	0.1	0.2
Cianuros	1.0	3.0	1.0	2.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0
Cobre	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0
Cromo	1.0	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1.0	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1.0	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0
Mercurio	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01	0.01	0.02	0.005	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01	75	150
Níquel	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4
Plomo	0.5	1.0	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1.0	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1.0	0.2	0.4	5	10	0.2	0.4
Zinc	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20

(*)Medidos de manera total

P.D. = Promedio Diario;

P.M.= Promedio Mensual;

N.A. = No es aplicable

(A), (B) y (C): Tipo de Cuerpo Receptor según la Ley Federal de Derechos.

b) Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996

Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. Estos límites no deben ser superiores a los indicados en la tabla 2.4. Además debe cumplir con los siguientes parámetros:

- i. pH en las descargas de aguas residuales debe estar entre 10 y 5.5.
- ii. El límite máximo permisible de la temperatura es de 40°C.
- iii. Materia flotante ausente
- iv. DBO₅ y SST, son los establecidos en la tabla 2.2 de la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Tabla 2.4. NOM-002-SEMARNAT-1996.

Parámetros (mg/L, excepto cuando se especifique otra)	Promedio mensual	Promedio diario	Instantáneo
Grasas y aceites	50	75	100
Sólidos sedimentables (mL/L)	5	7.5	10
Arsénico total	0.5	0.75	1
Cadmio total	0.5	0.75	1
Cianuro total	1	1.5	2
Cobre total	10	15	20
Cromo hexavalente	0.5	0.75	1
Mercurio total	0.01	0.015	0.02
Níquel total	4	6	8
Plomo total	1	1.5	2
Zinc total	6	9	12

c) Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997

Establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.

El término de reúso en servicios al público con contacto directo se refiere a actividades donde el público usuario esté expuesto o en contacto físico. En lo que corresponde a esta Norma Oficial Mexicana se consideran los siguientes reúsos: llenado de lagos y canales artificiales recreativos con paseos en lancha, remo, canotaje y esquí; fuentes de ornato, lavado de vehículos, riego de parques y jardines.

En cuanto al reúso en servicios al público con contacto indirecto u ocasional, es el que se destina a actividades donde el público en general esté expuesto indirectamente o en contacto físico incidental y que su acceso es restringido, ya sea por barreras físicas o personal de vigilancia. En lo que corresponde a esta Norma Oficial Mexicana se consideran los siguientes reúsos: riego de jardines y camellones en autopistas; camellones en avenidas, fuentes de ornato, campos de golf, abastecimiento de hidrantes de sistemas contra incendio, lagos artificiales no recreativos, barreras hidráulicas de seguridad y panteones.

Los límites máximos permisibles de contaminantes en aguas residuales tratadas son los establecidos en la tabla 2.5, además de considerar los siguientes parámetros:

- i. La materia flotante debe estar ausente en el agua residual tratada.
- ii. El agua residual tratada reusada en servicios al público no deberá contener concentraciones de metales pesados y cianuros mayores a los límites máximos permisibles establecidos en la columna que corresponde a embalses naturales y artificiales con uso en riego agrícola de la tabla 2.3 de la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Tabla 2.5. NOM-003-SEMARNAT-1997.

Tipo de reúso	Promedio mensual				
	Coliformes fecales NMP/100 mL	Huevos de helminto (h/L)	Grasas y aceites (mg/L)	DBO5 (mg/L)	SST (mg/L)
Servicios al público con contacto directo	240	≤ 1	15	20	20
Servicios al público con contacto indirecto u ocasional	1000	≤ 5	15	30	30

3. DESCRIPCIÓN DE LAS OPERACIONES Y PROCESOS UNITARIOS DE UNA PLANTA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LODOS ACTIVADOS CONVENCIONAL

3.1 Variables que definen la capacidad de una planta

Un gran número de factores influyen en la capacidad de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales existente, estos factores pueden ser (figura 3.1):



Figura 3.1. Factores que afectan la capacidad de la planta (Daigger, 1992).

- a) Instalaciones de la planta, incluyendo el tamaño de las unidades de proceso, número y tipo.
- b) El tamaño, número y tipos de equipos mecánicos.
- c) Las condiciones de las instalaciones existentes, tanto las de proceso como el equipo.
- d) Características del agua residual, es decir las concentraciones de los contaminantes convencionales, como DBO_5 , y SST, además de contaminantes como metales pesados y tóxicos.
- e) Exigencias de tratamiento; es decir los límites máximos permisibles para varios contaminantes, así como su frecuencia. Un ejemplo se muestra en la figura 3.2.

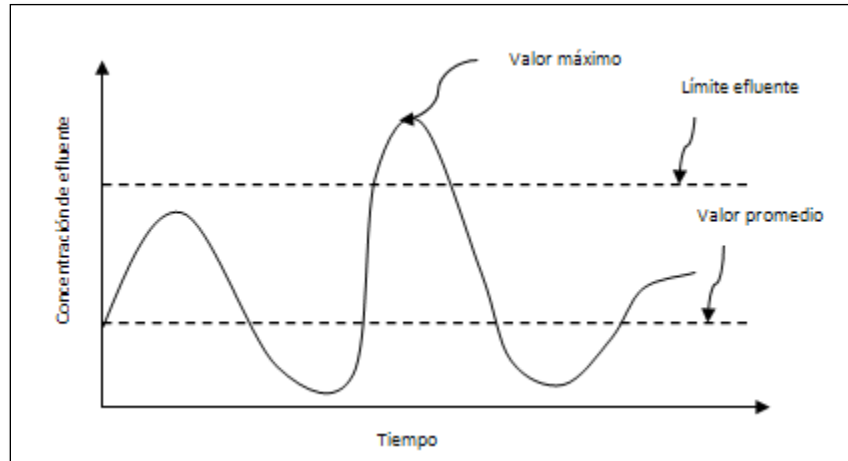


Figura 3.2. Variación de efluente (Daigger, 1992)

- f) Estrategias de control del proceso. Consiste en todos los enfoques usados para la operación y optimización de las unidades de proceso individuales, así como las interacciones entre estas unidades de proceso. Estos determinarán si las capacidades de las instalaciones existentes, son usadas eficazmente para el tratamiento de las aguas residuales.
- g) Procedimientos de operación y mantenimiento. Estos procedimientos afectan en dos aspectos la capacidad de la planta; primero, los procedimientos de operaciones determinarán si las estrategias de control del proceso son eficaces en las acciones del personal que opera la planta. El desarrollo de una estrategia de control de procesos no será eficaz, si ésta no da como resultado acciones efectivas y oportunas por parte del personal. En segundo lugar, el mantenimiento debe ser efectivamente implementado para mantener las instalaciones de la planta, y el equipo en condiciones de funcionamiento adecuadas.
- h) Recursos para operación y mantenimiento. Los dos factores anteriores (procedimientos de operación y mantenimiento y estrategias de control del proceso) son cualitativos; los recursos para la operación y el mantenimiento son cuantitativos. Aquí se incluyen aspectos como el presupuesto de funcionamiento de la planta, número de personal en la planta y su nivel de experiencia, capacidad del laboratorio, y las instalaciones disponibles para llevar a cabo el mantenimiento necesario. Esto indica si las estrategias de control del proceso especificadas y los procedimientos de operación y mantenimiento pueden ser puestos en práctica.

3.2 Operaciones unitarias en sistemas de tratamiento de lodos activados convencionales

Las aguas residuales deben ser tratadas antes de verterlas a un medio receptor. Normalmente este tratamiento se realiza por procedimientos diferentes, para ser tratada convenientemente, el agua residual pasa por ellos.

Aquellas operaciones realizadas en el tratamiento del agua residual en las cuales el cambio se lleva a cabo por medio de o a través de la aplicación de las fuerzas físicas, se conocen como operaciones unitarias, mientras que en los procesos intervienen procesos químicos o biológicos. En la figura 3.3 se indican las operaciones y procesos unitarios utilizados, en un diagrama de flujo típico correspondiente al tratamiento del agua residual.

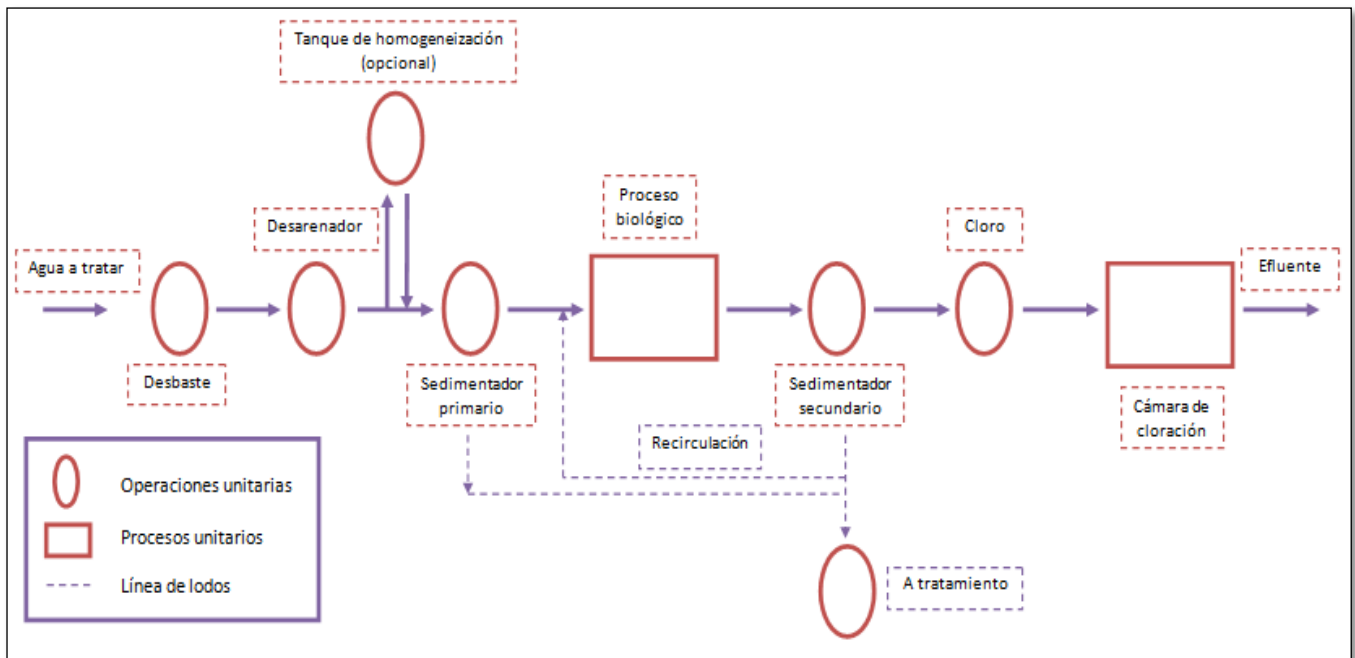


Figura 3.3. Operaciones y procesos en el diagrama de flujo de una planta de tratamiento de agua residual (Metcalf-Eddy, 2003).

3.2.1 Desbaste

La primera operación unitaria en las plantas de tratamiento de aguas residuales es la operación de desbaste. Los elementos separadores pueden ser alambres, varillas o barras paralelas, rejillas, tela metálica o placas perforadas y las aberturas pueden ser de cualquier forma, aunque generalmente son ranuras circulares o rectangulares. Los elementos utilizados para realizar esta operación son las rejillas y los tamices.

En el diseño de una planta de tratamiento es conveniente considerar la instalación de más de una rejilla o tamiz, esto para evitar el paro de operaciones al hacer la limpieza de alguna de ellas. Al salir de esta operación, el agua residual es conducida a través de un canal de llamada

manteniendo un flujo laminar y libre de turbulencia, hacia las siguientes unidades o dispositivos de pretratamiento.

3.2.1.1 Rejillas

Una rejilla es un dispositivo con aberturas uniformes utilizado para retener generalmente los sólidos de cierto tamaño que arrastran las aguas residuales, situadas en un canal, en posición transversal al flujo, de tal forma que el agua pase a través de ellas, quedando retenidos todos los sólidos presentes de un tamaño superior a la separación entre barrotes. Generalmente las rejillas tienen aberturas de 25 mm o más, sin embargo, éstas pueden clasificarse por la separación o claro libre entre los barrotes (tabla 3.1), dependiendo su elección del tamaño de sólidos a retener.

Tabla 3.1. Clasificación de rejillas (Sainz Sastre, 2005).

Tipo	Claro libre (mm)
Rejillas de gruesos	>50
Rejillas de medios	15 a 50
Rejillas de finos	8 a 12

La eliminación de los residuos depositados en las rejillas puede ser llevada a cabo de dos formas:

- a) Limpieza manual: Son generalmente instaladas en plantas urbanas de bajo caudal o industriales, basado en el empleo de un rastrillo con púas que se incrusta en los espacios abiertos de la rejilla. Para facilitar el trabajo de limpieza, el ángulo de la rejilla con el canal suele estar cercano a 45-60° (Metcalf-Eddy, 2003).

- b) Limpieza automática: Las unidades de limpieza automática requieren una menor atención que las manuales, sin embargo es preciso mantenerlas perfectamente ajustadas y lubricadas. La limpieza se lleva a cabo mediante unos rastrillos que se incrustan entre los barrotes y se deslizan a lo largo de los mismos siendo arrastrados acoplados a cadenas sinfín. La velocidad de desplazamiento de los rastrillos viene fijada por el fabricante del equipo, siendo los valores generalmente entre 2 y 5 m/min, el espesor de los rastrillos varía entre 10 y 20 mm. Este sistema lleva a cabo su función de forma discontinua, siendo actuado mediante un temporizador o bien por determinación de la diferencia de nivel del agua antes y después de la rejilla, lo que indica el grado de colmatación en que ésta se encuentra. El ángulo del equipo con el canal suele estar entre 75-85°. El funcionamiento del sistema de rejillas automático tiene que revisarse una o dos veces al día (Sainz Sastre, 2005).

Parámetros de diseño de las rejillas

Las principales variables que intervienen en el funcionamiento de la rejilla, es la pérdida de carga y la velocidad. Las pérdidas de carga en las rejillas de barras son función de la forma de la barra y de la altura cinética del flujo a través de las barras.

Además del cálculo de las pérdidas de carga, se debe considerar la velocidad de escurrimiento antes de pasar por la rejilla, la cual tiene que ser suficientemente rápida para evitar la formación de depósitos por sedimentación. Ésta debe ser mínima de $v_{\min} = 0.5$ m/s, y no superar $v_{\max} = 1.0$ m/s; con el fin de evitar el paso de los residuos retenidos en las barras. Debido al espesor de las barras el ancho del canal tiene que ser ampliado aproximadamente un 30% en el sitio en que se instala la rejilla (Sainz Sastre, 2005).

3.2.1.2 Tamices

Los tamices (placas perforadas o mallas metálicas) tienen aberturas superiores a 6 mm. Su campo de aplicación va desde el tratamiento primario hasta la eliminación de los sólidos en suspensión residuales procedentes de los procesos de tratamiento biológicos. Estos equipos tienen una capacidad de eliminación de residuos mucho más elevado que las rejillas, llegando a un porcentaje de remoción del 10 al 15% de sólidos en suspensión, sin embargo, no son muy comunes debido a los mayores costos que el de las rejillas, su elevada pérdida de carga, así como su bajo caudal de tratamiento (Sainz Sastre, 2005). Los tamices pueden ser:

- a) Tamices estáticos: No tienen ninguna parte móvil y por la geometría de colocación de la malla, son autolimpiantes. El claro libre en estos equipos varía entre 0.5 y 2 mm (Sainz Sastre, 2005). Este tipo de tamices tienen la ventaja de que requieren un mantenimiento mínimo y no tienen consumo energético. En la figura 3.4 se muestra un tamiz estático.

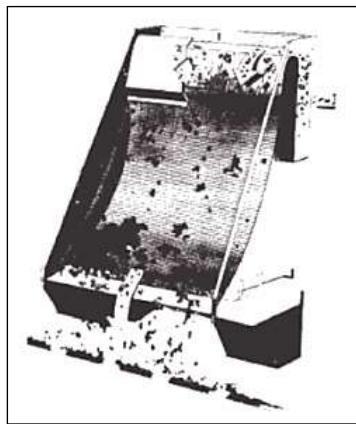


Figura 3.4. Tamiz estático (Sainz Sastre, 2005).

- b) Tamices dinámicos o rotativos: Los tamices dinámicos tienen una capacidad de tratamiento superior a los estáticos, siendo mecánicamente más complejos y de costo más elevado. Están formados por un cilindro con una malla de acero inoxidable a través de la cual fluye el agua residual, quedando retenidos sobre la superficie los sólidos en suspensión a eliminar. Al girar el cilindro, extrae del agua los sólidos, que son arrastrados por la superficie del tamiz y separados posteriormente mediante una espátula. El claro libre de la malla utilizada es de 0.5 a 1.5 mm (Sainz Sastre, 2005). En la figura 3.5 se muestra un tamiz dinámico o rotativo.

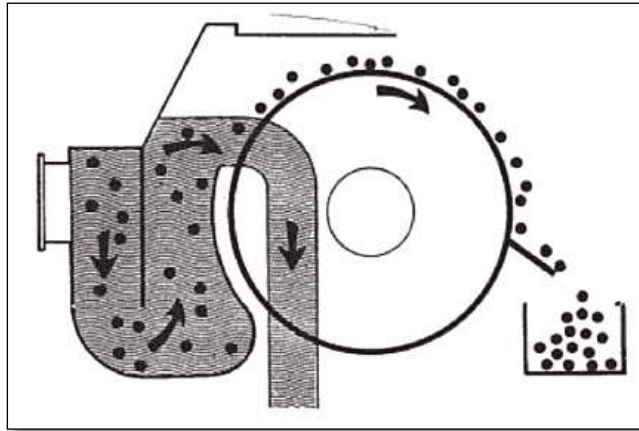


Figura 3.5. Esquema de tamiz dinámico o rotativo (Sainz Sastre, 2005).

- c) Tamices de superficie móvil: En los tamices de superficie móvil, ésta se va desplazando de abajo hacia arriba, formando una banda continua. El claro libre en estas unidades es mayor que en los tamices estáticos y dinámicos, variando de 1 a 4 mm (Sainz Sastre, 2005). Se muestra un tamiz de superficie móvil en la figura 3.6.

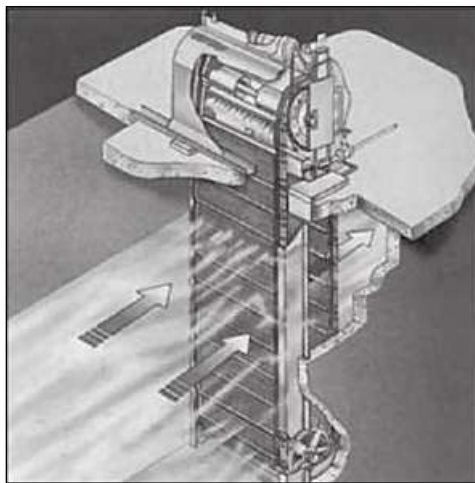


Figura 3.6. Tamiz de superficie móvil (Sainz Sastre, 2005).

Parámetros de diseño de los tamices

Al igual que las rejillas los principales parámetros son la velocidad y la pérdida de carga. La pérdida de carga en los tamices de malla fina para aguas limpias puede obtenerse por medio de las tablas facilitadas por los fabricantes o bien calcularse mediante la fórmula del orificio que involucra variables como la descarga a través del tamiz, la superficie libre sumergida y la aceleración de la gravedad.

La pérdida de carga a través de un tamiz limpio es relativamente insignificante. La determinación importante es la pérdida de carga durante el funcionamiento y esto depende del tamaño y cantidad de sólidos en el agua residual, el tamaño de las aberturas y el método y frecuencia de la limpieza.

En resumen las ventajas y desventajas de las rejillas y tamices son:

Tabla 3.2. Diferencias de rejillas y tamices.

	Rejilla	Tamiz
Diferencias	<ul style="list-style-type: none"> - Abertura desde 25 mm. - De limpieza manual y automática. 	<ul style="list-style-type: none"> - Abertura desde 6 mm. - De tipo estático, dinámico rotativo y de superficie móvil.
Ventajas y desventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere limpieza dos veces al día (mínimo). - Soporta gran caudal de tratamiento (limpieza automática). 	<ul style="list-style-type: none"> -Capacidad de remoción mayor de sólidos suspendidos. - Elevada pérdida de carga. - Bajo caudal de tratamiento.

Operación y mantenimiento

Las rejillas manuales tienen que ser limpiadas dos veces al día, si la rejilla no es vigilada y limpiada regularmente, puede impedir el paso del agua y provocar un refluo. En período de lluvia, la limpieza de una rejilla fina debería repetirse de ser posible cada media hora, sobre todo si está precedida de un vertedor que corra el riesgo de desbordarse si la rejilla se tapona.

La rejilla frena siempre la velocidad del paso del agua (pérdida de carga) lo que provoca con frecuencia la formación de depósitos de arena aguas arriba de la rejilla, es necesario evacuar dichos depósitos.

El funcionamiento del sistema de rejillas automático tiene que revisarse una o dos veces al día. Hay que vaciar el aceite, engrasar y volver a ajustar los dispositivos del sistema según el plan de mantenimiento y en función de las horas de servicio, además se debe comprobar el dispositivo de control automático. Los mandos automáticos del flotador funcionan por medio de la lectura

automática de la altura (profundidad) del nivel de agua, arriba y abajo de la rejilla, por lo que deben limpiarse una vez por semana para evitar que se atasquen.

Los residuos retirados de las rejillas se descargan cerca de la rejilla, primeramente, de preferencia en recipientes móviles y tapados (colectores) deberían, en lo posible, evacuarse todos los días en el depósito de basura. Ya que estos residuos contienen detritos, atraen moscas y otros insectos y producen malos olores, se puede combatir recubriendo con cal (especialmente en verano o temporada cálido-húmeda).

Análisis de los parámetros de diseño

Al analizar los parámetros que influyen en el proceso de desbaste, nos enfocaremos principalmente a los parámetros de diseño de las rejillas y tamices, por lo que deben considerarse los siguientes aspectos:

- Geometría de las barras (ángulo de inclinación, separación de las barras)
- Altura cinética del flujo
- Limpieza adecuada y continua
- Velocidades de llegada y a través de la rejilla o tamiz

3.2.2 Tanque de Homogeneización

La homogeneización consiste en la laminación de las variaciones del caudal o carga para lograr un caudal o carga constante o casi constante. Esta técnica puede aplicarse en diversas situaciones, dependiendo de las características de la red de alcantarillado. Las principales consisten en la homogeneización de:

- Caudales en tiempo seco
- Caudales en tiempo de lluvia procedentes de redes de alcantarillado separados
- Caudales mixtos de aguas pluviales y residuales sanitarias

Las principales ventajas que se obtienen de la homogeneización de caudales son las siguientes: 1) mejora el tratamiento biológico debido a la eliminación o disminución de cambios bruscos en el caudal o carga orgánica; 2) mejora la calidad del efluente y el rendimiento de los tanques de sedimentación secundaria al trabajar a cargas de sólidos constantes; 3) disminuye la superficie necesaria en la filtración del efluente y mejora el rendimiento de los filtros, y 4) en el tratamiento químico, el amortiguamiento de las cargas aplicadas, mejora el control de la dosificación de reactivos y la fiabilidad del proceso. Aparte de la mejora del rendimiento de la mayoría de operaciones y procesos de tratamiento, la homogeneización del caudal es una opción atractiva para incrementar la capacidad de las plantas de tratamiento que se encuentran sobrecargadas,

por ser más económica la instalación de un tanque de homogeneización que aumentar la capacidad de todas las instalaciones.

Parámetros de diseño

- a) Localización de las instalaciones de homogeneización: La localización más conveniente de las instalaciones de homogeneización debe ser determinada en cada caso particular. Dado que la localización óptima variará con el tipo de tratamiento y las características de la red de alcantarillado y del agua residual, es preciso hacer un estudio detallado de las diversas posibilidades. En algunos casos puede ser interesante situar la homogeneización después del tratamiento primario y antes del tratamiento biológico, ya que ello origina menos problemas con el lodo y las espumas. Si se sitúan las instalaciones de homogeneización antes de la sedimentación primaria y del tratamiento biológico, el proyecto debe tener en cuenta la provisión de un grado de mezclado suficiente para prevenir la sedimentación de sólidos y las variaciones de concentración, así como de dispositivos de aeración para evitar problemas de olores.

- b) Volumen necesario del tanque de homogeneización: El volumen del tanque es importante ya que no debe ser rebasado ni debe quedar vacío. En la práctica, el volumen del tanque de homogeneización debe ser superior al determinado teóricamente para tener en cuenta los siguientes factores:
 - La operación continua de los equipos de aeración y mezclado no permitirán un vaciado total, aunque pueden construirse estructuras especiales.
 - Debe tenerse en cuenta un volumen adicional para hacer frente a los imprevistos que puedan producirse por cambios no esperados del caudal diario.

A pesar de que no puede darse ningún valor fijo, el volumen adicional puede variar entre el 10 y el 20% del valor teórico (Metcalf-Eddy, 2003).

- c) Necesidades de mezclado y aire: A fin de que el funcionamiento sea satisfactorio, es preciso disponer de sistemas de aeración y mezclado adecuados. El equipo de mezclado debe dimensionarse para mantener homogéneo el contenido del tanque y prevenir la deposición de sólidos en el mismo. Para minimizar las exigencias del mezclado, las instalaciones de desarenado deben situarse antes de los tanques de homogeneización siempre que sea posible. La aeración se requiere para evitar el desarrollo de condiciones sépticas en el agua residual. Para mantener las condiciones aerobias, la cantidad de aire a suministrar varía entre 0.01 y $0.015 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ min}$ (Metcalf-Eddy, 2003).

Dado que puede ser necesario proceder al vaciado periódico de los tanques de homogeneización, los aeradores deben equiparse con soportes o campanas de aspiración que les permitan descansar sobre el fondo del tanque sin sufrir daño alguno.

- d) Bombas y control del bombeo: La homogeneización del caudal impone una carga adicional dentro de la planta de tratamiento. Dependiendo de la topografía local, puede ser posible vaciar por gravedad el tanque, sin embargo en general, la carga necesaria para el funcionamiento hidráulico de la planta no puede conseguirse por gravedad, y son necesarias las instalaciones de bombeo. El bombeo puede preceder o seguir a la homogeneización del caudal. En algunos casos, se necesitará el bombeo tanto del caudal de agua residual cruda como del caudal homogeneizado.

En aquellos casos en que la descarga por gravedad desde el tanque de homogeneización sea posible, es preciso instalar algún sistema de regulación de caudal de control automático. Cuando exista un sistema de bombeo debe dotarse al mismo de la instrumentación necesaria para controlar el caudal homogeneizado preseleccionado. Independientemente del método de descarga utilizado, la salida del tanque debe incorporar un medidor de caudal para controlar el caudal homogeneizado.

Análisis de los parámetros de diseño

Los parámetros que se han mencionado, son los que requieren especial atención para el buen funcionamiento de esta unidad. En resumen los principales son:

- Volumen de diseño, es decir que el caudal para el que fue diseñado no sea superado.
- Cantidad de oxígeno necesario, aquél que asegure un buen mezclado.
- Bombas, la potencia de las bombas debe ser suficiente, así como considerarse la instrumentación para el control de caudal.

3.2.3 Desarenador

La misión de los desarenadores es separar las arenas, las cenizas y cualquier otro material pesado que tenga velocidad de sedimentación o peso específico superior a la de los sólidos orgánicos putrescibles del agua residual. Los desarenadores deberán proteger los equipos mecánicos móviles de la abrasión y desgaste innecesarios; reducir la formación de depósitos pesados en las tuberías, canales y conductos, y la frecuencia de limpieza de los digestores como resultado de excesivas acumulaciones de arena en tales unidades.

Existen dos tipos generales de desarenadores: de flujo horizontal y aerado.

- a) Desarenador de flujo horizontal: El flujo atraviesa el desarenador en dirección horizontal controlando la velocidad del flujo mediante la geometría de la instalación, o mediante el

uso de secciones de control que cuentan con vertedores especiales situados en el extremo de aguas abajo del tanque para controlar el caudal de salida.

- b) Desarenador aerado: Consiste en un tanque de aeración en el que el flujo atraviesa en forma de espiral, la velocidad es controlada por la geometría del tanque y la cantidad del aire suministrado al mismo. Por lo general estos tanques se proyectan para proporcionar tiempos de retención de tres minutos a caudal máximo.

La velocidad de la rotación transversal o la agitación determinan el tamaño de las partículas de peso específico dado que serán eliminadas. La cantidad de aire se puede ajustar fácilmente, con el debido ajuste, se obtendrá una eliminación de casi el 100% (Metcalf-Eddy, 2003).

En resumen, las diferencias entre los desarenadores de flujo horizontal y aerados, son las de la tabla 3.3:

Tabla 3.3. Diferencias de desarenadores.

	De flujo horizontal	Aerados
Diferencias	- No tiene aeradores. - Tiempo de retención de 45 a 90 s.	- Tiene aeradores. - Tiempo de retención de 2 a 5 min.
Ventajas y desventajas	- Bajo consumo de energía.	- Consume mayor energía.

Operación y mantenimiento

Se necesita un control diario del tanque desarenador, especialmente de la arena sedimentada. Estos productos deben transportarse inmediatamente a los lugares previstos para los depósitos.

Las instalaciones mecánicas (bombas, rastras, compresores, dispositivos de levantamiento) tienen que mantenerse conforme a las recomendaciones de los fabricantes. En el caso de tanques desarenadores en serie, el control de las diferentes unidades se efectúa manualmente por medio de compuertas o automáticamente. Una regulación automática puede realizarse en función del caudal (medidor de caudal). La velocidad de escurrimiento en el tanque desarenador se mide con un flotador a una distancia determinada.

Análisis de los parámetros de diseño

En el caso del desarenador, por tratarse de una operación de sedimentación, una de las principales variables de control es la velocidad con la que el flujo atraviesa el tanque, ésta será regulada mediante un caudal y un área establecidas. Se puede decir que el éxito de la unidad depende de estos parámetros.

Otros factores a considerar es la cantidad de arena que será sedimentada, dependiendo del influente, así como verificar que ésta cantidad es la óptima de diseño.

3.2.4 Cárcamo de bombeo

Su función es bombear el agua hacia el siguiente sistema de tratamiento. El diseño de este de cárcamo es muy especial ya que en él se encuentran dos bombas sumergibles que trabajan por paro y arranque que sirven para el bombeo, y dos bombas sumergibles de menor potencia que trabajan por tiempos que sirven como un pre-tratamiento ya que su función primordial es la de aerar el sistema. El cárcamo de bombeo se encuentra dividido en dos partes por medio de una mampara; en la primer mampara es donde se lleva a cabo la aeración y por ende la homogenización de las aguas residuales, la segunda mampara sirve para el bombeo y esto ocurre cuando el agua residual alcanza los electroniveles que le indican el encendido de la bomba.

Evaluación del sistema de bombeo

Un sistema de bombeo comúnmente es evaluado marcando el punto de operación en la curva característica correspondiente. Esta evaluación considera además los siguientes aspectos:

a) Condiciones físicas que afectan la operación del sistema de bombeo:

- Altura de las aguas residuales
- Pérdidas por fricción en tuberías de succión y descarga
- Eficiencia de bombeo
- Eficiencia del motor
- Influyente de la planta

b) Características de la carga con la que la bomba está funcionando:

- Carga estática: Diferencia de elevación entre la descarga y la succión
- Carga dinámica total: Carga estática + Pérdidas por fricción

c) Características de diseño del motor y potencia de la bomba comparadas con las de operación.

Mantenimiento

- Contar con un inventario de piezas de repuesto completo.
- Reparar el concreto deteriorado y las juntas de unión.
- Revisar regularmente el control de la ventilación y los sistemas de control de olores para su correcto funcionamiento.

- Revisar las bombas de sonidos inusuales de operación, como rechinidos que pueden indicar falta de lubricación, golpes que podrían indicar componentes rotos o sueltos, sonidos rápidos (como grava golpeando superficie metálica) acompañado por vibración de la bomba, lo que puede indicar cavitación.
- Registrar las lecturas diarias de los tiempos de bombeo de los medidores de tiempo. Estas pueden servir para una revisión del flujo de la planta y para programar el trabajo de mantenimiento.

Análisis de los principales parámetros

Los factores importantes a analizar en las bombas son la potencia y la eficiencia que proporcionará.

3.2.5 Dispositivos para la medición de caudal

Los principales dispositivos de medida de caudales son:

- a) Aforador Venturi de caudal constante: Consiste en un estrechamiento de sección rectangular practicado en el canal y cuya longitud es tres veces su ancho y en el extremo aguas abajo lleva una pantalla vertical móvil que puede fijarse a distintas elevaciones, puede funcionar descargando a superficie libre cuando el tirante aguas arriba es menor que la abertura, o bien como orificio, cuando dicho tirante es mayor que la abertura.

Funcionando a superficie libre esta estructura puede dar gran precisión. Los parámetros involucrados en la operación de este sistema son el caudal, el ancho del aforador y el tirante aguas arriba.

Cuando funciona como orificio, se obtienen buenos resultados cuando el ahogamiento es menor de 50%. Para este caso los parámetros son los mismos además de la abertura de la pantalla.

- b) Aforador Parshall: El aforador Parshall es una estructura hidráulica que permite medir la cantidad de agua que pasa por una sección de un canal. Se pueden distinguir cuatro partes características: transición de entrada, sección convergente, garganta, y sección divergente.

En la transición de entrada, el piso se eleva sobre el fondo original del canal, con una pendiente suave y las paredes se van cerrando, ya sea en línea recta o circular. En la sección convergente, el fondo es horizontal y el ancho va disminuyendo. En la garganta el piso vuelve a bajar para terminar con otra pendiente ascendente en la sección divergente. En cualquier parte del aforador, desde el inicio de la transición de entrada hasta la salida, el aforador tiene una sección rectangular.

Fundamentalmente, el aforador es una reducción de la sección que obliga al agua a elevarse o a remansarse y volver a caer hasta la elevación que se tenía sin la presencia del aforador. En este proceso se presenta una aceleración del flujo que permite establecer una relación matemática entre la elevación del agua y el caudal.

- c) Vertedor de pared delgada: rectangular y triangular: Un vertedor de pared delgada es una barrera (generalmente una placa de plástico o de metal) sobre la cual se hace pasar el fluido que se quiere medir. Los tipos más comúnmente utilizados son los vertedores rectangulares y triangulares. El caudal se determina midiendo la carga en la cresta del vertedor (en vertedores rectangulares) o sobre el vértice de la abertura del vertedor (en vertedores triangulares). La carga es la diferencia de cotas entre la cresta y la superficie del agua en el canal en un punto aguas arriba, tomado si ello es posible más allá del comienzo de la superficie curva del líquido. El caudal se determina a partir de una curva de calibración en la cual se representa gráficamente el caudal en relación con la carga observada.

Debe haber un tanque de amortiguación o un canal de acceso aguas arriba para calmar cualquier turbulencia y lograr que el agua se acerque al vertedor lenta y suavemente.

Para tener mediciones precisas el ancho del canal de acceso debe ser equivalente a 8 veces el ancho del vertedor y debe extenderse aguas arriba 15 veces la profundidad de la corriente sobre el vertedor (Sotelo Avila, 1995).

El vertedor triangular es preferido cuando las descargas son pequeñas (menos de 6 L/s), porque la sección transversal de la lámina vertiente muestra de manera notoria la variación en altura, se obtiene mayor precisión pues la presión varía con la altura, dándose un gran gradiente de velocidad entre la parte inferior del triángulo y la superior (Sotelo Avila, 1995).

Teniendo en cuenta las características de todos estos sistemas, las principales ventajas y desventajas de los medidores de caudal mencionados se muestran en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Diferencias entre aforadores.

	Vertedores	Venturi	Parshall
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Simple y sencillo de construir. 	<ul style="list-style-type: none"> - No tiene gran pérdida de carga. - Es de construcción y operación sencilla. - Puede funcionar también como obra de toma. - Requiere un tramo de entrada corto. 	<ul style="list-style-type: none"> - Opera con pérdidas de carga relativamente bajas. - Es poco sensible a la velocidad de llegada. - Buena precisión. - No presenta azolves. - Es difícil alterar la medición.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Gran pérdida de carga. - Problemas de depósito de azolves. - La utilización de vertedores de pared delgada está limitada generalmente a laboratorios, canales pequeños y corrientes que no lleven escombros y sedimentos. La estructura delgada está propensa a deteriorarse y con el tiempo la calibración puede ser afectada por la erosión de la cresta. 	<ul style="list-style-type: none"> - Costo de instalación elevado. 	<ul style="list-style-type: none"> - Debe construirse de acuerdo a medidas estándar. - No puede combinarse con estructuras de derivación o control.

3.2.6 Sedimentador primario

La sedimentación es la separación de las partículas suspendidas más pesadas que el agua, mediante la acción de la gravedad. Esta operación se utiliza para la eliminación de arena, materia particulada, flóculos químicos (cuando se utiliza la coagulación química) y para la concentración de sólidos en los espesadores del lodo.

Para la operación de sedimentación primaria, se utilizan los siguientes tanques:

- a) Tanque rectangular (figura 3.7): El sentido del flujo es horizontal, la colecta del lodo está en la entrada del agua residual. El raspado de lodos se efectúa con un puente de rastra y una rastra de cadena, y caen dentro de una tolva.

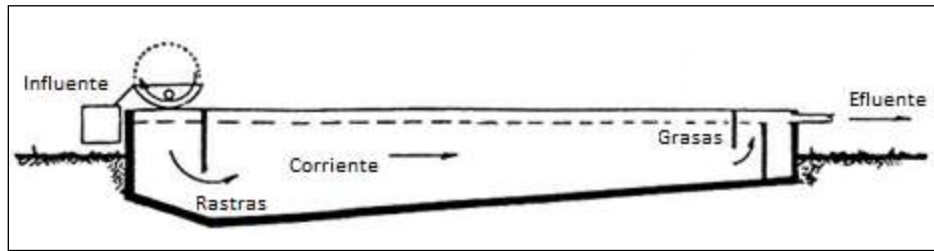


Figura 3.7. Tanque de sedimentación rectangular (Vater, 1992).

- b) Tanque circular (figura 3.8): El sentido del flujo es radial-horizontal, la tolva de lodos se sitúa en el centro del tanque debajo de la admisión de las aguas residuales. El desalojo de lodos se opera con rastras giratorias (con placas o dispositivos).

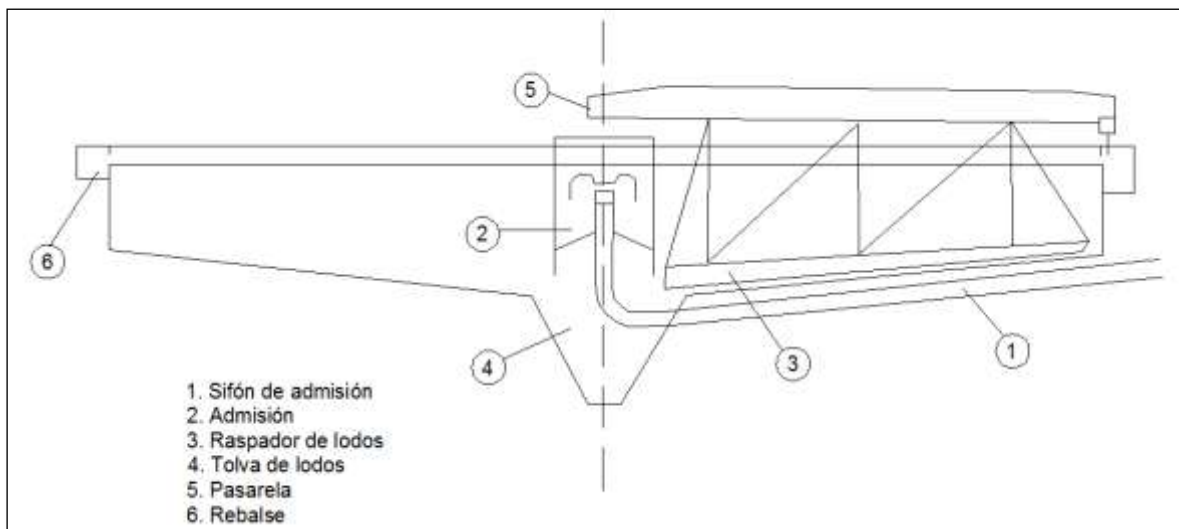


Figura 3.8. Tanque de sedimentación circular (Vater, 1992).

- c) Tanque cónico (figura 3.9): La circulación en el cono se efectúa en modo radial y vertical, de abajo hacia arriba. No es necesario una rastra de lodo, el vaciado de lodos se realiza por medio de sobrepresión hidráulica.

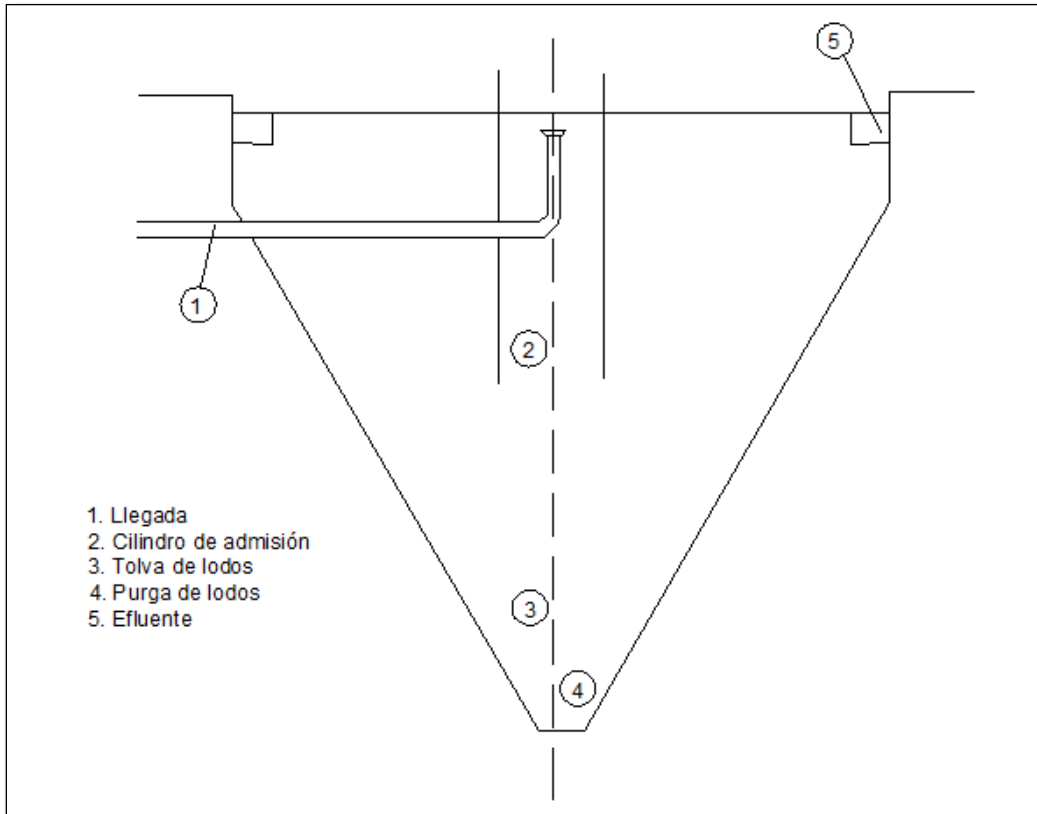


Figura 3.9. Tanque de sedimentación cónico (Vater, 1992).

Un sedimentador primario es para la remoción de sólidos floculentos, este se analiza mediante las leyes clásicas formuladas por Newton y Stokes. La ley de Newton proporciona la velocidad final de una partícula al igualar el peso efectivo de la partícula con la resistencia por fricción o fuerza de arrastre.

La fuerza de arrastre por unidad de área depende de la velocidad y el diámetro de la partícula, y la densidad y viscosidad del fluido.

Además, involucra un coeficiente de arrastre que adopta diversos valores según el régimen de corriente que rodea a la partícula, sea laminar o turbulento, en función del número de Reynolds.

En el proyecto de tanques de sedimentación, el procedimiento normal es seleccionar una partícula con una velocidad final de sedimentación V_c y diseñar el tanque de modo que queden eliminadas las partículas que posean una velocidad final igual o menor que V_c . La producción de agua clarificada por unidad de tiempo es:

$$Q = AV_c$$

Donde A es el área superficial del tanque de sedimentación.

Los tiempos de retención típicos de un sedimentador primario son de 1 a 2 h, con lo que sedimentan del 50 al 65% de los sólidos suspendidos y del 25 al 40% de la DBO. Se espera una remoción después del tratamiento primario de alrededor de 35% de la DBO y el 60% de sólidos suspendidos (Masters, 2007).

Operación y mantenimiento

Antes de ponerlos en marcha, los depósitos deben ser vaciados. Las rastras de lodo tienen que probarse con el tanque vacío. El nivel de los vertedores de desagüe tendrá que ser regulado en función del caudal a tratar. Igualmente las rastras de lodos flotantes (superiores).

Los trabajos cotidianos en los sedimentadores primarios son:

- Evacuación de lodos y de materias flotantes
- Control de rastras y de las compuertas
- Limpieza del cárcamo de recolección de lodos
- Limpieza de los dispositivos de entrada y los vertedores de salida.

Análisis de los principales parámetros

Los parámetros importantes en este proceso son:

- Fuerza de arrastre, que depende principalmente de la velocidad de la partícula, el diámetro y la viscosidad del fluido.
- Velocidad final de la partícula, al igual que la fuerza de arrastre, ésta tiene relación con la viscosidad del fluido; el diámetro y la densidad de la partícula.
- Carga superficial o velocidad de sedimentación.
- Tiempo de retención hidráulico.

3.2.7 Sedimentador secundario

La función del sedimentador secundario es la de separar los lodos biológicos del licor mezclado. Esta separación de sólidos es el último paso, antes de la descarga requerida para la producción de un efluente estable, bien clarificado, y con bajo contenido en DBO, DQO y sólidos totales.

Para diseñar correctamente los tanques de sedimentación secundaria se deben tomar en cuenta los siguientes factores (Metcalf-Eddy, 2003):

a) Tipos de sedimentadores secundarios.

Los tipos de tanques de sedimentación secundaria más empleados en el tratamiento de agua residual son los tanques circulares y rectangulares. También existen tanques cuadrados, pero no son tan eficaces en la retención de sólidos, y por esta razón no son tan comunes.

En los tanques rectangulares se recomienda que la longitud total del tanque no exceda de 10 a 15 veces su profundidad (Metcalf-Eddy, 2003).

Los tanques circulares tienen diámetros de entre 10-40 m, teniendo en cuenta que el radio no debe exceder en 5 veces la profundidad del agua. Existen dos tipos de tanques circulares: 1) de alimentación central, y 2) de alimentación periférica. Ambos utilizan mecanismos rotatorios para transportar y evacuar el lodo del fondo del sedimentador (Metcalf-Eddy, 2003).

b) Carga superficial y cargas de sólidos

La carga de sólidos de un tanque de sedimentación secundaria se puede calcular dividiendo los sólidos totales aplicados entre la superficie del tanque.

La carga superficial se puede calcular dividiendo el caudal entre la superficie del tanque.

c) Profundidad del agua

La profundidad del agua se suele medir en los muros perimetrales de los sedimentadores. La profundidad es un factor que afecta a la eficiencia en la eliminación de sólidos y en la concentración de lodos de recirculación. Los tanques de mayor profundidad presentan la ventaja de una mayor flexibilidad de explotación y un mayor margen de seguridad frente a cambios en el proceso de lodos activados.

d) Reparto de caudales

En los casos en los que las capacidades de los diferentes tanques no son iguales, el caudal se debe repartir proporcionalmente a las áreas superficiales de los diferentes tanques. Los métodos de reparto de caudales a los tanques de sedimentación secundaria incluyen el uso de vertedores, válvulas de control de caudal, reparto por simetría hidráulica, y control mediante compuertas u orificios de alimentación.

e) Diseño de la entrada del tanque

La entrada del agua en el tanque a gran velocidad puede aumentar la formación de corrientes de densidad y la resuspensión del lodo sedimentado, provocando un rendimiento poco satisfactorio

del sedimentador. Los dispositivos de entrada de agua al tanque deben disipar la energía del agua entrante, distribuir uniformemente el caudal, eliminar las corrientes de densidad y minimizar las perturbaciones a la capa de lodos.

f) Ubicación y carga sobre los vertedores

La ubicación óptima de los vertedores para la obtención de un efluente bien clarificado se sitúa entre las dos terceras partes y las tres cuartas partes de radio medido desde el centro. Las cargas sobre el vertedor empleadas en tanques de grandes dimensiones no deben superar los $375 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{día}$ a caudal máximo (Metcalf-Eddy, 2003).

g) Eliminación de espumas

Generalmente, en los sedimentadores secundarios se produce muy poca espuma; no obstante, se pueden presentar situaciones en las que aparecen materias flotantes que se deben eliminar. Los equipos de recogida de espumas incluyen las cajas flotantes con rampa de rascado, el canal desnatador rotativo y tuberías ranuradas.

h) Velocidad del flujo ascendente (m/h).

Para la eficacia de la separación sólido-líquido en el tanque de sedimentación, es necesario que la tasa de aumento del líquido (la velocidad de flujo ascendente) sea significativamente menor que la velocidad natural de sedimentación de los sólidos. Si este no es el caso puede ocurrir el arrastre de sólidos con la descarga del efluente final. La velocidad de flujo ascendente se calcula dividiendo el flujo total a través del tanque (m^3 / h) por la superficie del tanque (m^2).

La velocidad de flujo ascendente deseable depende de la naturaleza de las partículas a eliminar. Para resultados satisfactorios, la velocidad de flujo ascendente en un sedimentador secundario debe ser normalmente de 0.5 a 1 m / h (Metcalf-Eddy, 2003).

Operación y mantenimiento

Para los sedimentadores secundarios las consignas de limpieza y de vigilancia son las mismas que para los sedimentadores primarios.

Análisis de los parámetros de control

Un sedimentador secundario es muy similar a un sedimentador primario, por lo tanto sus variables serán similares, con la diferencia de poner más énfasis al lodo. Los factores a considerar son:

- Características de lodos.
- Eliminación de espumas. Es importante que de presentarse este problema, sea atendido mediante los mecanismos necesarios como ya se ha mencionado.
- Sedimentabilidad del lodo. Influye sobre todo el índice volumétrico de lodos, la concentración de éstos, y nuevamente la velocidad es un factor muy importante; un factor a considerar en la velocidad es revisar la entrada al tanque, ya que puede estar entrando a mayor velocidad de la que debería.

3.3 Procesos unitarios

3.3.1 Sistema de Lodos Activados

El tratamiento biológico de aguas residuales mediante el proceso de lodos activados se lleva a cabo, normalmente, utilizando un diagrama de flujo como el que se muestra en la figura 3.10.

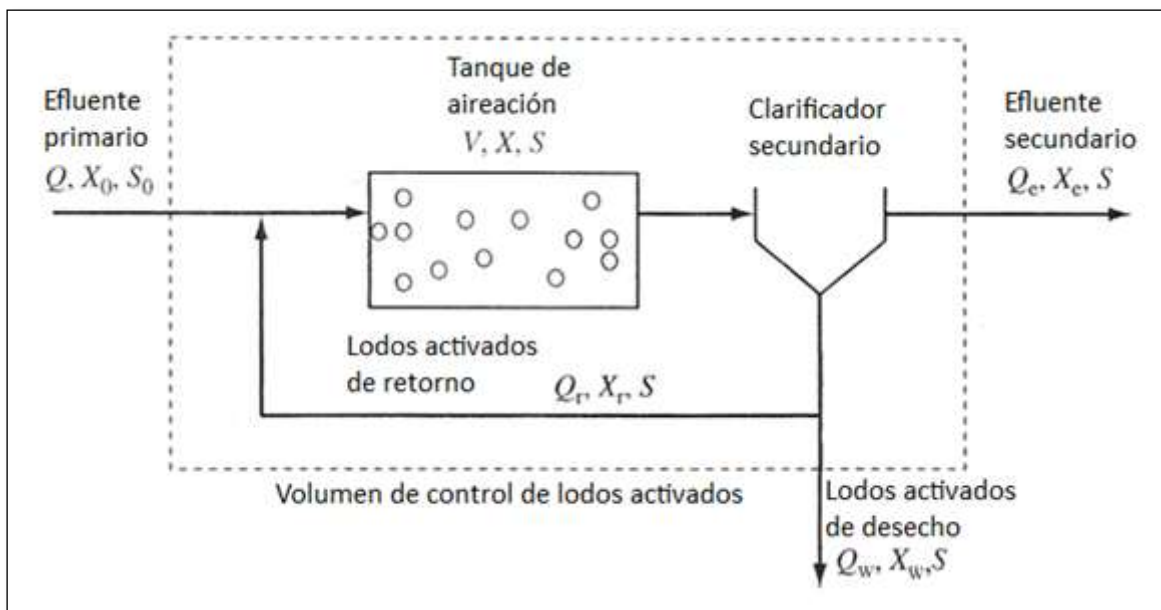


Figura 3.10. Volumen de control y definición de parámetros usados para el análisis de un sistema de tratamiento de lodos activados (Masters, 2007).

Donde:

Q: Caudal de influente

X_0 : Concentración de microorganismos del influente

S_0 : Concentración de sustrato en el efluente del sedimentador primario

V: Volumen del tanque de aeración

X: Concentración de microorganismos en el tanque de aeración

S: Concentración de sustrato en el tanque de aeración

Q_w : Caudal de lodo a purgar del reactor biológico
 X_w : Concentración de microorganismos de lodos activados de desecho
 Q_r : Caudal de lodos activados de retorno
 X_r : Concentración de microorganismos de lodos activados de retorno
 Q_e : Caudal de efluente
 X_e : Concentración de microorganismos de efluente

El residuo orgánico se introduce en un reactor donde se mantiene un cultivo bacteriano aerobio en suspensión, el contenido del reactor se denomina licor mezclado. El ambiente aerobio en el reactor se consigue mediante el uso de difusores o aeradores mecánicos que, a su vez, sirven para mantener el licor mezclado en un régimen de mezcla completa. Tras un período determinado de tiempo, la mezcla de las nuevas bacterias con las viejas se conduce a un tanque de sedimentación donde las bacterias se separan del agua residual tratada. Una parte de las bacterias sedimentadas es recirculada para mantener la concentración deseada de organismos en el reactor, mientras que otra es purgada del sistema. La fracción purgada corresponde al crecimiento de bacterias, asociado a un agua residual particular. El nivel al cual se debe mantener la masa bacteriológica depende de la eficiencia deseada del tratamiento y de otras consideraciones referentes a la cinética del crecimiento.

a) Métodos de aeración

Los métodos disponibles para la aeración en los procesos de los lodos activados se pueden clasificar en términos generales, como sistemas de aeración por burbujas o sistemas de difusión, sistemas de aeración mecánica y sistemas combinados que usan tanto la aspersion por aire como la agitación mecánica.

El requisito principal que debe cumplir un sistema de aeración es que debe ser capaz de transferir oxígeno al licor mezclado a una tasa equivalente al pico de requerimiento de oxígeno, expresado como la masa de oxígeno transferida por unidad de volumen por unidad de tiempo ($\text{kg O}_2/\text{m}^3$ por unidad de tiempo).

Sistemas de aeración por burbujas: En los sistemas de aeración por burbujas, la transferencia de oxígeno se efectúa de tres maneras por la acción de burbujas que se forman dentro del licor mezclado: se inyecta aire comprimido a través de toberas o perforaciones llamadas aspersores; a través de medios porosos llamados difusores, o bien por disolución de aire a presión en una parte del líquido, el que luego se libera dentro del cuerpo principal de licor mezclado para que haga efervescencia. La aspersion produce las burbujas más gruesas, y el aire disuelto las más finas, pero la terminología para el tamaño de las burbujas producidas por un sistema resulta inexacta. Se puede decir que las burbujas finas tienen un diámetro menor de aproximadamente 1.5 a 2 mm, y las burbujas gruesas son las mayores de 3 a 5 mm de diámetro. Las burbujas medias se encuentran entre estos dos rangos (Vater, W., 1992).

Aeración mecánica: La aeración mecánica se consigue utilizando la energía mecánica para provocar la ruptura del agua en gotas. El aumento de la transferencia del oxígeno, se logra por incremento en el área de la interfase aire-agua.

Los sistemas de aeración mecánica son sumamente sencillos, pero no se encuentran entre las técnicas más frecuentes. Estos aeradores funcionan agitando vigorosamente el agua del influente con mezcladoras mecánicas, pueden ser de eje vertical y horizontal.

En el caso del vertical, la transferencia del oxígeno se logra por la exposición de gotas de agua a la atmósfera, por turbulencia del agua y por arrastre de aire. En el horizontal la transferencia de oxígeno es por turbulencia superficial, por arrastre de aire y por bombeo horizontal. Estos pueden ser eléctricos o a combustión.

Para realmente ser eficientes, los aeradores deben cumplir con:

- Garantizar la distribución uniforme de oxígeno en todo el volumen en cuestión, lo que se identifica como dispersión.
- Un buen grado de mezcla en el tanque (biomasa, oxígeno, nutrientes, etc.). Puede decirse que para tener una uniformidad recomendada, la concentración de sólidos suspendidos no varíe más de un 10% por exceso o por defecto, de la concentración media en cualquier punto del tanque y que no ocurra un significativo depósito en el fondo de éste (Metcalf-Eddy, 2003).

Estos sistemas pueden fácilmente reconvertirse según las instalaciones de almacenamiento existentes, donde pueden agregar capacidad de tratamiento donde no lo existe. Los sistemas de aeración mecánica permiten eliminar los contaminantes más volátiles, pero están limitados a porcentajes de eliminación entre el 50 y el 80%, dependiendo de las condiciones (Metcalf-Eddy, 2003).

b) Parámetros de operación

Concentración de los lodos: La concentración de los lodos se puede expresar como una concentración de sólidos en suspensión, de modo que la concentración en el tanque de aeración se puede mencionar en términos del valor de los sólidos suspendidos en el licor mezclado o SSLM. Sin embargo, algunos de los sólidos en suspensión pueden ser inorgánicos, y un parámetro más usual es el contenido del material combustible presente, conocido como los sólidos suspendidos volátiles, o SSV, como una indicación de la concentración microbiana. La concentración de los sólidos en la etapa de aeración se expresa entonces como sólidos suspendidos volátiles en el licor mezclado o SSVLM. Esto indicará la cantidad de materia orgánica presente, pero establece distinción entre el material bioquímicamente activo y el material inerte presente en los lodos. La proporción de SSV debida a los microorganismos activos dependerá de las condiciones de operación de la planta y de la cantidad de SSV en el agua residual influente.

Tiempo de residencia de los lodos: Se define como el total de sólidos en los lodos del sistema, dividida por la tasa de pérdida de sólidos.

Influencia del valor del pH: Las bacterias pueden vivir y reproducirse en una gran gama de valores de pH; sin embargo, la mayoría de las bacterias prefiere un valor de pH cercano a 7. Cada bacteria posee un valor de pH óptimo en el cual se reproduce rápidamente. Por lo común, la reproducción es buena cuando no se alcanzan valores de pH de 8.5, por encima de este valor, la actividad microbiana disminuye muy rápido para detenerse completamente al alcanzar un valor pH por encima de 10. Para un valor menor (inferior a 6) la actividad bacteriana disminuye igualmente y los organismos que prefieren valores de pH ácidos son favorecidos (levaduras, mohos, etc.). En general, las aguas residuales tienen un valor pH alrededor de 7, dicho valor no sufre normalmente grandes modificaciones durante el tratamiento biológico (Metcalf-Eddy, 2003).

Influencia de la temperatura: Para un proceso de lodos activados se recomienda mantener una temperatura entre 13 a 38°C en el reactor (Eckenfelder, 1995).

Tasa de retorno de lodos activados. Para un sistema convencional de lodos activados, la tasa de retorno de lodos activados es generalmente del 25 al 75% del influente de las aguas residuales. Cambios en la calidad de lodos activados requieren distintas tasas de retorno de lodos activados, debido a las características de sedimentación de los lodos (Metcalf-Eddy, 2003).

c) Control del proceso

El registro continuo e interpretación de los parámetros de control relevantes, proporciona la base para la solución de problemas con éxito. Los aspectos esenciales son los siguientes:

Carga de DBO o DQO (kg/día). La depuración biológica de las aguas residuales se diseña y opera sobre la base de la demanda de oxígeno (DBO o DQO), la de ingreso y la de salida. Es esencial contar con información precisa sobre la concentración del influente de DBO (o DQO). Aunque la prueba de DBO reproduce con mucha precisión el proceso biológico, su utilidad práctica se limita en cierta medida por el hecho de que el resultado tarda 5 días para determinarla, por esta razón la prueba de DQO se puede sustituir para el control del proceso diario. Sin embargo, la proporción de DBO a DQO debe determinarse con precisión y regularidad. Por otro lado, la relación DBO/DQO debe ser mayor a 0.6 para asegurarse que un sistema de lodos activados es el adecuado.

El valor de DBO (mg/L) en el influente se puede utilizar para calcular la carga total de DBO por día a tratar. Esto se hace simplemente multiplicando la DBO en mg/L en el volumen diario de efluente en metros cúbicos (m³) y dividiendo el producto por 1000, es decir:

$$kg \frac{DBO}{día} = \frac{DBO \left(\frac{mg}{L} \right) \times Vol. diario \left(\frac{m^3}{día} \right)}{1000}$$

Sólidos suspendidos en el licor mezclado (mg/L). Es necesario que este parámetro esté registrado en una base de datos diaria. Es esencial para el cálculo de la carga F / M (y edad del lodo). En lugar de este parámetro se puede utilizar también el parámetro alternativo sólidos suspendidos volátiles en el licor mezclado (SSVLM), este se refiere a la fracción volátiles u orgánicos de los sólidos suspendidos del licor mezclado (SSLM) y es por lo general alrededor del 80% del valor del SSLM (Metcalf-Eddy, 2003).

Relación alimento-microorganismos F/M (kg DBO / kg SSLM / día). Este parámetro determina el grado probable de remoción de DBO que se logrará. Cuanto más baja sea la carga F/M mayor será la eficiencia de remoción de materia orgánica como DBO. Sin embargo, si la relación F/M es demasiado baja, pueden surgir ciertos problemas de operación.

Por lo general, F/M se encuentra en el rango de 0.05 a 0.1 (kg DBO / kg SSLM / día) para eficiencias de remoción de DBO de alrededor de 95 a 99%. Entre 0.1 y 0.2, si la eficiencia de remoción es aproximadamente de 90 a 95% (Masters, 2007).

Este parámetro se utiliza habitualmente en la práctica como parámetro de diseño y control, se define como (Metcalf-Eddy, 2003):

$$F/M = \frac{S_0}{\theta X} = \frac{QS_0}{VX}$$

Donde S_0 = concentración de sustrato en el influente, mg/L

θ = tiempo de retención hidráulica, d.

X = Concentración de microorganismos en el reactor, kg SSLM.

Edad de lodos (tiempo medio de residencia celular) (día). La edad del lodo o tiempo medio de residencia celular (TMRC) puede ser definida como la masa de sólidos (SSLM) en el tanque en cualquier momento, dividida por la masa de sólidos nuevos que se generan cada día. Cuanto mayor sea la F/M, menor será la edad de los lodos, y viceversa. Esto se debe a nueva biomasa que se produce a un ritmo acelerado cuando hay gran cantidad de alimento, y se producirá a un ritmo más lento si el suministro de alimentos se reduce. Por esta razón, la edad del lodo se puede considerar como una medida de la tasa de rotación de los sólidos en la planta.

La edad del lodo es alrededor de 20 a 30 días en las plantas de lodos activados que operan a alta eficiencia de remoción de DBO (> 95%) (Metcalf-Eddy, 2003). Sin embargo, pueden darse problemas de separación sólido-líquido, si el lodo es demasiado viejo.

Para un sistema como el de la Figura 3.3, el tiempo medio de residencia celular (θ_c) es (Metcalf-Eddy, 2003):

$$\theta_c = \frac{VX}{Q_w X + (Q - Q_w)X_e}$$

Donde V = volumen del reactor

X = Concentración de microorganismos en el reactor, kg SSLM.

Q = caudal influente

Q_w = caudal de líquido que contiene las células biológicas a purgar del sistema (en este caso del reactor)

X_e = concentración de microorganismos en el efluente de la unidad de sedimentación.

En un sistema con una unidad de sedimentación que funciona adecuadamente, la cantidad de células en el efluente es muy pequeña, y esta ecuación puede simplificarse hasta llegar a:

$$\theta_c \cong \frac{V}{Q_w}$$

La tabla 3.5 muestra valores típicos de F/M y edades del lodo de tratamiento de aguas residuales.

Tabla 3.5. Tiempos típicos de retención celular y de razón F/M para tratamiento de aguas residuales por el proceso de lodos activados (Masters, 2007).

Tiempo de retención celular (días)	Razón F/M (g DBO/g SSV día)
5	0.3
7	0.5
20	0.1
30	0.05

Oxígeno Disuelto (mg/L). En un sistema de aeración convencional, el oxígeno disuelto (OD) en el licor mezclado debe mantenerse entre 1-3 mg/L, siendo 2 mg/L el mínimo deseado.

Debe haber una instalación de monitoreo permanente del sistema de oxígeno disuelto que debe ser calibrada periódicamente. Lecturas por debajo de 1 mg/L deben considerarse con cautela ya que puede no haber oxígeno disuelto presente en tales circunstancias, si la unidad está fuera de calibración (Masters, 2007).

La cantidad de oxígeno que puede ser aportada por hora, para una temperatura del agua de 10°C se llama capacidad de oxigenación. Depende del sistema de aeración de la planta y se calcula con la fórmula (Metcalf-Eddy, 2003):

$$CO_c = K(C_s - c)$$

Donde CO_c = capacidad de oxigenación por unidad de tiempo, kg O₂ / m³ h

K = coeficiente para el sistema de aeración

C_s = valor de saturación del contenido de oxígeno, $\text{kg O}_2 / \text{m}^3$

c = contenido actual en oxígeno, $\text{kg O}_2 / \text{m}^3$

El valor de saturación es una constante para cierta temperatura y cierta presión atmosférica.

Necesidades de nutrientes. Los nutrientes principales que a menudo tienen que ser suministrados en forma química son el nitrógeno y el fósforo. El requisito mínimo está relacionado con la DBO del agua residual cruda (influyente). La proporción es de 100:5:1 (DBO: N: P) (Metcalf-Eddy, 2003).

También puede ser necesario suministrar una serie de micronutrientes (por ejemplo, metales traza como el cobre, manganeso, cobalto, selenio, etc.). Esto se presentaría para aguas industriales que han sido desionizadas para el uso de procesos. Los productos que contienen un balance de los micronutrientes para la adición a las plantas de tratamiento de aguas residuales están disponibles comercialmente.

Sedimentabilidad del cono (mL/L). Debe mantenerse un registro diario del volumen de los lodos de sedimentación en un cono Imhoff. Esto indica las tendencias de sedimentación de los lodos y es un sistema de alerta temprana para los problemas inminentes de separación sólido-líquido. No hay un valor universal óptimo de sedimentación en el cono, algunas plantas pueden operar de manera estable a valores tan altos como 800 a 900 mL/L, mientras que otras por lo general pueden tener valores de 300 a 400 mL/L, o inferior. Lo importante es la estabilidad, cualquier tendencia a aumentar repentina (asumiendo que el SSLM es constante) puede indicar un problema de operación del proceso (Da Cámara, 2000).

La sedimentabilidad de los lodos es una prueba muy simple, cuyos resultados proporcionan una información valiosa. La prueba se hace a los sólidos suspendidos del licor mezclado o a los lodos de retorno. La muestra se mezcla suavemente y se vacía en una probeta de 2 L. Se debe ser muy cuidadoso cuando la muestra sea agitada, ya que una agitación vigorosa puede romper los flóculos y hacer que la velocidad de sedimentación sea menor. Inmediatamente después de que la probeta se ha llenado hasta la marca de 2 L se empieza a registrar el tiempo y se considera como el 100% de sedimentabilidad. El volumen que ocupan los lodos se registra a intervalos regulares de tiempo, las lecturas se hacen durante 60 minutos. Después, los valores registrados se dividen entre 20 para convertir el volumen de los lodos en porcentaje de sólidos sedimentables. Con esto podemos realizar una gráfica (tiempo - % sólidos sedimentables) para la interpretación de los resultados. Los posibles casos y soluciones a seguir se presentan en el Capítulo 4.

Índice volumétrico de lodos (mL/g). El índice volumétrico de lodos se define como (Metcalf-Eddy, 2003):

$$IVL = \text{Sedimentabilidad del cono} \left(\frac{\text{mL}}{\text{L}} \right) / \text{SSLM} \left(\frac{\text{g}}{\text{L}} \right)$$

La prueba de sedimentabilidad del cono es un indicador un tanto subjetivo, ya que no tiene en cuenta la concentración de SSLM. El índice volumétrico de lodos es un intento de proporcionar una indicación más representativa. Para plantas de aguas residuales industriales, los valores a menudo están en el rango de 100 a 200 (mL/g) (Mihelcic, 2008), las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales tienden a tener menores valores.

Producción de exceso de lodos (kg/día). Se debe mantener un registro de la cantidad de sólidos del lodo excedente para ser removido de la planta cada día.

Consideraciones de mezcla. Donde se utilizan aeradores de superficie, la fuente de alimentación para la mezcla satisfactoria de los contenidos de aire en el tanque está por lo general en el rango de 15 a 30 W/m³, dependiendo de la geometría del tanque (Metcalf-Eddy, 2003). Para los sistemas de difusión de aire, hay muchos tipos de diseño y el fabricante debe ser consultado para comprobar la potencia con el aire (u oxígeno puro) necesario de abastecimiento.

Examen microscópico de lodos. Deben llevarse a cabo exámenes periódicos de muestras del licor mezclado utilizando un microscopio, con una potencia de magnificación de x100 a x200. Los principales aspectos a tener en cuenta son:

- Tamaño y forma de flóculos bacterianos
- Presencia de bacterias filamentosas
- Presencia de protozoarios (flagelados, ciliados)
- Presencia de rotíferos

Hay muchas otras especies que se pueden observar, pero lo anterior dará una indicación bastante fiable de la condición general de los lodos.

La figura 3.11 muestra valores representativos de los porcentajes de remoción de DBO, sólidos suspendidos, nitrógeno total y fósforo total del agua residual al pasar por la sedimentación primaria, sistema de lodos activados, y sedimentación secundaria.

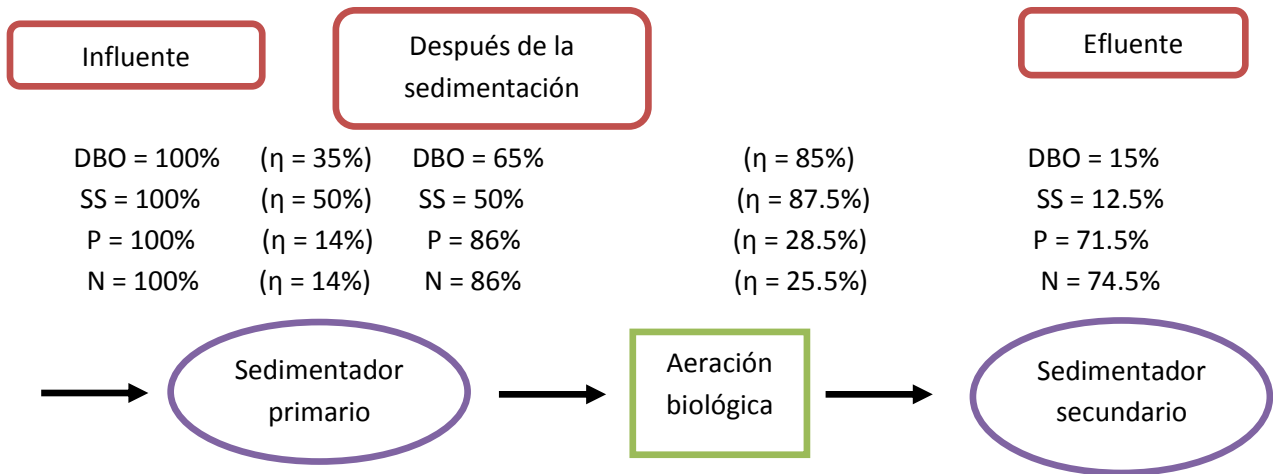


Figura 3.11. Concentraciones aproximadas de remoción por un sistema de lodos activados convencional (Masters, 2007).

Algunas modificaciones surgidas del proceso de lodos activados, se resumen en la tabla 3.6:

Tabla 3.6. Parámetros de diseño para los procesos de lodos activados (Metcalf-Eddy, 2003).

Modificación del proceso	Remoción de DBO ₅ , %	Tiempo de retención hidráulico, h	Θ _c , d	F/M, kg DBO ₅ aplicada kg SSVLM d	Carga volumétrica, kg de DBO ₅ aplicada/m ³ d	SSLM, mg/L
Convencional	>85	6-8	5-15	0.2-0.4	0.3-0.6	1500-3000
Aeración graduada			5-15	0.2-0.4	0.3-0.6	1500-3000
Reactor de mezcla completa	85-95	4-6	5-15	0.2-0.6	0.8-2	3000-6000
Contacto y estabilización	>80	1.5-3	5-15	0.2-0.6	1-1.2	1000-3000 4000-10000
Aeración prolongada	85-95	18-24	20-30	0.05-0.15	0.1-0.4	3000-6000
Aeración de alta carga	75-85	0.5-2.5	5-10	0.4-1.5	1.6-1.6	4000-10000
Sistemas de oxígeno puro	85-95	2-4	8-20	0.25-1	1.6-3.3	6000-8000

Análisis de parámetros de control de proceso

Son muchos los parámetros que intervienen en el proceso de lodos activados y muchos de ellos se encuentran interrelacionados, en resumen, los más importantes a controlar para evitar problemas son:

- pH: El pH debe ser óptimo para el desarrollo de los microorganismos, como ya se mencionó debe ser cercano a 7.
- Temperatura: Así como el pH, una temperatura adecuada favorece el crecimiento de microorganismos.
- Tiempo de retención: El tiempo de retención es de los factores más importantes, pues de este depende la degradación de materia orgánica dentro del sistema. Debe ser suficiente para lograr la remoción requerida, pero no debe ser excesivo aumentando las dimensiones del tanque.
- Tasa de utilización de sustrato: Este factor principalmente tiene que ver con la concentración de sustrato tanto en el efluente como en el influente.
- Concentración de microorganismos en el reactor: Este es otro de los factores más importantes a controlar, pues se debe tener establecido el valor que es óptimo para la presencia de microorganismos en el reactor.
- Relación alimento-microorganismos: Es una prueba que se debe estar haciendo constantemente para verificar la eficiencia del sistema.
- Capacidad de oxigenación.

3.3.2 Desinfección

La desinfección es el proceso unitario cuyo propósito es destruir o inactivar los organismos patógenos que pudieran estar presentes en el agua, principalmente aquellos causantes de enfermedades de transmisión oral. De manera general se puede decir que la desinfección se basa en la oxidación, proceso en el cual se liberan electrones. Los procesos de oxidación en el agua son procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes de ésta.

En este trabajo se toma la principal y más común forma de desinfección que es por medio de cloro. Los compuestos del cloro más comúnmente utilizados en las plantas de tratamiento de aguas residuales son el cloro gas (Cl_2), el hipoclorito de sodio (NaOCl), y el dióxido de cloro (ClO_2). Los hipocloritos de calcio y de sodio son los más frecuentemente usados en plantas de tratamiento de pequeño tamaño. El uso de dióxido de cloro en el tratamiento del agua residual no está bien definido; sin embargo, tiene algunas propiedades singulares (no reacciona con el amoníaco), y su aplicación puede aumentar en el futuro.

La tabla 3.7 indica las dosis de cloro requeridas. Se da un intervalo de valores de las dosis ya que éstas varían según las características del agua residual. Por esta razón siempre es factible y necesario realizar estudios experimentales en laboratorios para determinar las dosis óptimas de cloro.

Tabla 3.7. Dosis típicas de cloro para la desinfección (Metcalf-Eddy, 2003).

Procedencia del efluente	Intervalo de dosis, mg/L
Agua residual cruda (precloración)	6-25
Sedimentación primaria	5-20
Planta de precipitación química	2-6
Planta de filtros percoladores	3-15
Planta de lodos activados	2-8
Planta de filtros multimedio a continuación de lodos activados	1-5

El tiempo de contacto y el cloro residual son los dos factores principales para lograr la eliminación de las bacterias siempre que el resto de los factores permanezcan constantes. El tiempo de contacto viene especificado generalmente por la autoridad encargada del control y puede oscilar entre 15 y 45 minutos; siendo normal el uso de períodos de 15 minutos (Metcalf-Eddy, 2003). El cloro residual que es necesario mantener debe determinarse a partir de estudios en plantas en funcionamiento.

Los factores más importantes a considerar en el proyecto de las instalaciones de cloración son: 1) método de adición de cloro y logro de un buen mezclado, 2) diseño del tanque de cloración, 3) mantenimiento de la velocidad de transporte de sólidos, 4) inclusión de un bypass del tanque para situaciones de cloración de emergencia y 5) control de efluente y medida del NMP.

Análisis de los parámetros de control

Ya se han mencionado los principales factores de influencia en el proceso de cloración, entre ellos están:

- Dosis de cloro
- Tiempo de contacto
- Cloro residual
- Mezclado en el sistema

Debido a que este trabajo es de aplicación para plantas de tratamiento dentro del Distrito Federal, las cuales en su mayoría no tienen tratamiento de lodos, éste paso se omitirá.

4. PROCEDIMIENTO PARA EL DIAGNÓSTICO DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA PLANTA DE LODOS ACTIVADOS CONVENCIONAL

Los problemas de operación de la mayoría de las plantas pueden solucionarse con la debida rehabilitación, capacitación del personal, inversión en caudales de operación, inclusive, de ser necesario el aumento de la capacidad de la planta para el tratamiento adecuado del caudal producido. Todos estos problemas se pueden identificar mediante la revisión del desempeño de las plantas de tratamiento de aguas residuales.

El funcionamiento de la planta de tratamiento incluye su planeación, organización, dirección y control, para llegar a la misión de ésta. Una misión típica debería ser operar continuamente de manera segura cumpliendo con los límites máximos permisibles establecidos legalmente para la descarga.

Para la administración de la planta los aspectos fundamentales son:

- **Planeación:** La planeación incluye el establecimiento de objetivos claros, el desarrollo de los procedimientos de rutina, soluciones de problemas y toma de decisiones. A menos que el plan abarque una sola acción, la planificación debe incluir un proceso de revisión o actualización.
- **Organización:** Las funciones típicas de una planta son administración, laboratorio, operación y mantenimiento.
- **Dirección**
- **Control:** Controlar es garantizar que lo que está pasando en la planta realmente está llevando a lograr su misión. Existen tres áreas principales de control: financiero, técnico y de personal.

Es importante la existencia de un plan de operación de emergencia, se puede decir que es el continuo desarrollo y documentación de acciones y procedimientos destinados a hacer frente a cualquier imprevisto, ya sea naturales o provocados por el hombre, que puede causar un impacto adverso al ambiente o a la eficiencia de la planta. El plan de operación de emergencia debe cubrir todas las instalaciones e involucrar a todos los empleados.

Son importantes exámenes y revisiones para asegurar el cumplimiento de la normatividad. Además, un plan de inspección de operaciones, puede llevar de manera oportuna a la solución de problemas.

Esta metodología pretende ser una herramienta de diseño y análisis que contribuya a guiar la toma de decisiones sobre la mejor alternativa que se deba ejecutar, permitiendo con ello, optimizar la utilización de los recursos de inversión al comparar los beneficios y los costos asociados al proyecto durante su ciclo de vida.

Objetivo de la evaluación

- Identificar si se cumple con la norma y/o criterios de diseño.
- Identificar las fallas y puntos en donde se requiera inversión de capital.
- Proponer medidas correctivas.

Con base en un análisis de metodologías aplicadas a la evaluación de proyectos, se puede proponer como metodología la mostrada en la figura 4.1.

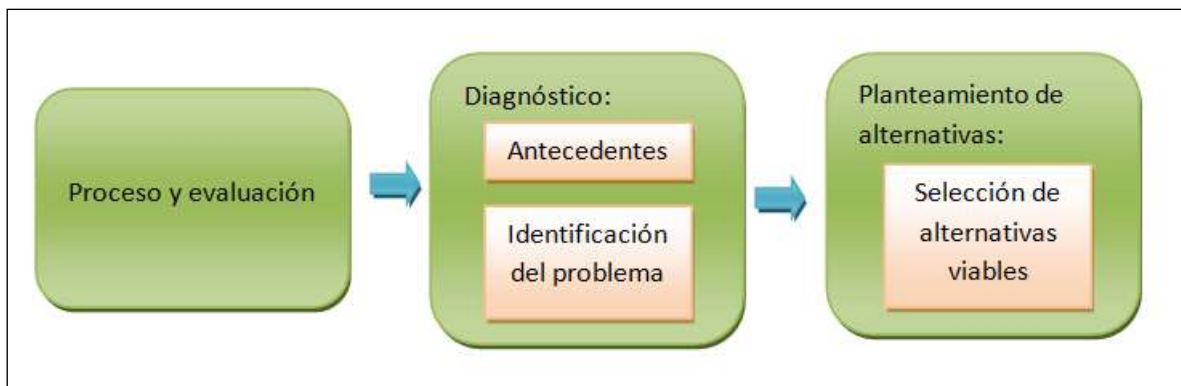


Figura 4.1. Metodología propuesta para la evaluación de sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales.

Según lo anterior, para el desarrollo de esta metodología se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

4.1 Diagnóstico

Para la definición del problema se deben identificar las causas y efectos, respondiendo a los siguientes planteamientos:

4.1.1 Antecedentes de la planta de tratamiento

En los antecedentes es necesario presentar la historia de la planta, características de diseño así como la infraestructura con la que cuenta el tren de tratamiento. De ser posible se debe proporcionar información sobre modificaciones al sistema en su historia, además de la razón para ejecutarlas.

4.1.2 Identificación del problema

Para iniciar la evaluación de la planta debe revisarse la caracterización del influente actual y compararlo con la caracterización del influente de diseño, estableciendo las variaciones que presenta. Seguido de esto, por tratarse de un sistema de lodos activados convencional, se sabe que cuenta con recomendaciones de concentración de algunos parámetros que debe cumplir antes de ingresar al tanque de aeración, ya que de ser rebasados estos parámetros no se tendrá una buena eficiencia u operación del sistema. Estos parámetros son el pH, la temperatura, la variación de la carga orgánica, la variación de caudal, la concentración de sólidos suspendidos, concentración de algunos metales, concentración de sustancias orgánicas tóxicas. Cuando el agua residual, aunque sea municipal supere esas recomendaciones hay que realizar un pretratamiento es decir reducir esos contaminantes para que no afecten el funcionamiento del proceso biológico.

Para una planta de tratamiento, los problemas pueden ser identificados de dos maneras, teniendo en cuenta cumplir cada uno de los parámetros de la respectiva normatividad; o bien, si no se ha llegado a las eficiencias de diseño.

Analizándolo desde el primer punto de vista, los parámetros a vigilar según la norma referente a descargas de aguas residuales (Capítulo 2.3), son los siguientes dependiendo del cuerpo receptor:

- a) Temperatura: En ninguno de los procesos y operaciones que se han mencionado, se provoca un aumento a la temperatura del agua tratada, por lo que de presentarse algún problema este tipo, el punto a revisar sería el caudal de entrada.
- b) Grasas y aceites: Si surgiera la aparición de grasas y aceites durante el tratamiento del agua residual, puede ser conveniente la instalación de una trampa de grasas desde el inicio del proceso de tratamiento para no afectar a los siguientes procesos.
- c) Materia flotante: Este problema puede ser debido a varios procesos del tratamiento, desbaste, desarenador, sedimentador primario, lodos activados o sedimentador secundario. Es importante identificar el origen de este problema, verificando uno a uno de los procesos mencionados para solucionarlo.
- d) Sólidos Sedimentables: Si en el efluente se presenta gran cantidad de sólidos, es posible que el problema radique en el desbaste, desarenador o sedimentadores.
- e) Sólidos Suspendidos Totales: Es la misma situación que para los sedimentables, el problema puede deberse a los mismos procesos.
- f) Demanda Bioquímica de Oxígeno: La demanda bioquímica de oxígeno es una medida de la materia orgánica, y el proceso encargado de la remoción de ésta es el de lodos activados,

por lo que la eficiencia en la remoción de la DBO depende completamente del proceso y de los problemas que puedan surgir en él.

- g) Nitrógeno Total: El nitrógeno puede presentarse en aguas municipales debido a detergentes y excretas humanas, si los valores máximos permisibles son rebasados, puede ser necesario un proceso de nitrificación y desnitrificación.
- h) Fósforo Total: Al igual que el nitrógeno, puede deberse a la gran cantidad de detergentes. De sobrepasar los niveles permitidos, se debe incluir algún tratamiento para la remoción de éste.
- i) Coliformes fecales: Los elevados niveles de coliformes fecales puede deberse a los tanques de contacto de cloro, ya que la desinfección puede resultar insuficiente, ya sea por la dosis o el tiempo de contacto.
- j) Huevos de helminto: De forma similar a los coliformes fecales, los huevos de helminto son removidos muchos de ellos en la sedimentación primaria, y el restante en el proceso de desinfección, por lo que debe verificarse en estos puntos cualquier problema.

Además de estos parámetros, es importante verificar la presencia de exceso de metales pesados, que a pesar de tratarse de una planta de tratamiento de aguas residuales municipales, puede tener contribuciones de aguas residuales industriales.

Abordando el segundo punto, en el cual no se cumplen las eficiencias de diseño, primero revisaremos cuáles son los parámetros para los que una planta de tratamiento es diseñada. Por lo general, los principales parámetros considerados son: DBO, DQO y SST.

Para cualquiera de estos parámetros lo primero que debemos hacer es verificar que el influente sigue presentando similares características de diseño. Si el influente sigue siendo el mismo, se debe identificar el problema con el análisis anteriormente realizado según el parámetro. Si los valores de influente de diseño se han modificado, puede ser necesaria la rehabilitación de la planta con algún nuevo proceso o mediante la optimización de alguno existente.

4.2 Planteamiento de alternativas

Se refiere al planteamiento de soluciones diferentes unas de otras. En cada una de ellas se pueden plantear más de una posibilidad, sin embargo, es posible desechar a priori las que no cumplen con criterios lógicos o técnicos.

4.2.1 Análisis de alternativas

Todo problema, puede tener más de una forma de ser solucionado, en este sentido, quien trabaja en la formulación debe tener la preocupación de identificar cuales podrían ser estas alternativas a las que se puede recurrir para dar solución a la problemática existente.

En este trabajo se presenta una serie de tablas que proporcionan diferentes soluciones a problemas específicos de cada proceso.

4.2.2 Selección de alternativas viables

Con el análisis de cada una de las operaciones y procesos que conforman la planta (Capítulo 3), así como los parámetros de operación, a continuación se presentan tablas guía para la selección de alternativas:

1. Desbaste (tabla 4.1).
2. Desarenador (tabla 4.2).
3. Cárcamo de bombeo (tabla 4.3).
4. Sedimentador primario (tabla 4.4).

Tabla 4.1. Guía de solución de problemas de rejillas (EPA, 1978).

Observaciones	Causa probable	Revisar	Solución
Malos olores, moscas y otros insectos.	Acumulación de trapos y desechos.	Método y frecuencia de remoción de desechos.	Aumentar la frecuencia de remoción y disposición.
Arena excesiva en las barras de las rejillas.	Arena creciente debido al aumento del caudal del influente.	Caudal de entrada.	Controlar el caudal.
	Velocidad de caudal muy baja.	Velocidad del caudal.	Aumentar la velocidad del caudal en la cámara.
Obstrucción excesiva de la pantalla.	Cantidad de desechos inusual en el agua residual.	Separación de las barras y velocidad del agua residual a través de las barras.	Utilizar una barra más gruesa o identificar la fuente de los desechos causantes del problema, y su descarga dentro del sistema debe ser detenida.
		Frecuencia de limpieza.	Ajustar periodos de limpieza.
Inundación	Exceso de caudal de entrada.	Caudal de entrada.	Controlar el caudal.
Rastrillo mecánico automático no funciona.	Mecanismo atascado.	Canal de la pantalla.	Remover obstrucciones.
El motor funciona pero el rastrillo no funciona.	Cadena o cable roto.	Inspeccionar cadena.	Reemplazar la cadena o el cable.
	Interruptor roto.	Inspeccionar interruptor.	Reemplazar el interruptor.
El rastrillo no funciona y no hay problemas visibles.	Defecto del circuito.	Revisar circuito.	Reemplazar circuitos.
	Defecto del motor.	Revisar operación del motor.	Reemplazar motor.

Tabla 4.2. Solución de algunos problemas presentados en desarenadores (Water Pollution Control Federation, 1990)

Observaciones/ Indicadores	Causa probable	Verificar o supervisar	Soluciones
Desarenador lleno de arena	El desarenador está operando a una velocidad muy baja.	Velocidad del desarenador.	Compensar la velocidad del desarenador.
	El equipo de remoción está operando a muy baja velocidad.	Velocidad del equipo de remoción.	Aumentar la velocidad del equipo de remoción.
Olor a huevo podrido en el desarenador	Formación de sulfuro de hidrógeno.	Tomar muestra de los lodos depositados, determinar sulfuros totales y disueltos.	Lavar el tanque y agregar dosis de hipoclorito.
La arena removida es de color gris, mal olor y grasienta, diferente de lo normal	Inadecuada velocidad de aeración.	Revisar la aeración.	Aumentar la velocidad en el desarenador (0.3 m/s es usualmente lo óptimo, a menos que las estrategias de operación requieran otra).
	Velocidad del sistema de remoción de arena muy baja.	Usar algún tinte u objetos flotantes para revisar la velocidad.	
La turbulencia en la superficie del desarenador aerado disminuye.	Difusores cubiertos de arena o sedimentos.	Difusores.	Limpiar difusores y corregir las rejillas u otro pretratamiento para prevenir.
Baja tasa de recuperación de arena	Velocidad excesiva en el fondo.	Velocidad.	Mantener la velocidad cerca de 0.3 m/s.
	Demasiada aeración.	Aeración.	Reducir aeración. Aumentar el tiempo de retención usando más unidades o reduciendo el caudal por unidad.
Desbordamiento del desarenador.	Problema con la bomba.	Bombas.	Ajustar los controles de la bomba o controlar el influente.
Residuos sépticos con grasa y burbujas de gas creciente en el desarenador.	Lodos en el fondo.	Fondo del desarenador.	Lavar diariamente. Remover escombros.

Tabla 4.3. Guía de solución de problemas del sistema de bombeo (EPA, 1978).

Observaciones	Causa probable	Revisar	Solución
Caudal creciente o intermitente.	Ajuste inadecuado del sensor de nivel.	Revisar el ajuste del sensor.	Ajustar los niveles de los sensores.
	La capacidad hidráulica de la estación es excedida.	Revisar capacidad de diseño.	Instalar un tanque que compense o desviar el excedente.
	Descargas externas al sistema.	Revisar los sistemas de alcantarillado para determinar el origen.	Remover y prevenir conexiones ilegales.
Caudal intermitente o creciente durante lluvias fuertes.	Inundación de calles y el agua entra a través de pozos de registro.	Revisar los sellos de las alcantarillas.	Reparar el sello de los pozos de registro y grietas en estructuras de la alcantarilla.
La bomba no está funcionando.	Defecto de circuito de control.	Utilizar un medidor para comprobar los circuitos.	Reemplazar la parte defectuosa.
	Defecto en el motor.	Operación del motor.	Reemplazar el motor.
	Bomba obstruida o válvulas cerradas.	Revisar la bomba por obstrucción.	Remover la obstrucción.
La bomba está funcionando, pero con una reducción en la descarga.	Bomba de aeración obstruida.	Purga de aire de la tubería.	Remover las obstrucciones.
	Impulsor obstruido.	Revisar posibles obstrucciones.	Remover las obstrucciones.
	Anillos gastados.	Compruebe la holgura de los anillos.	Reemplazar los anillos gastados.

Observaciones	Causa probable	Revisar	Solución
Bomba o tubería de succión obstruida.	Acumulación de grasa.	Revisar la acumulación de grasa en las paredes del pozo húmedo.	Aumentar la frecuencia de limpieza del pozo húmedo o eliminación de la grasa por desagüe del pozo, y raspado del fondo.
Aumento de consumo de energía por galón.	Bomba obstruida.	Bombeo total y diario, así como las tasas de caudal máximas y mínimas.	Remover las obstrucciones en la bomba.
Desgaste excesivo o daños en las bombas.	Acumulación de arena en el pozo húmedo.	Inspeccionar para acciones erosivas, corrosión, y acumulación de sólidos.	Remover arena del pozo húmedo.
	Acumulación de grasa en el pozo húmedo.	Revisar las paredes del pozo húmedo.	Limpiar el pozo húmedo.

Tabla 4.4. Guía de principales problemas presentados en sedimentadores primarios (Water Pollution Control Federation, 1990).

Observaciones	Causa probable	Revisar o verificar	Soluciones
Lodo flotante	Descomposición de lodo en el tanque.	Revisar rastras.	Aumentar la extracción de lodos.
	Rastras dañadas.	Revisar rastras.	Reparar o reemplazar de ser necesario.
	Retorno de agua desnitrificada con el lodo activado.	Salida de la bomba del lodo.	Variar la edad del lodo de retorno, o mover el punto de retorno del lodo.
	Tubería de desecho de lodo tapada.	Sistema de control de caudal.	Limpiar la tubería.
	Daño o pérdida del sistema de control de caudal.		Reparar o reemplazar.
Lodo o agua residual negra y olorosa.	Retiro de lodo insuficiente por bombeo.	Prácticas de pretratamiento.	Aumentar la frecuencia y duración de los ciclos de bombeo hasta que la densidad del lodo disminuya.
	Pretratamiento inadecuado de residuos industriales. Presencia de aguas residuales en descomposición en el sistema de colección.	Tiempo de retención y velocidad en tuberías de colección. Cantidad y calidad del sobrenadante del digestor.	Pre-aeración del agua. Tener un pretratamiento para agua industrial. Agregar químicos o aeración en el sistema colector.
	Reciclado excesivo de sobrenadante.	Salida de la bomba del lodo. Muestreo aleatorio de llegadas. Revisar registros de operación.	Mejorar la digestión del lodo para obtener mejor calidad de sobrenadante. Disminuir la carga de lodos hasta que la calidad mejore.
	Tubería de lodos de desecho.		Limpiar tubería.

Observaciones	Causa probable	Revisar o verificar	Soluciones
Lodo o agua residual negra y olorosa (cont.).	Descargas sépticas. Tiempo de operación insuficiente para los colectores de lodos.		Regular o disminuir el vertido. Aumentar el tiempo de operación o ejecutar continuamente.
Desbordamiento de espuma.	Frecuencia de remoción inadecuada.	Velocidad de remoción de espuma.	Remover espuma más frecuentemente.
	Alta contribución de residuos industriales.	Influente.	Limitar las contribuciones por industrias.
	Hojas limpiadoras de espumas dañadas o desgastadas.	Hojas limpiadoras.	Limpiar o reemplazar las hojas limpiadoras.
	Alineación inadecuada de la desnatadora.	Alineación.	Ajustar alineación.
	Profundidad inadecuada del recolector de espuma.	Espuma sin pasar por el recolector.	Ajustar la altura del recolector.
Lodos difíciles de remover de la tolva	Exceso de arena, arcilla u otro material fácilmente compactable.	Operación del sistema removedor de arena.	Mejorar la operación de la unidad de remoción de arena.
	Baja velocidad en las tuberías de salida.		Aumentar la velocidad en la tubería de salida de lodos. Revisar la capacidad de la bomba.
	Tubería o bomba obstruida.	Velocidad de remoción de lodo.	Inversión de flujo en las tuberías y bombeo de lodo más frecuentemente.
Bajo contenido de sólidos en los lodos	Sobrecarga hidráulica	Caudal de entrada.	Mejor distribución de caudal en todos los tanques, si hay tanques múltiples.

Observaciones	Causa probable	Revisar o verificar	Soluciones
Bajo contenido de sólidos en los lodos (cont.)	Corto circuito a través de los tanques.	Tintes u otros trazadores de flujo.	Ver Corto circuito a través de los tanques.
	Sobre bombeo del lodo.	Frecuencia y duración del bombeo de lodos; concentración de SS.	Reducir la frecuencia y duración de los ciclos de bombeo.
Corto circuito a través de los tanques.	Medidores de caudal dañados o faltantes.	Medidores de caudal.	Reparar o reemplazar medidores de caudal.
Flujo turbulento.	Bombeo de influente sin programación.	Ciclo de bombeo	Modificar el ciclo de bombeo.
Sedimentación excesiva en el canal de entrada.	Velocidad muy baja	Velocidad.	Incrementar la velocidad o aerar para prevenir la descomposición.
Pobre remoción de SS.	Sobrecarga hidráulica.	Caudal.	Usar un depósito disponible, retirar el caudal máximo, aditivos químicos.
	Corto circuito.	Ver Corto circuito a través de los tanques.	Ver Corto circuito a través de los tanques.
	Prácticas de remoción de lodos insuficientes.	Monitorear la duración del bombeo y los niveles de lodo.	Bombeo frecuente y consistente
	Flujos reciclados.	Inventario de las calidades y cantidades de flujo.	Consultar el inventario.
	Residuos industriales.	Muestreo de influente.	Eliminar los residuos industriales que dificultan la solución.

5. Sistema de lodos activados

Problemas observables en la prueba de sedimentabilidad:

Caso 1. Los resultados de la prueba de sedimentación después de 30 minutos son buenos, pero la sedimentación tiene el problema de los lodos esponjosos (figura 4.4).

Caso 2. Poca sedimentación después de 30 minutos, pero el sobrenadante es claro. En este caso se debe realizar un examen microscópico (figura 4.5).

Caso 3. Poca sedimentación después de 30 minutos. Después de 30 minutos más, algunos lodos han subido a la superficie, o después de 60 minutos más casi todos han subido a la superficie (Tiempo total: aproximadamente 2 horas) (figura 4.6).

En este caso, agitar suavemente el contenido de la probeta con un agitador y observar cuidadosamente si algunas burbujas de aire escapan del agua. Esto es un indicio de desnitrificación. La desnitrificación es un proceso bioquímico y se presenta después del proceso de nitrificación cuando el oxígeno disuelto en el agua no es suficiente o cuando no hay oxígeno disuelto. Para asegurarse que la desnitrificación es la causa del problema, dejar que sedimente nuevamente el contenido de la probeta durante 30 minutos, si en esta ocasión los lodos sedimentan bien, entonces la desnitrificación es la causa.

En un principio, este tipo de lodos no crearán ningún problema en el tanque de aeración, pero el problema se presentará en el tanque de sedimentación secundaria. El solo hecho de que el tanque de sedimentación secundaria se encuentra localizado después del tanque de aeración, no significa que un problema de sedimentación no afectará el funcionamiento del tanque de aeración. Ante todo, no se estará cumpliendo con la calidad del efluente y después de algún tiempo, no se tendrán suficientes sólidos en el tanque de aeración.

Para corregir el problema de desnitrificación se debe aumentar la relación de recirculación y aumentar la tasa de lodos de desecho, no más del 10% al día (EPA, 2010).

Caso 4. Mala sedimentación y un sobrenadante turbio después de 30 minutos. Se encuentran presentes protozoarios, pero no están activos; es decir, no se mueven en la forma que suelen hacerlo (figura 4.7).

Caso 5. Lodos con aspecto de cenizas sobre la superficie después de 30 minutos (figura 4.8).

Caso 6. Flóculo del tamaño de la cabeza de un alfiler, sedimentación dudosa después de 30 minutos (figura 4.9).

La figura 4.2, muestra los microorganismos que pueden presentarse según los casos anteriores.

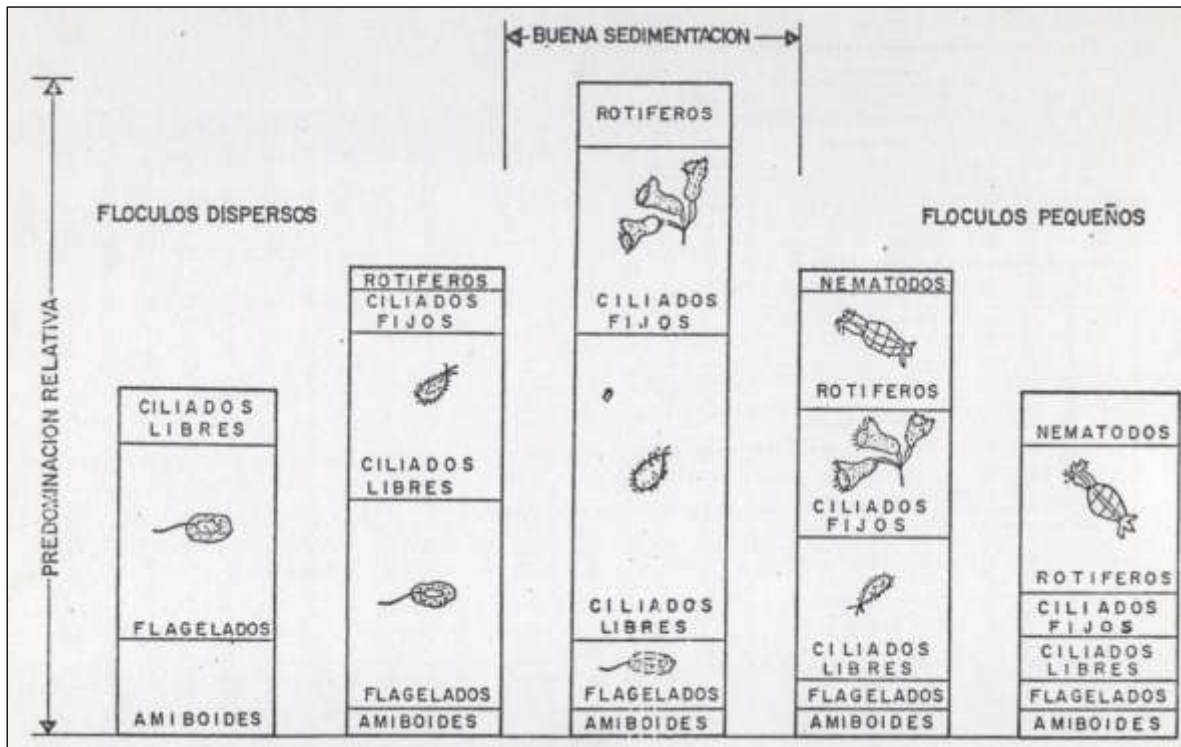
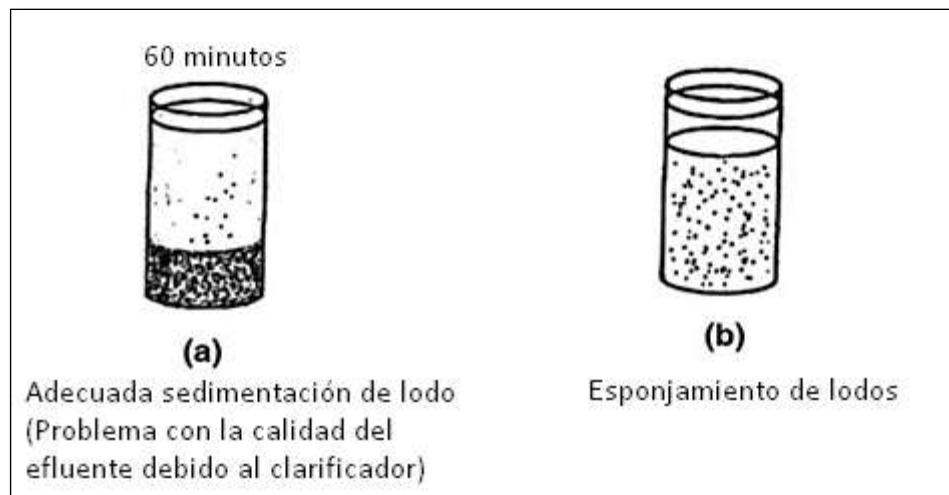


Figura 4.2. Número relativo de protozoarios (Norouzián, 1985).

Gráficamente las pruebas de sedimentabilidad se muestran en la figura 4.3.



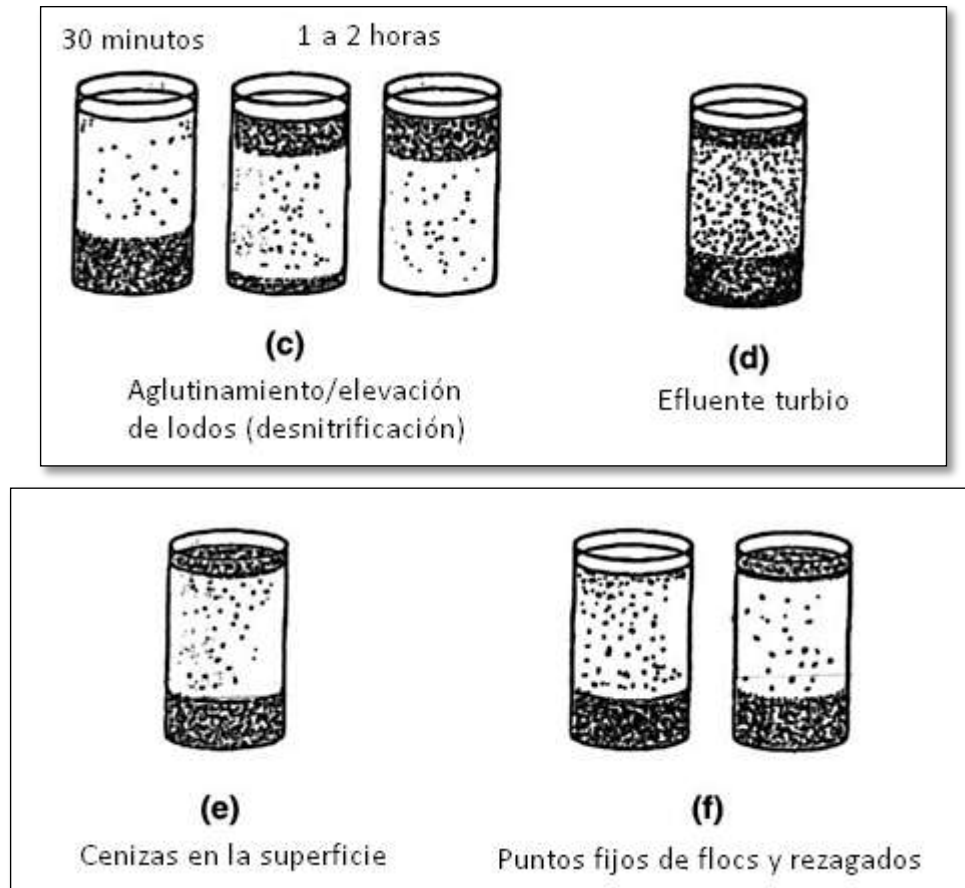


Figura 4.3. Índice de resultados de las pruebas de sedimentabilidad para la solución de problemas (Water Pollution Control Federation, 1990).

Observaciones

60 minutos



Buena sedimentación y sobrenadante limpio en la prueba, lodos flotando en el sedimentador secundario.

Acciones

Verificar alta velocidad en el colector de lodo ocasionando natas y una alta turbiedad en el efluente.

Revisar mal funcionamiento en el equipo (calibración de medidores de caudal, bombeo y líneas de conexión de los lodos activados de retorno y los residuos de lodos activados, daños en colectores de lodos, daños en la entrada y salida del sedimentador, nivel de vertedores).

Revisar el sedimentador para una baja tasa de remoción de lodos y formación de

Verificar la temperatura de las corrientes mediante perfiles de temperatura en el sedimentador.

Verificar desequilibrio de flujos y exceso de la tasa de desbordamiento en la superficie, tanto mínima como máxima.

Soluciones

Disminuir velocidad en el colector.

Reparar o reemplazar el equipo.

Ajustar las tasas de retorno y la velocidad de colectores si es posible.

Si las corrientes son causadas por calentamiento solar de la superficie, tener un sedimentador fuera de línea o una plataforma provisional cubierta.

Agregar válvulas y vertedores para igualar el caudal en los tanques de aeración y sedimentadores.

Usar sedimentadores secundarios adicionales.

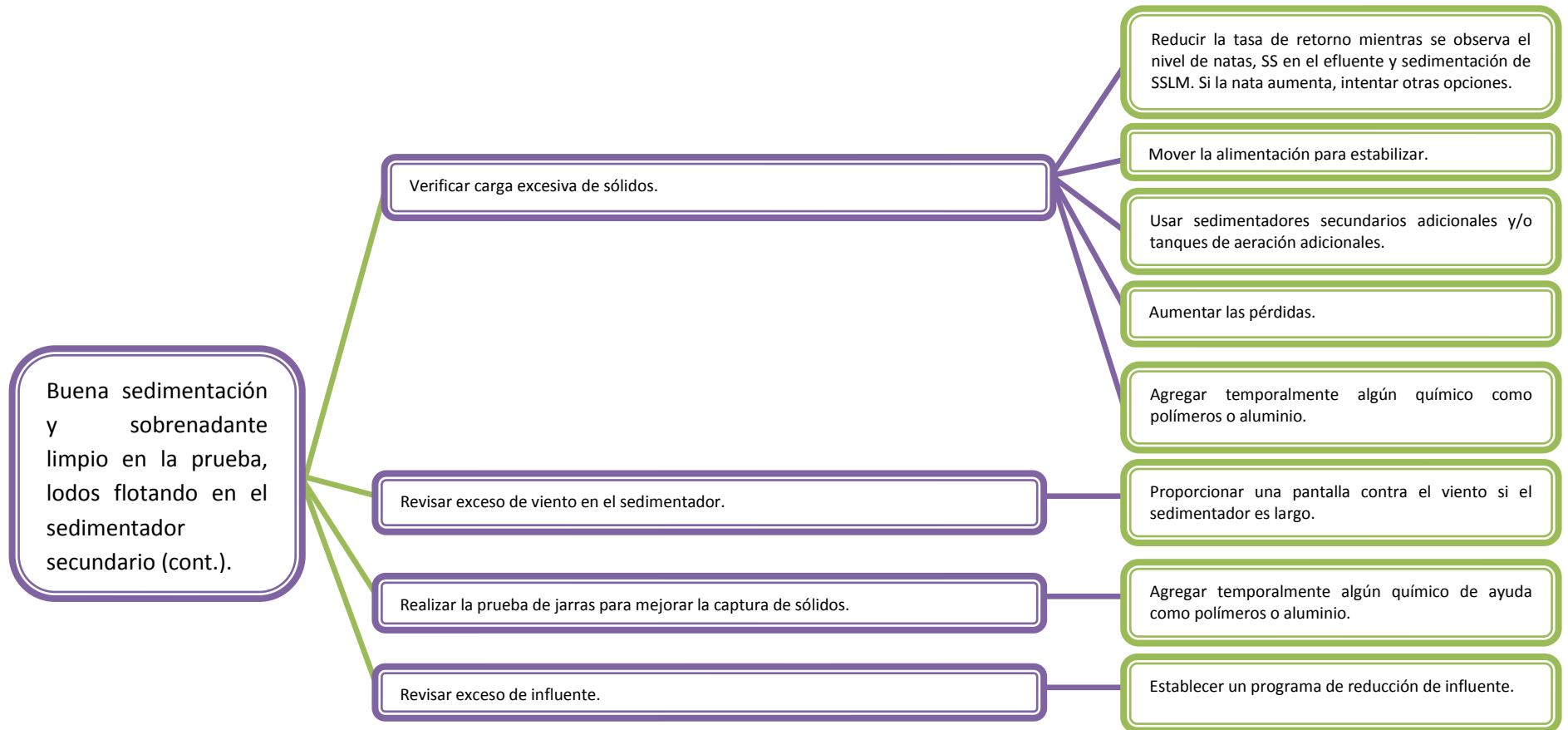
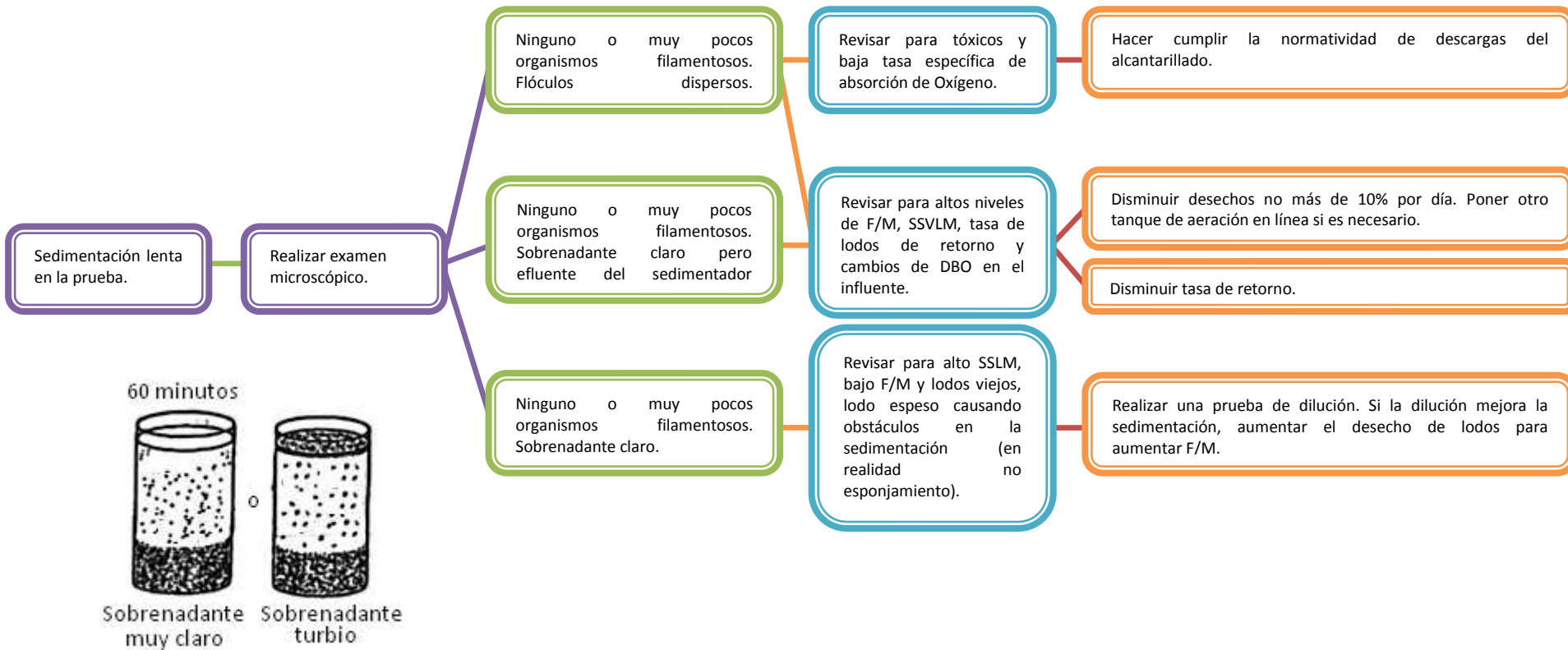


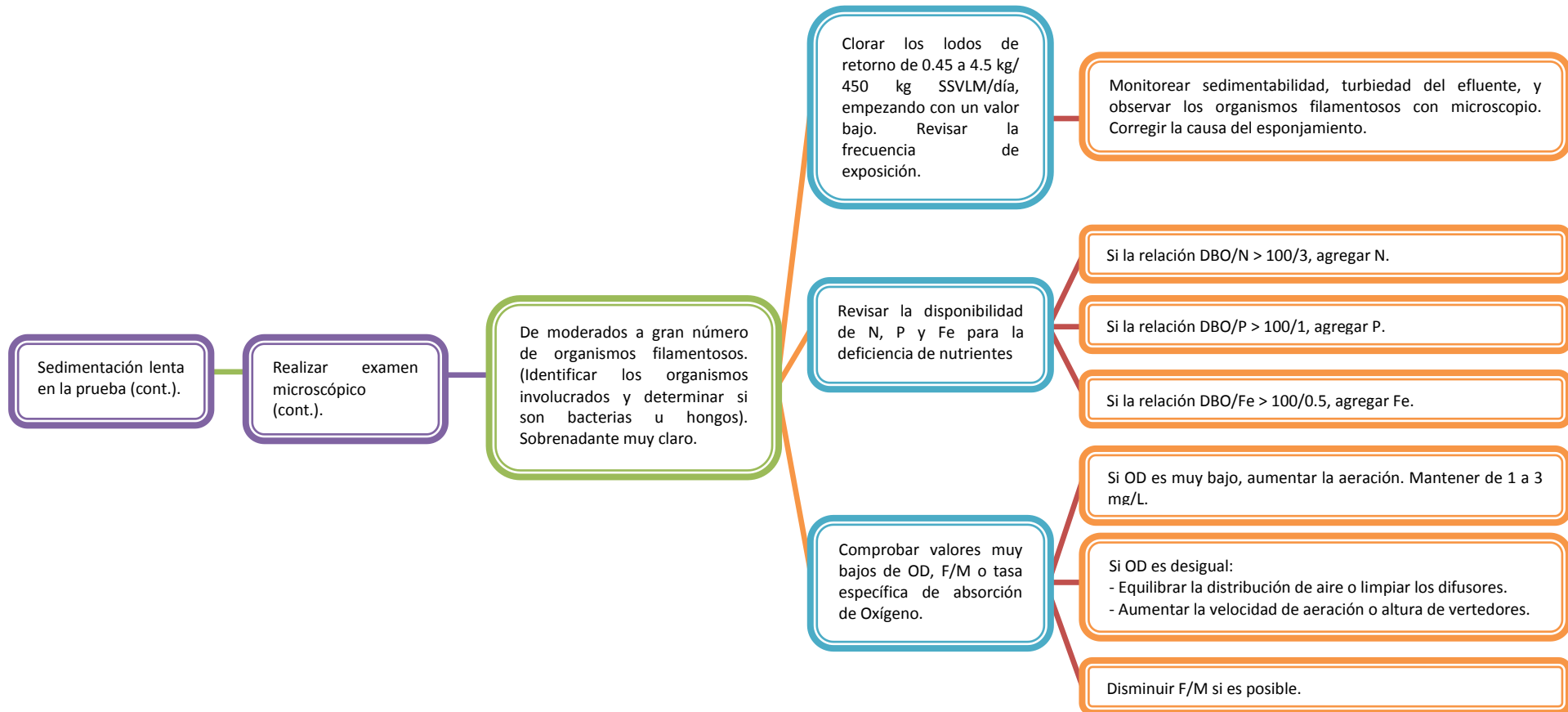
Figura 4.4. Prueba típica de observación para la solución de lavado de sólidos (Water Pollution Control Federation, 1990).

Observaciones

Acciones

Soluciones





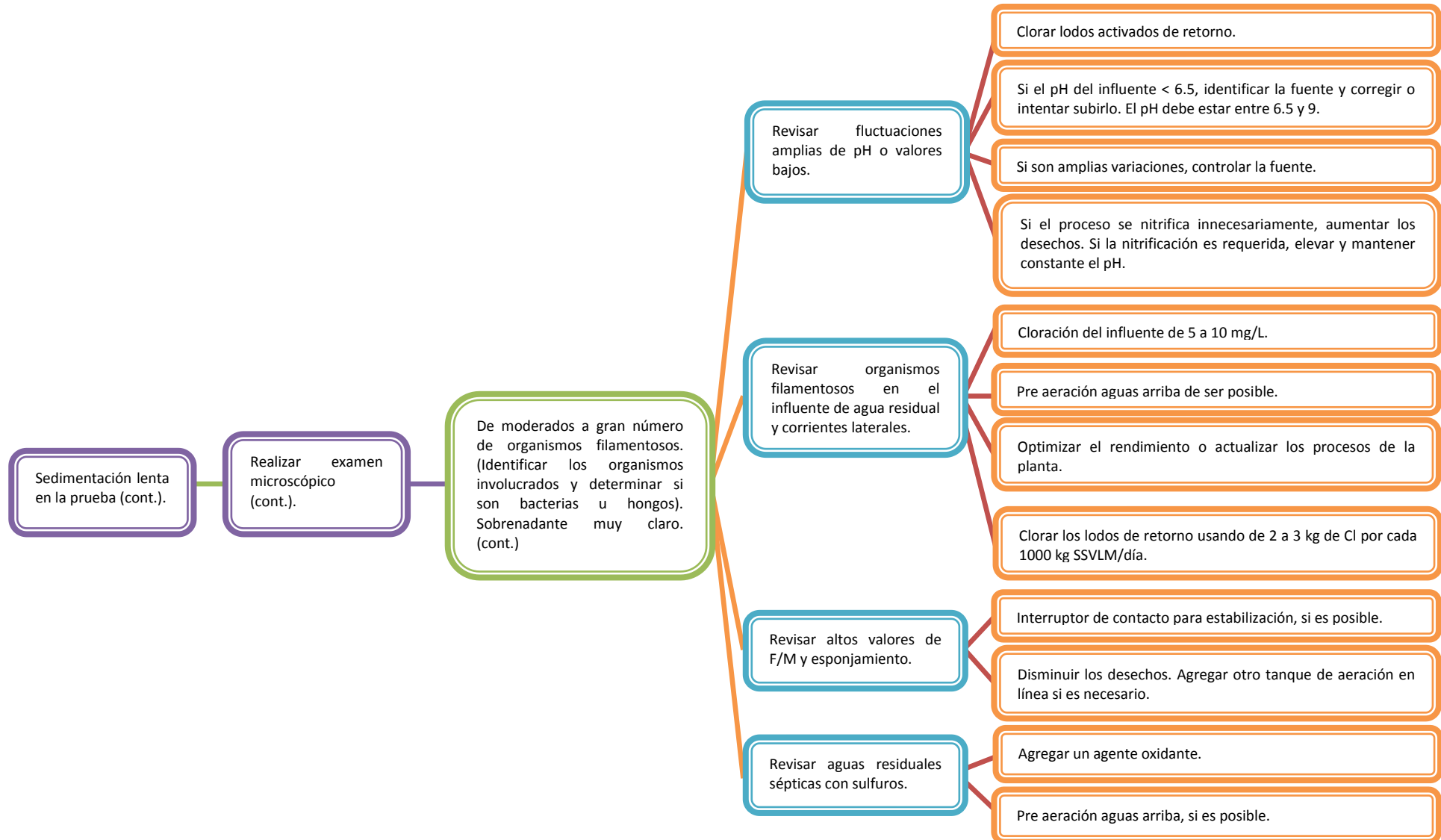


Figura 4.5. Prueba típica de observación para la solución de lodos voluminosos (Water Pollution Control Federation, 1990).

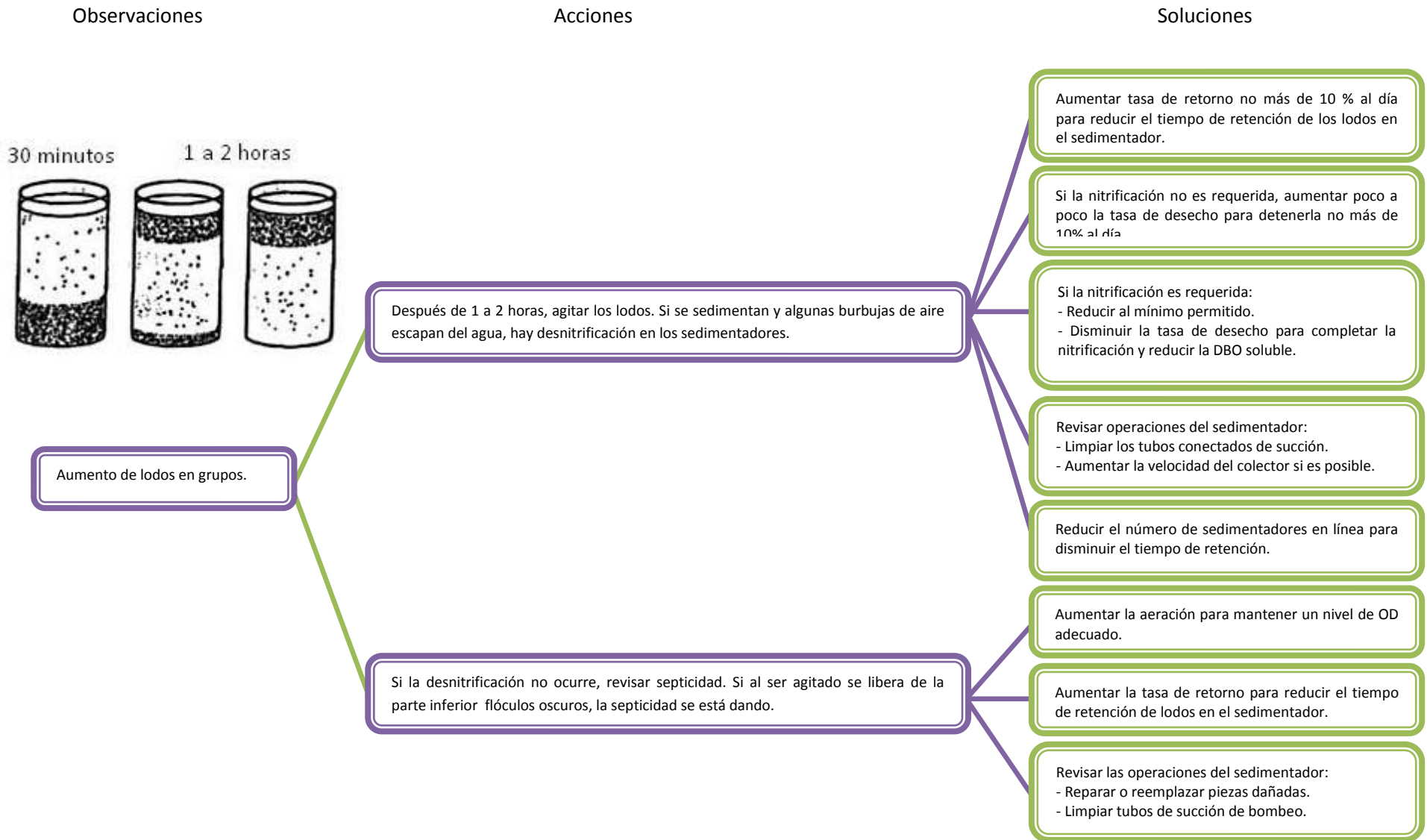


Figura 4.6. Prueba típica de observación de solución a la aglutinación y aumento de lodos (desnitrificación) (Water Pollution Control Federation, 1990).

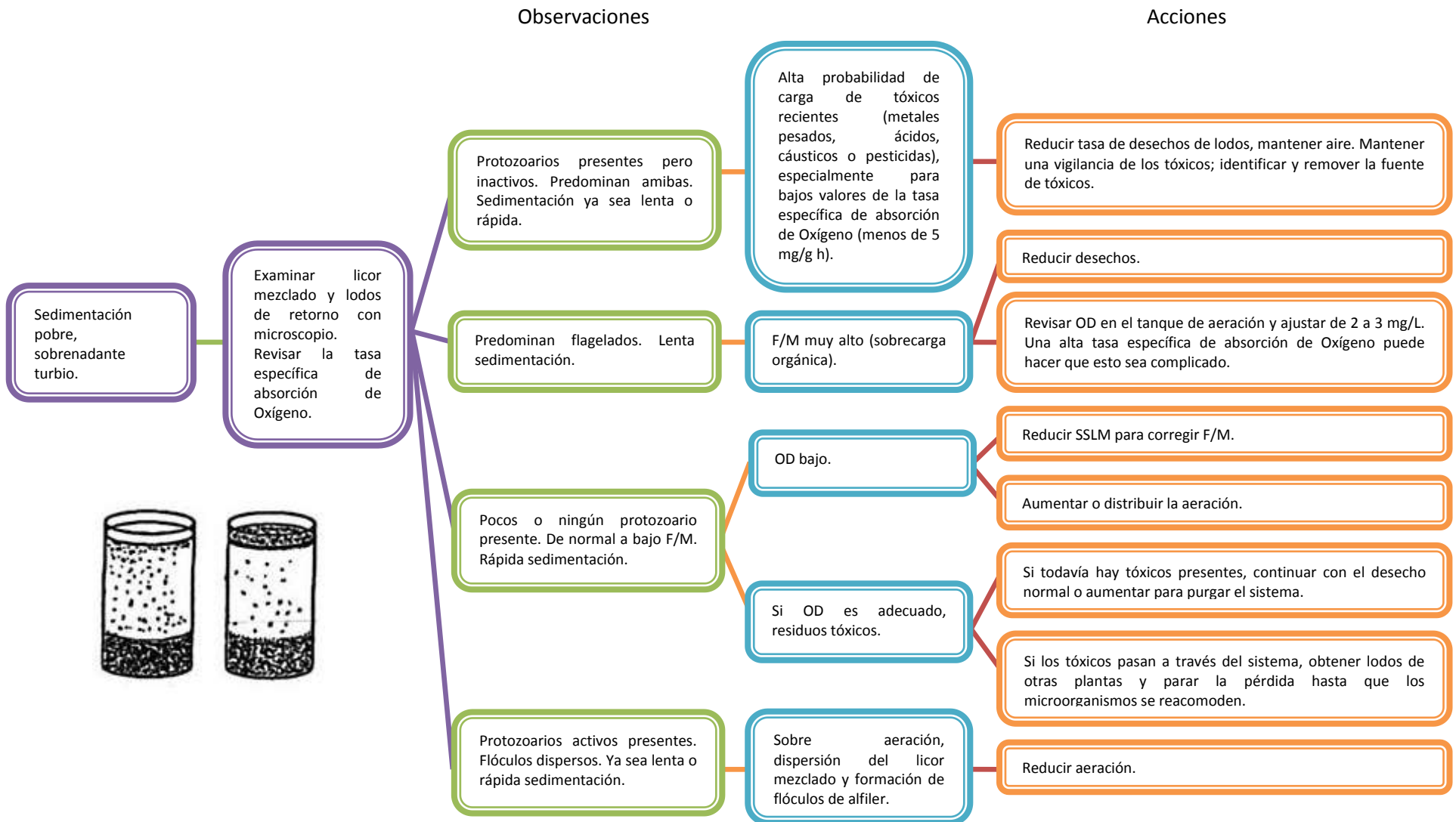


Figura 4.7. Prueba típica de observación de solución a nubes en el efluente secundario (Water Pollution Control Federation, 1990)

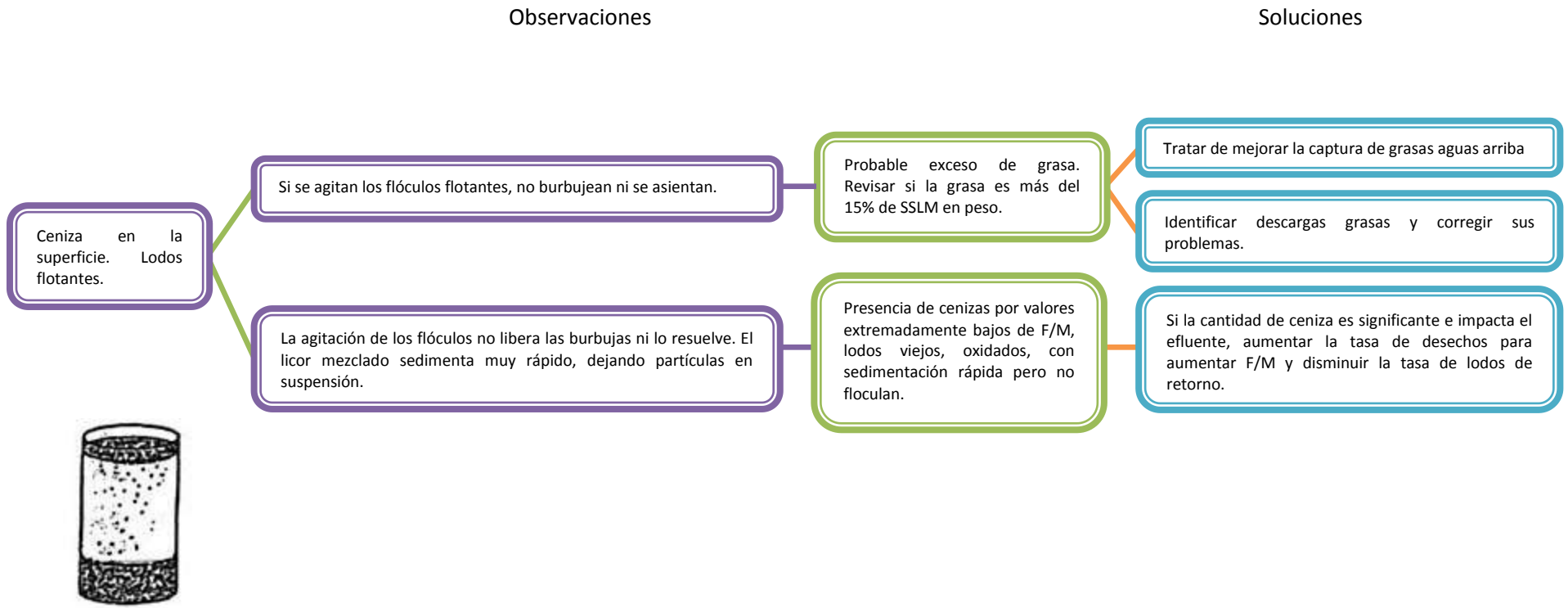


Figura 4.8. Prueba típica de observación para la solución de cenizas en la superficie (Water Pollution Control Federation, 1990).

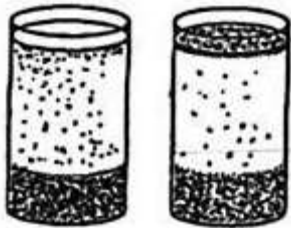
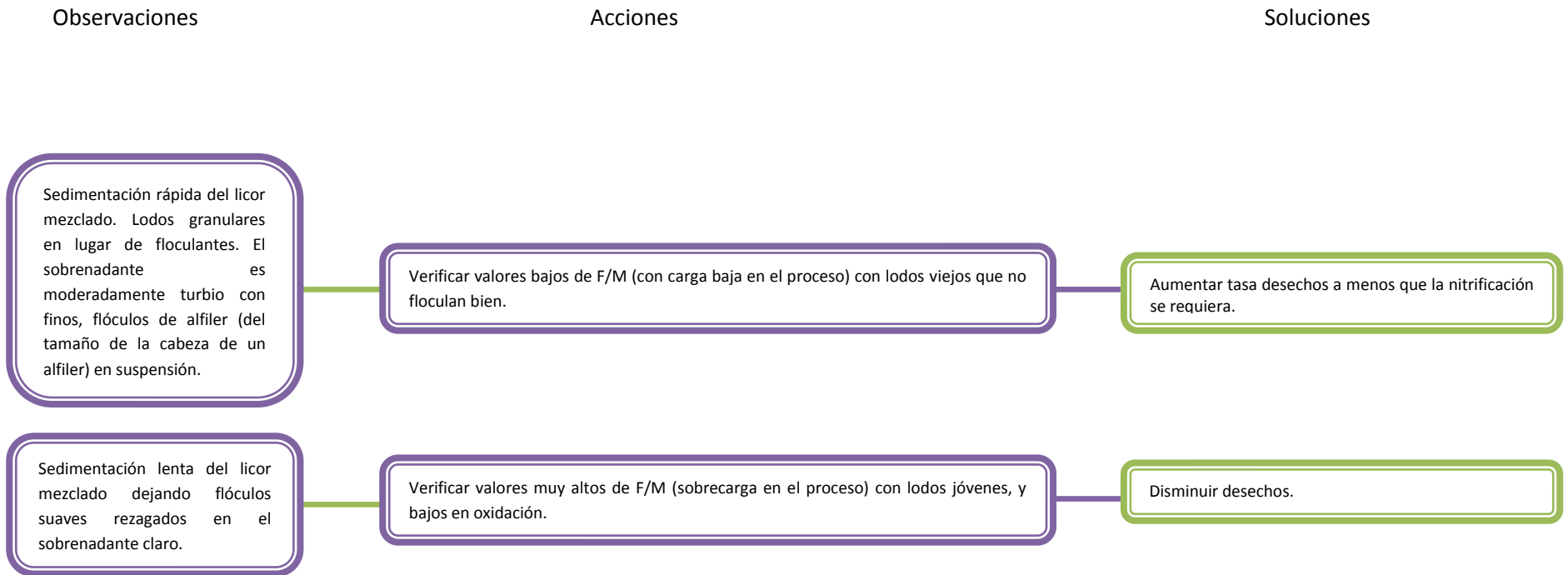


Figura 4.9. Prueba típica de observación para la solución de flóculos de alfiler y rezagados (Water Pollution Control Federation, 1990).

Problemas observados en el tanque de aeración:

- a. Flotación de lodos o lodos ascendentes: El lodo sedimentado en el sedimentador secundario consume rápidamente el oxígeno disuelto que permanece en el licor de la etapa de aeración y se vuelve anóxico. Cuando el licor contiene nitratos o nitritos, éstos podrán ser utilizados por algunos organismos presentes en los lodos como una fuente alternativa de oxígeno, reduciendo los compuestos oxidados del nitrógeno a nitrógeno gaseoso y óxido nitroso. Las burbujas de gas así formadas hacen que los flóculos se eleven hasta el sobrenadante donde son arrastrados junto con el efluente tratado.

Se puede evitar si los lodos no permanecen demasiado tiempo en la etapa de separación antes de ser recirculados o desechados, y por la remoción de nitratos y nitritos, en una etapa previa del proceso. Es conveniente la disminución del tiempo de retención de los lodos en la etapa de sedimentación. Aparte del riesgo de inducir lodos ascendentes, un periodo prolongado en condiciones no oxigenadas podría producir condiciones verdaderamente anaerobias.

- b. Esponjamiento filamentoso o bulking: Entre la comunidad biológica que forma la biomasa que degrada la materia orgánica presente en el agua residual, existe un grupo de bacterias llamadas filamentosas. Las mismas poseen la propiedad de expandirse (por falta de alimentación o ante la presencia de otra condición no óptima en el ambiente donde se encuentran) para poseer mayor superficie para obtener el material soluble a depurar. Esto hace que dichas especies adquieran mayor flotabilidad pero que a la vez pierdan sedimentabilidad.

Este inconveniente puede ser debido a:

- Problemas de diseño
- Producido por mal cálculo de retención hidráulica
- Problemas del influente
- Provocado por desbalance de nutrientes, concentración inadecuada de oxígeno, aparición de moléculas complejas que podrían ser tóxicas, entre otros factores
- Problemas operativos
- Debido a inapropiada recirculación, formación de zonas sépticas, o cualquier otro inconveniente causado por la persona encargada de operar la planta
- Relación F/M demasiado baja
- Oxígeno Disuelto demasiado bajo
- Deficiencia de nutrientes

Los métodos que se pueden aplicar para solucionar las dificultades ocasionadas por la presencia de bulking son los siguientes:

Biológicos

- Agregar bacterias comerciales que compitan y degraden a las filamentosas.
- Adicionar a los otros microorganismos presentes en el agua a tratar, potenciadores de crecimiento, como por ejemplo, ácido fólico, ya que las bacterias filamentosas no lo aprovechan de manera apropiada.

Mecánicos

- Aerar
- Recircular
- Eliminar zonas muertas

Químicos

- Colocar microbicidas (por ejemplo Cloro) para eliminar a los microorganismos en cuestión
- Ajustar los nutrientes
- Efectuar los procesos de coagulación y floculación en la salida del sedimentador secundario

En la tabla 4.5 se muestran otros posibles problemas y soluciones debido a esta causa.

Tabla 4.5. Posibles causas y soluciones por esponjamiento filamentoso (Water Pollution Control Federation, 1990).

Observaciones	Causa probable	Revisión necesaria	Solución
Aumento de la capa de lodo en la superficie del sedimentador secundario.	Tóxicos presentes.	Revisar la tasa de aeración del licor mezclado.	Impedir descargas de aguas residuales industriales en el alcantarillado. Nota: El cloro no es efectivo para solucionar este problema.
El licor mezclado sedimenta poco a poco y compacta mal en la prueba de sedimentabilidad, pero el sobrenadante es bastante claro. El examen microscópico muestra pocos o ningún microorganismo filamentoso. Repentino aumento del IVL. Repentina disminución del índice diario de lodo.	F/M alto.	Revisar y monitorear las tendencias de: - Cambios de SSVLM, mg/L; - Cambios de la tasa de lodos de retorno; - Cambios de F/M; - Cambios en niveles de OD; y - Cambios en la DBO de influente.	Disminuir desechos. Disminuir la tasa de retorno.
Lo anterior pero el examen microscópico muestra organismos filamentosos. Nota: Tratar de identificar los organismos filamentosos involucrados y si son bacterias u hongos.	Nutrientes del agua residual escasos causando esponjamiento filamentoso. Nota: Cloro, H ₂ O ₂ , y adición de polímeros da poco control debido a una sedimentación de lodos activados viscosos, causada por la deficiencia de nutrientes.	Revisar niveles de nutrientes disponibles en el influente y efluente del agua residual	Clorar los lodos activados de retorno de 0.45 a kg/día/450 kg SSVLM, empezando con un nivel bajo y aumentando. Monitorear la sedimentación (debe empezar a mejorar en 1 a 3 días). Monitorear la turbiedad (si el efluente del sedimentador se vuelve turbio o lechoso, reducir la dosis).

Observaciones	Causa probable	Revisión necesaria	Solución
<p>Lo anterior pero el examen microscópico muestra organismos filamentosos. Nota: Tratar de identificar los organismos filamentosos involucrados y si son bacterias u hongos (cont.).</p>	<p>Nutrientes del agua residual escasos causando esponjamiento filamentosos. Nota: Cloro, H₂O₂, y adición de polímeros da poco control debido a una sedimentación de lodos activados viscosos, causada por la deficiencia de nutrientes (cont.).</p> <p>OD bajo en tanques de aeración causando esponjamiento filamentosos.</p>	<p>Revisar niveles de nutrientes disponibles en el influente y efluente del agua residual (cont.).</p> <p>Revisar OD en varios puntos a través de los tanques.</p>	<p>Observar los organismos filamentosos con microscopio durante el proceso (parar la cloración cuando solamente permanezcan vainas vacías). Si los nutrientes son bajos, realizar pruebas de campo y del efluente, encontrar la dosis para agregar nitrógeno en forma de amoníaco anhidro, fósforo como fosfato trisódico, o hierro como cloruro férrico.</p> <p>El OD es muy bajo para la F/M o la tasa específica de absorción de oxígeno.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Aumentar aeración. - Si OD no es uniforme: <ul style="list-style-type: none"> - Para difusores de aire, distribuir el sistema de difusión de aire o limpiarlos. - Para aeración mecánica, aumentar la velocidad, o elevar los vertedores. <p>Disminuir F/M de ser posible.</p> <p>Clorar los lodos activados de retorno de 0.45 a 4.5 kg/día/450 kg SSVLM, empezando con un valor bajo y aumentando. Monitorear la sedimentación y turbiedad. Observar los organismos filamentosos con microscopio.</p>

Observaciones	Causa probable	Revisión necesaria	Solución
<p>Lo anterior pero el examen microscópico muestra organismos filamentosos. Nota: Tratar de identificar los organismos filamentosos involucrados y si son bacterias u hongos (cont.).</p>	<p>OD bajo en tanques de aeración causando... (cont.).</p> <p>Fluctuaciones de pH en las aguas residuales crudas, o pH menor a 6.5 en el tanque de aeración, causando esponjamiento filamentoso (usualmente hongos a un pH menor de 6.0).</p>	<p>Revisar OD en varios puntos a través de los tanques (cont.).</p> <p>Revisar y monitorear el pH del influente de la planta.</p> <p>Revisar presencia de hongos.</p> <p>Revisar si el proceso de nitrificación es debido a la alta temperatura del agua residual o al bajo valor de F/M.</p>	<p>Agregar, algún coagulante para los síntomas mientras se corrige.</p> <p>Si el pH es menor de 6.5, realizar un reconocimiento de residuos industriales para identificar la fuente. Detener o neutralizar la descarga en la fuente.</p> <p>Elevar el pH agregando un agente alcalino como bicarbonato de sodio, sosa caustica, o cal en el influente del tanque de aeración.</p> <p>Si la nitrificación no es necesaria, aumentar la tasa de desecho no más de 10%/día para detener la nitrificación.</p> <p>Si la nitrificación es necesaria, elevar el pH agregando un agente alcalino como bicarbonato de sodio, sosa cáustica, o cal al influente del tanque de aeración.</p> <p>Clorar los lodos activados de retorno de 0.45 a 4.5 kg/día/450 kg SSVLM, empezando con poco y aumentando. Monitorear la sedimentación y turbiedad. Observar la presencia de organismos filamentosos con microscopio.</p>

Observaciones	Causa probable	Revisión necesaria	Solución
Lo anterior pero el examen microscópico muestra organismos filamentosos. Nota: Tratar de identificar los organismos filamentosos involucrados y si son bacterias u hongos (cont.).	Fluctuaciones de pH en las aguas residuales crudas, o pH menor a 6.5 en el tanque de aeración, causando... (cont.).	Revisar si el proceso de nitrificación es debido a la alta temperatura del agua residual o al bajo valor de F/M (cont.).	Agregar si es posible, algún coagulante para solucionar los síntomas de los problemas, mientras se están corrigiendo.
	Cantidades masivas de bacterias filamentosas en el influente del agua residual están causando esponjamiento filamentosos en el proceso de lodos activados.	Revisar el influente del agua tratada para organismos filamentosos.	Clorar el influente con una dosis de 5 a 10 mg/L. Si son requeridas dosis mayores, tener mucho cuidado. Aumentar la dosis de 1 a 2 mg/L por incremento. Pre aeración aguas arriba si es posible.
	Alto F/M y espuma.	Revisar y monitorear aspectos de: <ul style="list-style-type: none"> - Cambios en SSVLM, mg/L; - Cambios en la tasa de lodos de retorno; - Cambios en F/M; - Cambios en niveles de OD, y - Cambios de DBO en el influente. 	Estabilizar el sistema.
	Agua residual séptica con sulfuros.	Revisar para microorganismos filamentosos	Agregar un agente oxidante como cloro, H ₂ O ₂ , o aire en el influente. Pre aerar aguas arriba si es posible.

- c. Formación de espuma espesa o foaming: Se produce debido a que los microorganismos filamentosos originan una espuma espesa coloreada (en colores del blanco al marrón) y en muchos casos, abundantes flotantes, que hacen que el lodo no sedimente.

Generalmente se debe a la presencia de Nocardias y Gordonas, dos organismos filamentosos. Por este motivo, al igual que en el caso de bulking, es muy importante mandar a analizar la muestra para saber las especies existentes en el efluente, y, con base en los resultados corregir dicho inconveniente.

En la mayoría de los casos el espumamiento se debe a:

- Problemas de diseño: Causados cuando la salida del reactor biológico no es por reborde, provocando que se genere y acumule espuma.
- Problemas Operativos: Debido a la aplicación de aeración incorrecta o excesiva que hace que las microburbujas generen espumas.

Los métodos que se pueden utilizar, en este caso, para solucionar dicha dificultad, son los siguientes:

Biológicos

-Adicionar a los otros microorganismos presentes en el agua a tratar, potenciadores de crecimiento, como por ejemplo, el ácido fólico, ya que las bacterias filamentosas no lo aprovechan bien.

Mecánicos

- Disminuir la aeración
- Recircular

Químicos

-Colocar microbicidas (por ejemplo Cloro) para eliminar a los microorganismos que causan problemas.

La tabla 4.6 muestra un resumen de los otros posibles problemas y soluciones que se pueden encontrar debido a esta razón:

Tabla 4.6. Guía de solución de problemas por espumas (Water Pollution Control Federation, 1990).

Observaciones	Causa probable	Revisión necesaria	Solución
Espuma rígida, blanca, ondulante o jabonosa en la superficie del tanque de aeración.	Lodo joven en un tanque de aeración sobrecargado (bajo SSLM). Nota: Este problema ocurre usualmente durante el inicio del proceso y es solamente temporal. Si se está iniciando la operación, no es alarmante.	Revisar la DBO y SSVLM en el tanque de aeración, incluyendo recirculaciones. Calcular F/M para determinar el valor de SSVLM con la DBO actual.	Después de calcular F/M y SSVLM requerido, se debe determinar si la F/M y la concentración de SSVLM son bajas. Es recomendable no perder el lodo o mantener el mínimo para el proceso por algunos días.
		Revisar el efluente del sedimentador secundario por arrastre de sólidos (aspecto turbio).	Mantener la carga de sólidos adecuada en la tasa de retorno de lodos para minimizar el arrastre de sólidos, especialmente durante períodos de caudal máximo.
		Revisar los niveles de OD en el tanque de aeración.	Mantener los niveles de OD entre 2 y 3 mg/L. Asegurarse del mezclado adecuado.
		Considerar traer lodos de otra planta.	Alimentar el proceso con algún lodo saludable de una planta que opere adecuadamente.
	Pérdida excesiva de lodos	Revisar y monitorear: <ul style="list-style-type: none"> - Disminución de SSVLM; - Disminución de la tasa de lodos de retorno; - Aumento de F/M; - Disminución de OD para la misma aeración; - Aumento de influente. 	Reducir la carga de entrada no más de 10%/día mientras el proceso se normaliza. Aumentar la tasa de retorno para evitar que los sólidos en el sedimentador secundario sean arrastrados al efluente. Mantener la profundidad del manto de lodos de 0.3 a 0.9 m del fondo del sedimentador.

Observaciones	Causa probable	Revisión necesaria	Solución
Espuma rígida, blanca, ondulante o jabonosa en la superficie del tanque de aeración (cont.).	<p>Condiciones no favorables tales como residuos altamente tóxicos (metales o bactericidas), deficiencia de nutrientes, pH anormalmente bajo o alto, OD insuficiente, temperaturas frías del agua residual, o severos cambios de temperatura produciendo una reducción de SSLM.</p> <p>Inadecuados o bajos lodos de retorno, causando sobrecarga y formación de espuma en uno o más tanques de aeración.</p>	<p>Revisar la tasa específica de consumo de oxígeno, es probable desechos tóxicos si es muy baja (menos de 5 mg/g•h). Revisar el licor mezclado con microscopio; tomar muestras y analizar metales, bacterias y medir la temperatura.</p> <p>Revisar y monitorear el influente de variaciones significativas en temperatura.</p> <p>Revisar y monitorear el influente secundario y las tasas de retorno del tanque de aeración.</p>	<p>Si es causado por un residuo tóxico, volver a establecer una nueva siembra de lodos activados. De ser posible, gastar el lodo tóxico del proceso sin reciclarlo. Obtener lodos de otra planta si es posible. Respaldar activamente las órdenes de uso del alcantarillado para evitar descargas de tóxicos.</p> <p>Impedir descargas de efluentes industriales en el alcantarillado.</p> <p>Modificar la distribución de las instalaciones para igualar el influente y la tasa de retorno de cada tanque de aeración. La concentración de SSLM, los lodos activados de retorno y el OD entre múltiples tanques deben ser consistentes.</p>
Espuma brillante, de color marrón oscuro en la superficie del tanque de aeración.	El tanque de aeración se acerca a una carga baja (bajo F/M), condición debido a un insuficiente desecho de lodos.	<p>Revisar y monitorear:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Incrementos de SSVLM, - Incrementos de la tasa de lodos de retorno; - Disminución de F/M; - Disminución de OD, y - Disminución de lodos de desecho 	Aumentar la tasa de desecho de lodos no más de 10%/día mientras el proceso se normaliza y una pequeña cantidad de espuma de color tostado claro se observa en la superficie del tanque de aeración.

Observaciones	Causa probable	Revisión necesaria	Solución
Espuma espesa de color marrón oscuro en la superficie del tanque de aeración.	El tanque de aeración está críticamente sobrecargado (F/M muy alto) debido a un programa de operación inadecuado.	Revisar y monitorear: <ul style="list-style-type: none"> - Aumento de SSVLM, mg/L; - Aumento de la tasa de lodos de retorno; - Disminución de F/M; - Aumento de niveles de OD para la misma aeración. - Disminución de lodos de desecho; - Aumento de nitratos en efluente secundario (arriba de 1 mg/L); - Aumento de la demanda de cloro; y - Disminución de pH en el efluente del tanque de aeración. 	Disminuir los lodos de desecho no más de 10%/día mientras el proceso se normaliza y una pequeña cantidad de espuma de color tostado claro se observa en la superficie del tanque de aeración.
	Entrada de escoria en los tanques de aeración.	Revisar el influente secundario para grasas y aceites.	Cumplir la reglamentación para alcantarillado.
		Rejillas.	Mejorar las rejillas.
Espuma grasosa y oscura que es llevada al sedimentador secundario.	Organismos filamentosos	Hacer un examen microscópico del licor mezclado.	Controlar el influente evitando reciclar las grasas, bajar la tasa de lodos de retorno durante 2 a 9 días, remover físicamente la espuma del tanque de aeración y la escoria del sedimentador secundario.

Observaciones	Causa probable	Revisión necesaria	Solución
<p>Espuma de color marrón oscuro, jabonosa casi negruzca en la superficie del tanque de aeración. El color del licor mezclado es café muy oscuro casi negro. Olor séptico o agrio del tanque de aeración.</p>	<p>Condiciones anaerobias ocurriendo en el tanque de aeración.</p> <p>Residuos industriales que contienen colorantes o tintas.</p>	<p>Revisar OD para una aeración correcta.</p> <p>Revisar equipo de aeración.</p> <p>Revisar SSLM.</p> <p>Revisar fuentes de residuos industriales.</p>	<p>Si la aeración está baja, aumentarla manteniendo niveles de 2 a 3 mg/L de OD.</p> <p>Reparar fugas, o limpiar los difusores si los hay. Limpiar el equipo mecánico de aeración si lo hay.</p> <p>Si es muy alto, ajustar SSLM con un adecuado F/M. Si hay un adecuado F/M, poner otro tanque de aeración en serie, si es posible, para reducir SSLM.</p> <p>Hacer cumplir la reglamentación del alcantarillado, evitando descargas industriales.</p>
<p>Pequeña cantidad de espuma fresca color tostado claro.</p>	<p>No hay problema. Es usualmente un signo de un proceso bien operado que está produciendo buen efluente.</p>		

- Adicionar otros sistemas para aumentar la capacidad:

- *Sistemas de película biológica*: El tratamiento de las aguas residuales se puede efectuar en reactores de película biológica, poniendo en contacto dichas aguas con una población microbiana mixta, en forma de una película de lama adherida a la superficie de un medio sólido de soporte. Cualquier superficie en contacto con un medio nutriente que contenga microorganismos desarrollará una capa biológicamente activa, y en consecuencia, las películas biológicas adheridas constituyen una característica de todo tipo de reactor biológico. Los principales usos de este sistema son para el aumento de la capacidad de la planta y mejorar su funcionamiento a una misma capacidad. Este sistema añade la ventaja de películas fijas en el crecimiento suspendido del proceso de lodos activados. La carga orgánica soportada por el proceso de lodos activados es mayor, el tiempo de retención celular en el sistema es mayor. Resiste choques de cargas orgánicas e hidráulicas, se obtiene un mejor IVL y se reduce la producción de lodos.

Los empaques o medios de soporte usados en estos sistemas están diseñados de manera que presenten un área de contacto muy grande entre la capa de líquido y el aire, aumentando la absorción del oxígeno por la capa líquida y presentando de manera similar una gran área de contacto entre el líquido y la lama microbiana, con lo que se aumenta la transferencia de nutrientes y oxígeno a los microorganismos.

- *Sistemas de medios en movimiento*: Trabajan bajo el mismo principio que el anterior, pero en estos sistemas la película de lama microbiana y el medio sólido de soporte a la que está adherida se mueven a través del líquido que está bajo tratamiento.

- Seleccionar puntos para agregar químicos:

Para la selección de puntos de alimentación de químicos el operador necesita considerar las reacciones químicas que se llevarán a cabo, así como las interferencias y condiciones inhibitorias que podrían surgir. Además de que para casos en que es necesaria la adición de dos o más químicos, es necesario considerar el orden en que estos serán vertidos. En la tabla 4.9 se presenta una lista de consideraciones generales para la selección de puntos de adición de químicos.

7. Sedimentador Secundario (tabla 4.7).

8. Desinfección (tabla 4.8).

Tabla 4.7. Guía de solución de problemas de sedimentador secundario (EPA, 1978)

Observaciones	Causa probable	Revisar	Solución
Lodos flotan a la superficie del sedimentador secundario.	Lodos voluminosos, predominan microorganismos filamentosos en el licor mezclado.	Índice volumétrico de lodos: si es menor de 100 mL/g, no es una causa probable; un examen microscópico puede servir para determinar la presencia de organismos filamentosos.	<ul style="list-style-type: none"> - Aumentar el OD en el tanque de aeración si es menor de 1 mg/L. - Aumentar el pH a 7. - Mantener la concentración de nutrientes en una relación de 100 mg/L de DBO a 5 mg/L de nitrógeno total; a 1 mg/L de fósforo; a 0.5 mg/L de hierro. - Agregar de 5 a 60 mg/L de cloro a los lodos de retorno hasta que el índice volumétrico de lodos <150 mL/g. - Agregar de 50 a 200 mg/L de peróxido de hidrógeno al tanque de aeración hasta que el índice volumétrico de lodos <150 mL/g. - Incrementar la tasa de lodos de retorno.
	Aumento de lodos. Esta apareciendo desnitrificación en el sedimentador secundario; burbujas de nitrógeno afectando los lodos, provocando que se eleven en grupos.	Concentración de nitratos en el sedimentador, si no hay grandes cantidades ésta no es la causa.	<ul style="list-style-type: none"> - Aumentar la tasa de lodos de retorno. - Aumentar OD en el tanque de aeración.
	Colectores de lodo operando muy lento (lodos sépticos).	Frecuencia y velocidad de colección de lodos (lodo negro séptico).	Aumentar velocidad o frecuencia de operación del colector de lodo.

Observaciones	Causa probable	Revisar	Solución
Lodos flotan a la superficie del sedimentador secundario (cont.).	Sobre aeración de lodos.		Reducir turbulencia en el tanque de aeración
Desbordamiento de flóculos de cabeza de alfiler en el sedimentador secundario, el índice volumétrico de lodo es bueno pero el efluente es turbio.	Turbulencia excesiva.		Reducir aeración y agitación.
	Tasa de lodos de retorno grande.	SSLM.	Aumentar lodos de desecho para reducir la tasa de lodos de retorno.
	Condiciones anaerobias en el tanque de aeración.	OD en el tanque de aeración.	Aumentar OD en el tanque de aeración.
	Choque de cargas tóxicas.	Examen microscópico de lodos para protozoarios inactivos	Alimentar los lodos con lodos de otra planta si es posible; hacer cumplir las normas de desechos industriales.
	Corto circuito, pasan sólidos sobre los vertedores.		Nivel de vertedores para evitar cortos circuitos.
	Corrientes anaerobias en la recirculación.		Identificar y corregir las fuentes de condiciones anaerobias.
Contaminación de vertedores.	Sólidos y/o crecimiento en vertedores de plantas.	Inspección visual.	Limpieza a fondo, con mayor frecuencia. Pre-cloración.
Corto trayecto del flujo a través del sedimentador.	Carga hidráulica excesiva.	Inspección visual.	Poner más unidades en servicio.
	El vertedor no está nivelado.	Inspección visual.	Nivelar vertedor.
	Reducción del tiempo de retención, por sólidos de gran tamaño y acumulación de arena.		- Remover exceso de lodos. - Operar una trampa de arena.

Observaciones	Causa probable	Revisar	Solución
Desfloculación en el sedimentador.	Residuos tóxicos o ácidos.	Lodo sobrenadante, turbidez uniforme.	Remover la fuente de residuos industriales.
	Condiciones anaerobias en el tanque de aeración.		Incrementar OD en el tanque de aeración.
	Tanque de aeración sobre cargado.		Poner más tanques en servicio.
	Inadecuado suministro de nitrógeno o fósforo.		Complementar deficiencia de nutrientes con adición de productos químicos.
	Corte de flóculos causado por la turbulencia.		Reducir agitación.
Un manto de lodos se desborda del sedimentador secundario de manera uniforme sobre todo el tanque.	Tasa de lodos de retorno inadecuada.	Salida de lodos de retorno de la bomba, o profundidad de la capa de lodo.	<ul style="list-style-type: none"> - Si el bombeo de retorno esta funcionando mal, poner otra bomba en servicio y reparar. - Si la bomba esta en buenas condiciones, aumentar la tasa de retorno y monitorear la altura de lodo rutinariamente. Mantener de 30.5 a 91.5 cm la profundidad del manto. Si aumenta de profundidad, aumentar la tasa de retorno. - Limpiar la tubería de lodos de retorno.
	Distribución de caudal desigual a los sedimentadores causando sobrecarga hidráulica.	Caudal de cada sedimentador.	Ajustar válvulas y/o compuertas de entrada para igualar la distribución del caudal.

Tabla 4.8. Guía de solución de problemas en desinfección (EPA, 1978).

Observaciones	Causa probable	Revisar	Solución
Baja presión de gas cloro en el clorador.	Número insuficiente de cilindros conectados al sistema.	Reducir la velocidad de avance y revisar si la presión se eleva apreciablemente después de un periodo corto de tiempo. Si así es, ésta es la causa.	Conectar suficientes cilindros al sistema para que la velocidad de avance del cloro no exceda la tasa de retirada de los cilindros.
	Suspensión o restricción del flujo entre cilindros y cloradores.	Reducir la velocidad de avance y revisar efecto de enfriamiento en las tuberías de suministro continuo.	Desmontar el sistema de cloro en el punto donde el enfriamiento inicia, localizar la falla y limpiar con solvente.
No hay presión de gas cloro en el clorador	Los cilindros de gas están vacíos o desconectados al sistema.	Inspección visual.	Conectar los cilindros o llenarlos.
	Válvula reductora de presión obstruida o dañada.	Revisar válvula.	Reparar la válvula de reducción después de apagar las válvulas del cilindro, y la disminución de gas en el sistema de cabecera.
El clorador no alimenta de cloro.	La válvula reductora de presión en el clorador esta sucia.	Inspección visual.	- Desmontar el clorador y limpiar la válvula. - Preceder a la válvula con una trampa de sedimentos de filtro.
	El cilindro de cloro está más caliente que el aparato de control de cloro.	Temperatura del cilindro de cloro.	- Reducir la temperatura en la superficie del cilindro. - No conectar un cilindro nuevo que ha estado en el sol.

Observaciones	Causa probable	Revisar	Solución
El cloro gas se esta escapando de la válvula reductora de presión de cloro.	El diafragma principal de la válvula reductora de presión de cloro debido a la ruptura por: - Montaje inadecuado o fatiga. - Corrosión.		- Desmontar la válvula y el diafragma. - Revisar el sistema de suministro de cloro por intrusión de la humedad.
Problemas para obtener la tasa de alimentación máxima del clorador.	Presión de gas cloro inadecuada.	Presión del gas.	Aumentar la presión, reemplazar cilindros vacios o con niveles bajos.
	Bomba de inyección de agua obstruida con depósitos.	Revisar inyector.	Limpiar las partes del inyector usando ácido muriático. Enjuague con agua limpia y reemplace en el servicio.
	Fuga en la válvula de alivio de vacío.	Colocar la mano sobre la conexión de salida a la válvula de alivio de vacío, observar si esto provoca un mayor vacío y una mayor tasa de cloro de alimentación.	Desmontar la válvula de alivio de vacío y reemplazar todas las fuentes.
	Fugas de vacío en las uniones, tubos, articulaciones, etc. en el sistema de cloración.	Identificar la fuga.	Reparar todas las fugas de vacío apretando las uniones, reemplazándolas, reemplazando tubos y/o tuercas de compresión.
Problema para mantener la tasa de cloro de alimentación adecuada.	Mal funcionamiento o deterioro de la bomba de alimentación.	Revisar bomba.	Revisión de la bomba (tratar de cerrar la válvula lo necesario para mantener la presión de descarga adecuada).
Gran variación en el cloro residual del efluente producido	La dosis de cloro es insuficiente para satisfacer el caudal de la planta.	Comprobar la capacidad del dispositivo de cloro contra la capacidad necesaria de la planta.	Reemplazar con un clorador de mayor capacidad.

Observaciones	Causa probable	Revisar	Solución
Gran variación en el cloro residual del efluente producido.	Sólidos sedimentados en el tanque de contacto de cloro. El dispositivo de dosificación de cloro no está distribuido correctamente.	Sólidos en el tanque. Comprobar el cero del dispositivo de control de cloración.	Limpia el tanque de contacto de cloro. Volver a cero el dispositivo de acuerdo con las indicaciones del fabricante.
El controlador de cloro residual no funciona correctamente.	Electrodos. Tiempo de contacto demasiado largo. Pobre mezcla de cloro en el punto de aplicación.	Inspección visual. Revisar el tiempo de contacto. Establecer la tasa de alimentación de cloro a una dosis constante y analizar una serie de muestras al azar para mantener la coherencia.	Limpia electrodos. Reducir el tiempo de contacto mediante: - Mover el inyector más cerca del punto de aplicación. - Aumentar la velocidad en la tubería de la muestra a la celda de análisis. - Acercar la celda al punto de muestreo. - Acercar el punto de muestreo al punto de aplicación. Instalar un dispositivo de mezclado para causar turbulencia en el punto de aplicación.
Los coliformes no cumplen con la norma.	Capacidad inadecuada del equipo de cloración. Corto circuito en el tanque de contacto.	Revisar la capacidad del equipo de cloración. Tiempo de contacto.	Reemplazar el equipo si es necesario para proveer un tratamiento basado en el caudal máximo de la planta. Instalar un dispositivo de mezcla en la cámara de contacto.

Observaciones	Causa probable	Revisar	Solución
Los coliformes no cumplen con la norma (cont.).	Control inadecuado del cloro residual.	Registrar continuamente el residual en el efluente.	Usar un analizador de cloro residual para monitorear y controlar la dosis de cloro automáticamente.
	Acumulación de sólidos en la cámara de contacto.	Inspección visual.	Limpia la cámara de contacto para reducir los sólidos.
	Cloro residual muy bajo.	Cloro residual.	Aumentar el tiempo de contacto y/o aumentar la tasa de alimentación de cloro.
Cloro residual muy alto en el efluente de la planta para los requerimientos.	Cloro residual muy alto.	Determinar el nivel de toxicidad por bioensayos.	Instalar un declorador. Revisar dosis suministrada.

Tabla 4.9. Criterios de selección para la localización de puntos a adicionar químicos (Water Pollution Control Federation, 1990).

Químico	Propósito	Criterio de selección
Cloruro férrico	Control de olor y corrosión	Mezcla adecuada; antes de la caída libre o aeración; no utilice accesorios de metal, use tubos y accesorios de PVC.
	Reducción de DBO, SS, y de fosfatos.	No con cloración; mezcla adecuada; colocar en las obras de entrada o en el canal de influente primario; concentración baja de polifosfatos.
Sulfato de aluminio	Reducción de DBO, SS, turbiedad y de fosfatos.	Mezcla rápida o alta turbulencia; preferentemente después del tratamiento secundario; antes de la filtración; (15 a 20°C); pH 7.
Cal	Reducción de DBO, SS, y de fosfatos.	No recomendado antes de los lodos activados sin control de pH; después del sedimentador secundario; buena mezcla y turbulencia alta; baja alcalinidad; puede requerir un control posterior del pH.
Polímero catiónico	Reducción de SS y de turbiedad.	Antes del sedimentador secundario, al final del tanque de aeración o en el canal de alimentación del sedimentador; sin aeración; buena mezcla y baja turbulencia.
Cloruro ferroso	Reducción de DBO, SS, y H ₂ S.	Mezcla adecuada; antes de la caída libre o aeración; directamente en la tubería de alimentación del digester.
Cloro	Control de olor.	Buena mezcla; inyección sumergida; antes del salto hidráulico o aeración; es mejor en tubo cerrado que en canal abierto o tanque.
	Control de filamentosos.	Tubería de lodos activados de retorno, después del bombeo; aplicación directa a la pileta de aeración.
	Control de algas.	Alimentación periférica en los sedimentadores, alimentar a través de tubos perforados.
Peróxido de hidrógeno	Control de esponjamiento	Antes del tanque de aeración; canal del influente; tubo de lodos activados de retorno, después del bombeo.

Químico	Propósito	Criterio de selección
Peróxido de hidrógeno (cont.)	Control de olor	Buena mezcla; antes del salto hidráulico o aeración; es mejor en tubo cerrado que en canal abierto o tanque.
	Control de olor de lodos	Buena mezcla; únicamente tubos cerrados.
Permanganato de potasio	Control de olor de lodos	Antes del sistema de desagüe; antes de la adición de polímeros; la adición en tubo cerrado es mejor.
Aluminato de sodio	Reducción de fosfatos	Almacenamiento a temperatura ambiente cálido (15 a 20°C); mezcla rápida o alta turbulencia; preferentemente después del tratamiento secundario; antes de la filtración.

5. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA A LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CERRO DE LA ESTRELLA

En este capítulo, se muestran los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología propuesta en una serie de visitas de inspección a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Cerro de la Estrella.

5.1 Diagnóstico

5.1.1 Antecedentes de la planta de tratamiento

Planta de tratamiento “Cerro de la Estrella”

Dentro de toda la infraestructura de plantas en el Distrito Federal, destaca la planta de tratamiento “Cerro de la Estrella”, por su magnitud de 4000 L/s a nivel terciario. Se localiza en la zona sur-oriente de la ciudad, a un costado del Cerro de la Estrella en la delegación Iztapalapa y se aloja en una superficie de 9 ha. Fue construida en el año de 1967, y comenzó su operación en el año de 1971.

La planta de tratamiento “Cerro de la Estrella” inició su operación produciendo un caudal a nivel secundario de 2000 L/s que se usaba para el riego agrícola. Más tarde, la necesidad de agua residual tratada se diversificó y aumentó, por lo que las autoridades del Distrito Federal a través de la DGCOH, construyeron los módulos 3 y 4, así como las unidades de filtración rápida para alcanzar una producción nominal de 4000 L/s de agua a nivel terciario.

Actualmente la planta opera casi al 50%, siendo la planta de mayor capacidad de la Ciudad de México.



Figura 5.1. Vista aérea de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Cerro de la Estrella.

Tren de tratamiento

El agua recolectada de la zona para las cuales presta servicio esta planta, es transportada por una tubería general, que desemboca al colector “Río Churubusco”, de ahí se transporta hasta llegar a la estación de bombeo “San José Aculco”, que se sitúa en el cruce de las avenidas de Río Churubusco y Apatlaco en la delegación Iztacalco, donde es sometida a un pretratamiento que consta de un sistema de rejillas, y cuyo objetivo es la eliminación de sólidos de gran tamaño por medio de rejillas de contención.

Posteriormente es bombeada a través de una tubería de 1.83 m de diámetro realizando un recorrido de aproximadamente 8 km hasta llegar a la planta Cerro de la Estrella. Después de este recorrido entra a la planta.

El agua residual es obtenida principalmente de las descargas domésticas, así como de uso industrial, con lo cual se puede decir que llega una mezcla de la misma; sin embargo las características que presenta son las de un agua residual municipal típica. Esta se dirige por lo general al drenaje. Cuando la materia prima ingresa al influente necesita de 12 a 14 horas para llevar a cabo el proceso de tratamiento.

El influente llega a un canal de llegada; donde se depositan alrededor de 2.5 a 3 m³/s de agua residual en promedio. Este es conducido por canales tipo parshall, donde se lleva a cabo su medición, actualmente con la última modificación se ha instalado en el lado sur una criba tamiz que se encarga de eliminar las pequeñas basuras orgánicas e inorgánicas desde 6 mm y de mayor tamaño; de ahí es distribuido a cada uno de los 14 trenes de tratamiento independientes; divididos en cuatro unidades de proceso con los que actualmente cuenta la planta. Ahí el agua permanece entre 10 y 40 minutos.



Figura 5.2. Sistema de criba tamiz Planta de Tratamiento Cerro de la Estrella.

Posteriormente pasa al sedimentador primario, el cual es un sedimentador rectangular que está equipado con una catarina, y un motor adherido a cadenas sin fin; ésta mueve un sistema de rastras de madera de pino impermeabilizado, esto se hace con el objeto de que la madera tenga poca absorción. El sistema de rastreo en su parte superior se encarga de conducir los sobrenadantes de grasas y aceites hasta una canaleta de media caña para ser desechados del proceso. El objetivo de esta etapa, es lograr la eliminación de sólidos fácilmente sedimentables, y por otro lado hacerlo también con grasas, aceites y natas sobrenadantes; los cuales acumulan en la parte superior de la columna de agua. La materia inorgánica también es removida por el sistema de rastras instalado dentro del tanque, el cual se encarga de llevar los sólidos depositados en el fondo a una tolva receptora de sólidos para su posterior extracción, donde son eliminados del proceso mediante una purga. A la entrada del sedimentador existe un canal de distribución, el cual tiene como objetivo disminuir la velocidad con la cual llega. Aquí se mantiene alrededor de 1.30 o 1.40 hrs., con el objeto de que los sólidos que se encuentren sedimenten.



Figura 5.3. Sedimentador primario Planta de Tratamiento Cerro de la Estrella.

El efluente del sedimentador primario es conducido por medio de canaletas, hasta el tanque de aeración, y ahí se inicia el tratamiento secundario, el cual está compuesto por dos equipos:

El primero de ellos es un bioselector anóxico con agitación que ocupa un tercio del reactor biológico original, ésta es una de las modificaciones importantes que se llevaron a cabo para lograr elevar la capacidad operacional. Un bioselector anóxico es un tanque pequeño con tiempo de retención de 20 a 60 minutos, en el que el influente del reactor biológico es mezclado con los lodos de retorno bajo condiciones anóxicas. El bioselector favorece el crecimiento de las bacterias

formadoras de flóculos en lugar de bacterias filamentosas para proporcionar un lodo activado con mejor sedimentación.

El segundo es un reactor biológico de lodos activados convencional, el agua debe permanecer ahí de 6 a 7 horas según su diseño. El aire se suministra por medio de 6 sopladores con una potencia de 900 HP que alimentan a los difusores de aire que se encuentran en posición perpendicular. El sistema también cuenta con 25 filtros con microporos para minimizar el impacto del aire.



Figura 5.4. Sistema de Lodos Activados Planta de Tratamiento Cerro de la Estrella.

Posteriormente se pasa al sedimentador secundario, es un sedimentador rectangular con un tiempo de residencia puede variar entre 1.40 a 2.30 horas. Mediante un sistema de rastras ubicado en la parte media del tanque se recolecta el lodo sedimentado y es arrastrado hacia unas tolvas receptoras, y de ahí se recircula nuevamente por medio de bombeo al reactor biológico, posteriormente el agua ya clarificada pasa por la zona de vertedores a la etapa de filtración del proceso.

El sistema de filtración está compuesto de filtros rápidos tipo dual, es decir está integrado por dos capas de material filtrante que son arena y grava sílica soportados por una placa de material denominado "porex" que proporciona más capacidad filtrante. Cuando el medio filtrante se satura, se lleva a cabo un retrolavado que consiste en la inyección de agua a presión en contraflujo para limpiar de esta manera el medio filtrante. El producto del retrolavado es reciclado al inicio del proceso para su tratamiento. Este proceso tomaría entre 15 y 30 minutos, sin embargo actualmente está fuera de operación.

Por último, entra a la última etapa a la que se somete al agua, la cual consta de un procedimiento de saneamiento o desinfección. El tanque de cloración tiene una dimensión de 500 m y está diseñado en forma de laberinto con mamparas desfasadas, esto con la intención de lograr mayor contacto con el gas cloro, aquí permanece el agua entre 1.30 y 2 horas, donde se dosifican 1500 L de cloro por turno, siendo un total de tres turnos (3125 mL/min).

Al salir de la parte correspondiente a la cloración, se mantiene en un tanque de almacenamiento; en este tanque se encuentran instalados los equipos de bombeo que envían el agua tratada mediante 93 km de tubería mismos que conforman la red de distribución para los distintos usuarios. En la figura 5.5 se muestra el tren de tratamiento actual de la Planta de Tratamiento Cerro de la estrella:

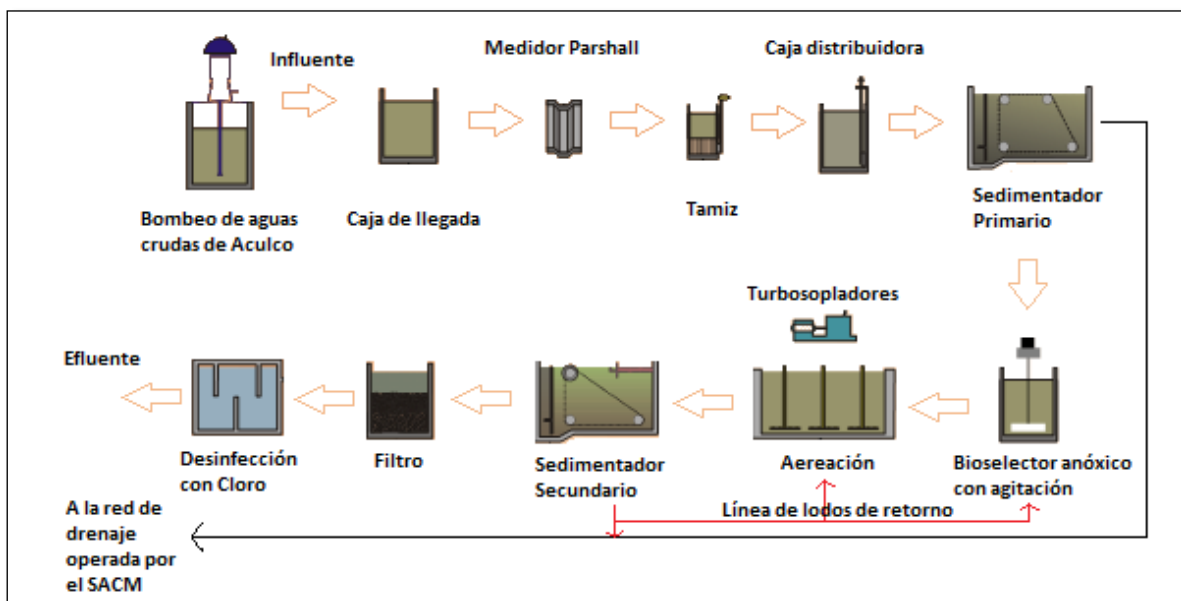


Figura 5.5. Diagrama de flujo actual Planta de Tratamiento Cerro de la Estrella.

Equipos auxiliares: Para poder realizar las funciones de la planta de tratamiento Cerro de la Estrella, se cuenta con una serie de equipos especiales, entre los que se pueden mencionar: dosificadores de cloro, tableros de control de motores, compresores de aire, subestación eléctrica y generadores de energía eléctrica, laboratorio para análisis del agua, así como la planta experimental de tratamiento avanzado para investigar los procesos más eficientes y económicos.

Uso del agua residual tratada

Del caudal tratado en la planta Cerro de la Estrella el 56% se emplea en el llenado de canales y lagos recreativos, así como en el riego agrícola; 25% para la recarga de acuíferos, 8% se utiliza en el sector industrial; 8% en el riego de áreas verdes, 3% se emplea en el sector comercial.

En cuanto a las industrias que surte, se encuentran empresas de rubros papelerero, textil y de limpieza general. Algunos de rubro comercial son servicios sanitarios y de lavado de autos.

5.1.2 Identificación del problema

Para evaluarla, inicialmente se tomaron los resultados de pruebas de operación realizadas en el laboratorio de la planta, se tomo un periodo de pruebas de Septiembre 2010 a Agosto 2011.

Los primeros datos analizados fueron los del influente de la planta, se corroboró que las características del influente no rebasen los límites recomendados para un tratamiento biológico mediante lodos activados convencional. Los resultados se muestran a continuación:

- Grasas y aceites: Se recomienda un valor límite de 50 mg/L (Eckenfelder, 1995), el influente de la planta tiene un promedio de 14 mg/L con una desviación estándar de 7.6 mg/L, por lo que esta dentro de los límites recomendados.
- Plomo: El límite recomendado es $Pb \leq 0.1$ mg/L (Eckenfelder, 1995), la planta tiene en promedio 0.06 mg/L y una desviación estándar de 0.005 mg/L.
- pH: Se recomienda un valor de pH mínimo de 6 y un máximo de 9, la planta tiene un valor promedio de 7.4 con una desviación estándar de 0.18, este parámetro tampoco está fuera del rango recomendado.

Según el análisis anterior, el influente de la planta no presenta problemas por los parámetros antes mencionados, por lo que ahora se prosigue con la evaluación de los sistemas que componen el tren de tratamiento.

Para la identificación de problemas, se identificó la calidad que debe cumplir según el uso para el cual está destinada el agua tratada. Según se vio en el Capítulo 2, la norma con la que se debe cumplir es la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público (Tabla 2.5). Según esta norma se puede decir que los límites que debe cumplir son:

- Coliformes fecales NMP/100 mL: 240
- Huevos de helminto (h/L): ≤ 1
- Grasas y aceites (mg/L): 15
- DBO_5 (mg/L): 20
- SST (mg/L): 20

Del análisis de datos de operación realizado, se obtuvieron las siguientes gráficas:

a) Influyente

Caudal (figura 5.6): Se observa que el caudal de entrada está muy por debajo al caudal de diseño, casi a una cuarta parte, en promedio $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ con una desviación estándar de $0.296 \text{ m}^3/\text{s}$.

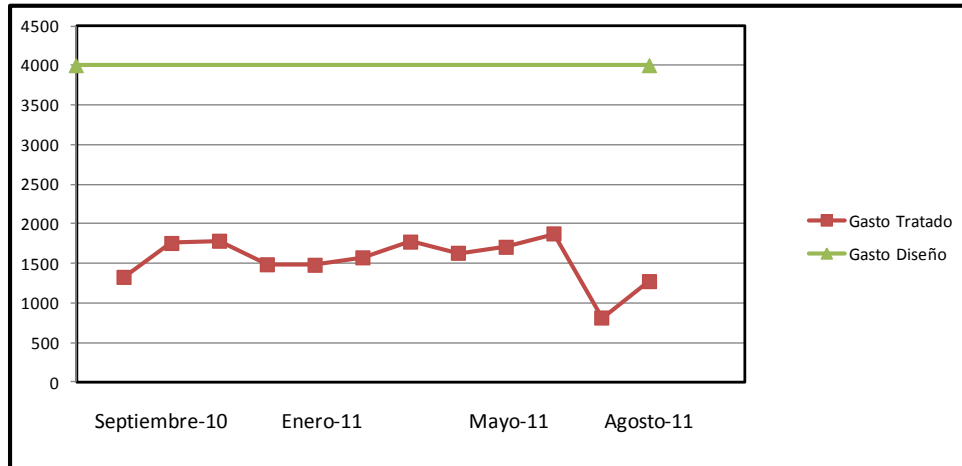


Figura 5.6. Caudal de diseño y actual tratado en la Planta de Tratamiento Cerro de la Estrella.

DQO (figura 5.7): La DQO de diseño de la planta es de 400 mg/L , en la gráfica se puede observar que esa capacidad no está siendo rebasada, teniendo un promedio actual de DQO de 320 mg/L y una desviación estándar de 73 mg/L .

DBO (figura 5.7): Al igual que la DQO, la DBO actual de entrada promedio es menor a la de diseño con un valor de 150 mg/L y una desviación estándar de 22 mg/L , mientras que el valor de diseño es de 217 mg/L .

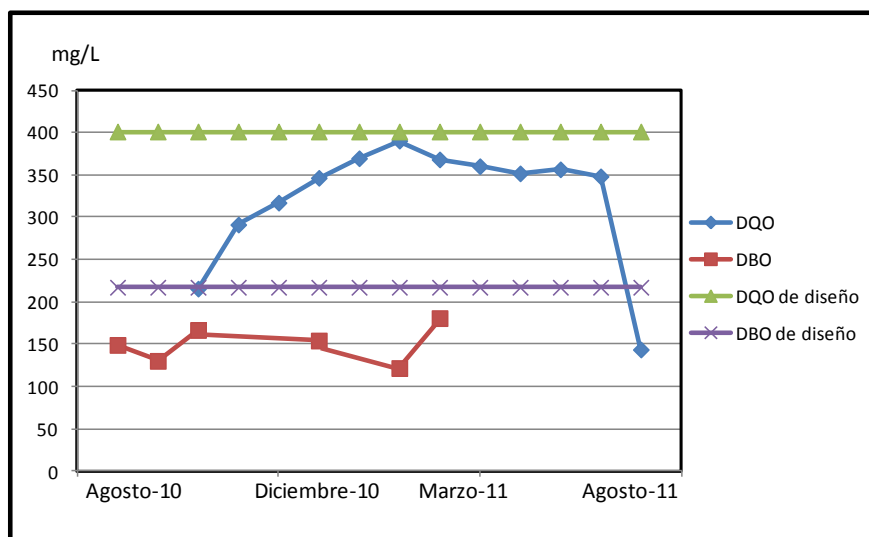


Figura 5.7. DQO y DBO de entrada a la Planta de Tratamiento Cerro de la Estrella.

b) Sedimentador Primario

Porcentaje de remoción de DQO: Según los parámetros de diseño de la planta, se estima un porcentaje de remoción de DQO del 13% en el sedimentador primario, como se observa en la figura 5.8, el porcentaje en promedio es cubierto, sin embargo la gráfica muestra grandes cambios indicando una gran inestabilidad del sistema, con un promedio de 11.29% y una desviación estándar de 4.74%.

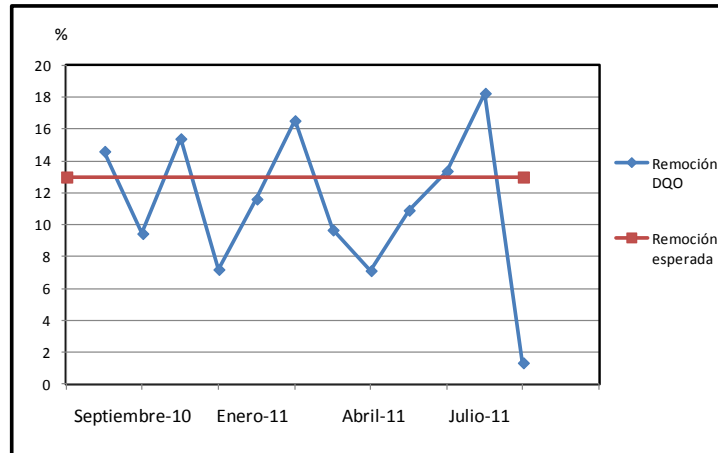


Figura 5.8. Porcentaje de remoción de DQO en el sedimentador primario de la planta de tratamiento Cerro de la Estrella.

c) Reactor biológico

Relación F/M (figura 5.9): Se ha citado que el rango ideal de este parámetro es de 0.2 a 0.5 kgDBO/kgSSL/d (Metcalf-Eddy, 2003), para el caso de la Planta Cerro de la Estrella el resultado es en promedio 0.44 kgDBO/kgSSL/d y una desviación estándar de 0.12 kgDBO/kgSSL/d:

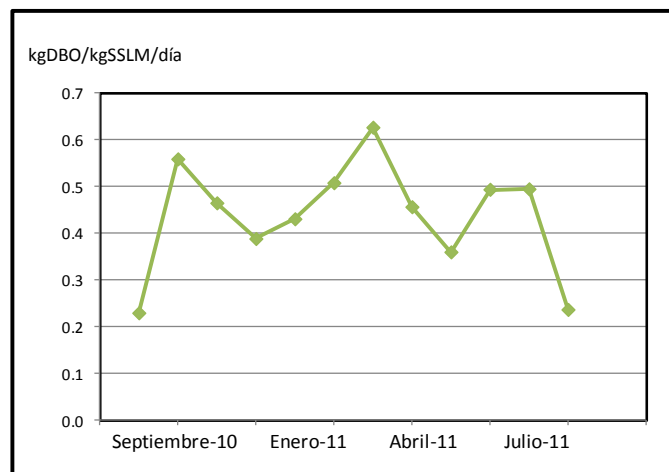


Figura 5.9. Relación F/M en el reactor biológico de la Planta de Tratamiento Cerro de la Estrella.

Índice Volumétrico de Lodos (figura 5.10): La gráfica nos muestra que estos valores se apegan a lo recomendado que es de 100 a 150 mL/g (Metcalf-Eddy, 2003).

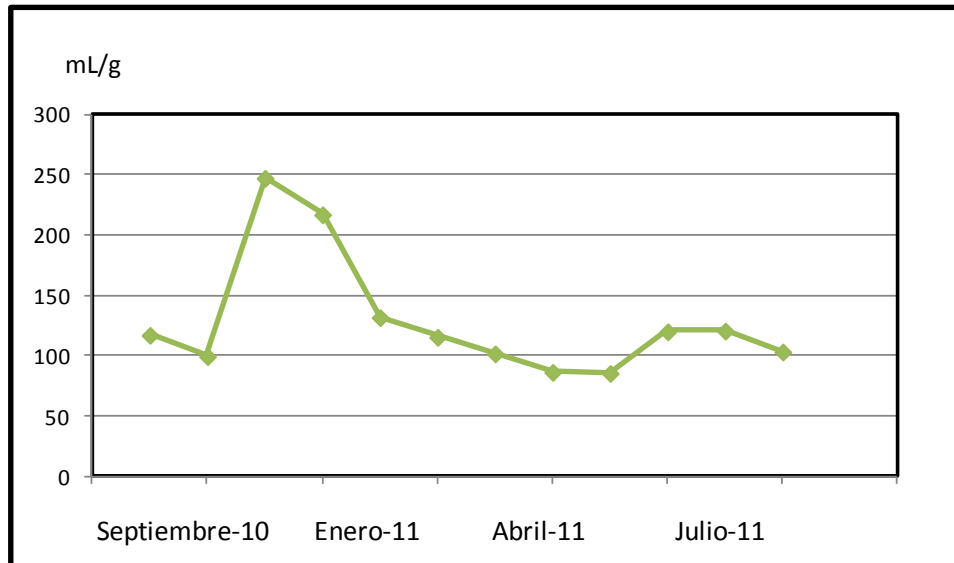


Figura 5.10. Índice Volumétrico de Lodos de la Planta de Tratamiento Cerro de la Estrella.

Tiempo medio de retención celular (figura 5.11): Este parámetro se encuentra por debajo de lo recomendado que es de 5 a 15 d en sistemas convencionales (Metcalf-Eddy, 2003).

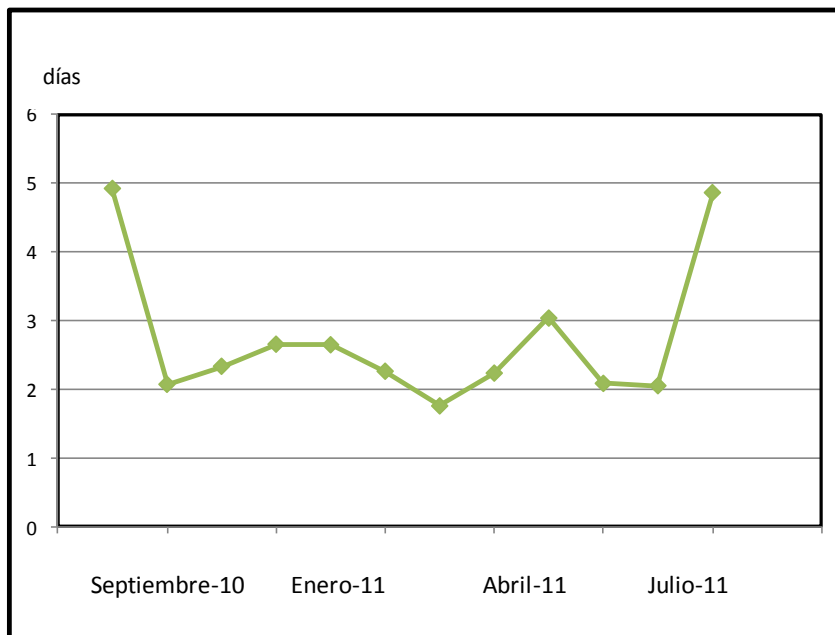


Figura 5.11. Tiempo medio de retención celular en el reactor biológico de la planta de tratamiento Cerro de la Estrella.

Oxígeno Disuelto (figura 5.12): La gráfica muestra un exceso en la aeración del sistema, ya que se están alcanzando niveles cercanos a la saturación, siendo que el nivel mínimo recomendado para este proceso es de 2 mg/L (Metcalf-Eddy, 2003), indicando que la aeración podría ser disminuida. En promedio el oxígeno disuelto en el tanque de aeración es 4.19 mg/L con una desviación estándar de 0.68 mg/L.

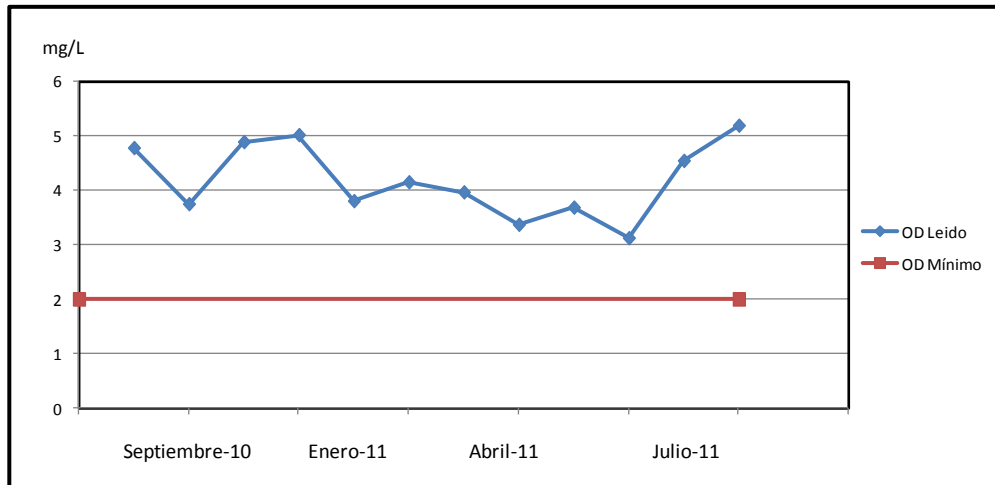


Figura 5.12. Oxígeno Disuelto en el tanque de aeración de la planta de tratamiento Cerro de la Estrella.

Es importante realizar en el proceso biológico un análisis del tiempo de retención actual y compararlo con el tiempo de retención de diseño para la evaluación de la planta. El tiempo de retención hidráulico se determina mediante:

$$Q = A v = \frac{V}{t}$$

Sabiendo que el caudal de diseño de la planta es de 4 m³/s y que se cuenta con 4 unidades operando, el caudal de cada unidad será de 1 m³/s. El tiempo de retención hidráulico teórico es de 6 horas, por lo tanto el volumen de una unidad total es:

$$V = Q t = \left(1 \frac{m^3}{s}\right)(21\ 600\ s) = 21\ 600\ m^3$$

Sin embargo el caudal actual promedio por unidad es de 0.384 m³/s, con el volumen que se obtuvo anteriormente se puede determinar el tiempo de retención hidráulico actual:

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{21\ 600\ m^3}{0.384\ m^3/s} = 15.6\ horas$$

Con lo anterior podemos concluir que el tiempo de retención que se le está suministrando al tratamiento del agua residual es 2.6 veces la de diseño, por lo que esta rebasado.

Para identificar el tipo de proceso de lodos activados, se obtienen los siguientes valores para comparar con la tabla 3.6.

El valor de tiempo de retención celular promedio que se reporta de la planta es $\theta_c = 2.74$ d. El valor promedio de F/M es de 0.44 d^{-1} , con lo que se obtiene el promedio de la carga volumétrica (Cv) y los SSVLM.

$$Cv = \frac{Q \times \text{DBOe}}{V} = 0.29 \text{ kg de DBO}_5 / \text{m}^3 \text{d}$$

$$\text{SSVLM} = \frac{\text{DBOe}}{F/M \times \theta} = 528.21 \text{ mg/L}$$

Considerando que los SSVLM = 0.8 SSLM, implica que los SSLM = 660.26 mg/L.

Según estos resultados, debido al gran tiempo de retención hidráulico, el proceso se acerca a uno de aeración prolongada, siendo que fue diseñado como convencional.

d) Efluente

DBO (figura 5.13): La DBO del efluente de la planta de tratamiento Cerro de la Estrella, cumple con la normatividad descargando en promedio 4.8 mg/L con una desviación estándar de 1.81 mg/L, se cree que valores de DBO de descarga tan bajos son debidos a los altos tiempos de retención hidráulico que se le proporciona.

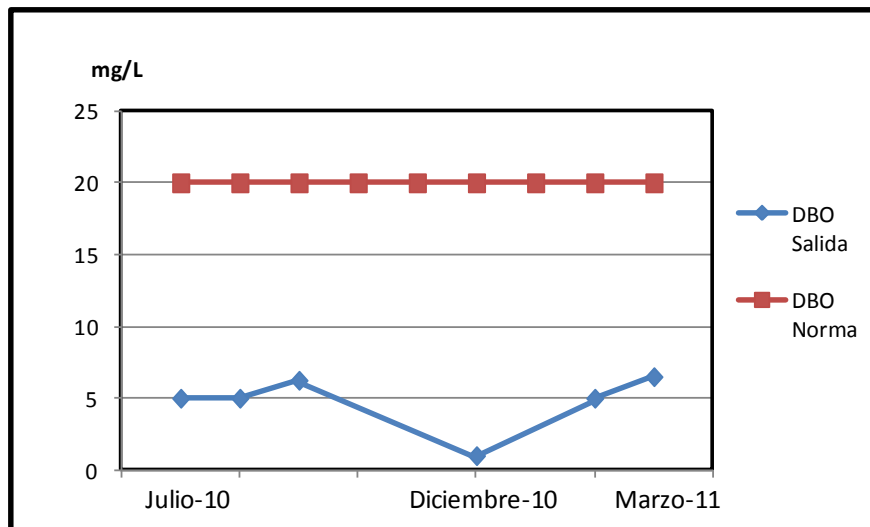


Figura 5.13. DBO de descarga de la Planta de Tratamiento Cerro de la Estrella.

DQO (figura 5.14): La DQO del efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales tiene grandes variaciones, en promedio es de 31 mg/L con una desviación estándar de 6 mg/L.

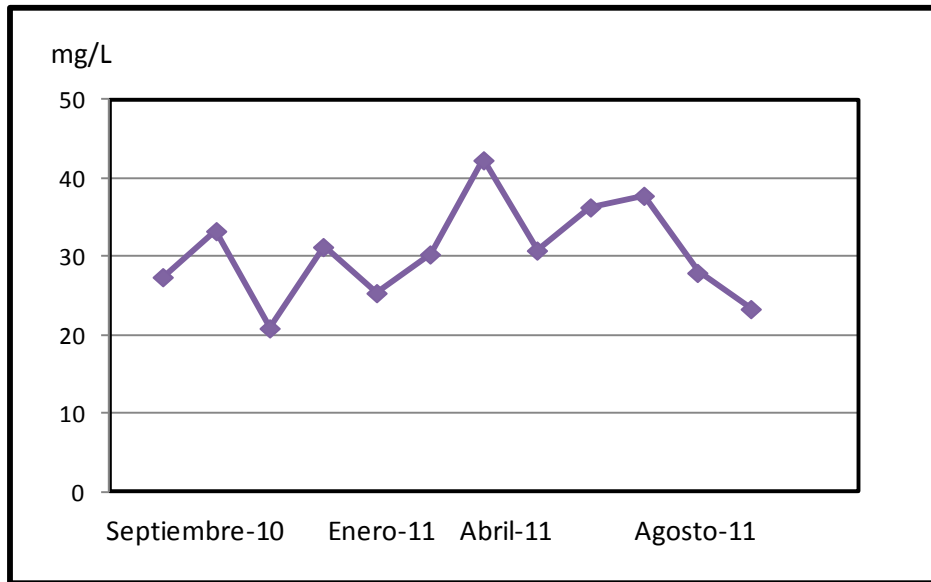


Figura 5.14. DQO de descarga de la Planta de Tratamiento Cerro de la Estrella.

Dosis de cloro (figura 5.15): Se observa que la dosis de cloro suministrada es muy baja. Según la tabla 3.7 se recomienda una dosis de 2 a 8 mg/L, mientras que el promedio de dosis suministrada es de 2.25 mg/L con una desviación estándar de 0.28 mg/L; sin embargo ésta es solo una recomendación, ésta dosis debe ser determinada experimentalmente.

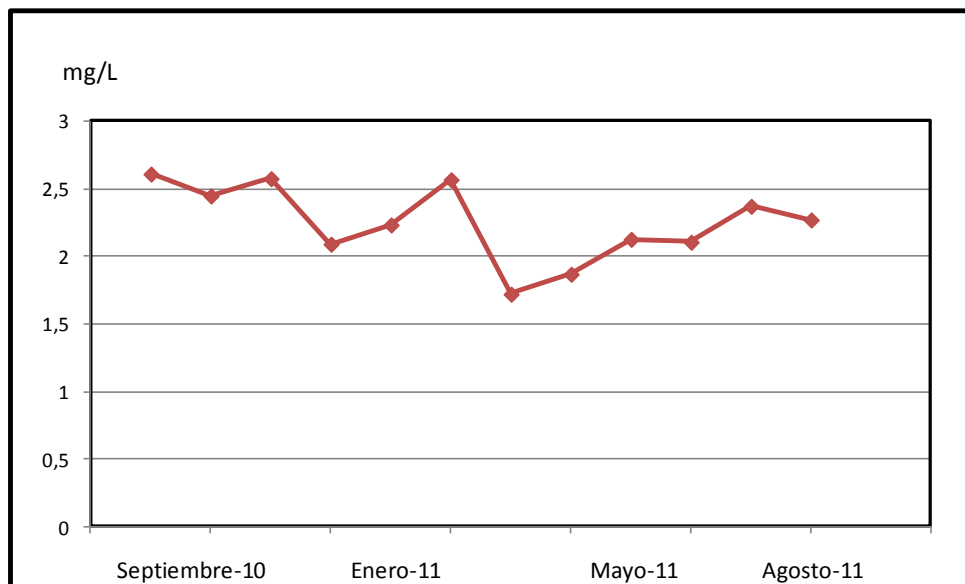


Figura 5.15. Dosis de cloro suministrada en la Planta de Tratamiento Cerro de la Estrella.

Cloro residual libre (figura 5.16): Debido a la baja dosis de cloro suministrada, el cloro residual libre es muy bajo o no detectado.

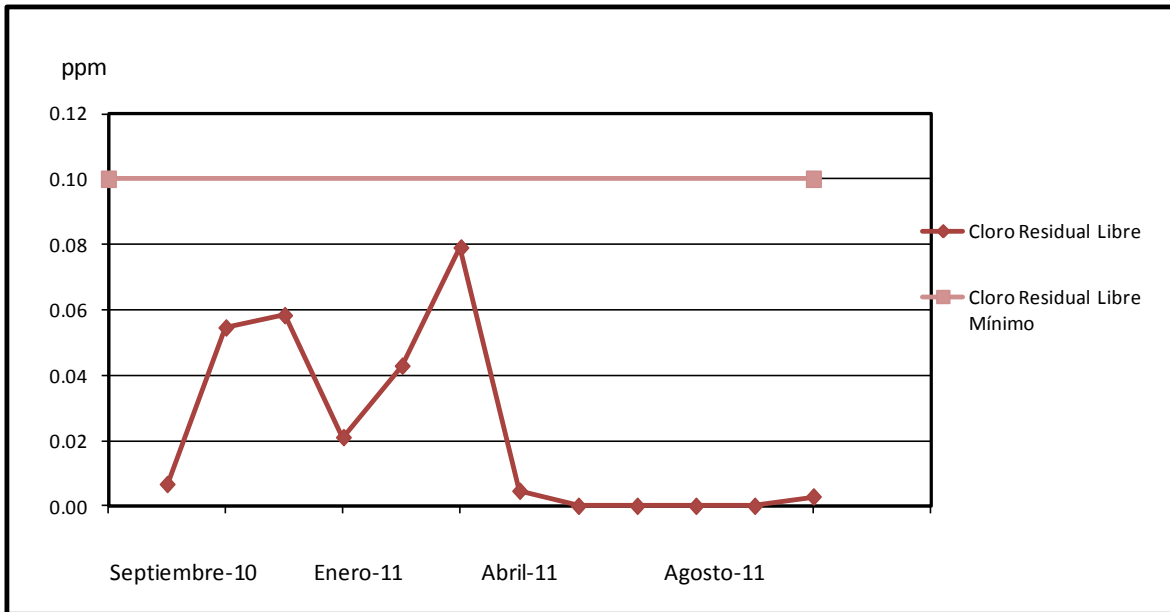


Figura 5.16. Cloro Residual Libre en Planta de Tratamiento Cerro de la Estrella.

Coliformes fecales (figura 5.17): Por la baja cantidad de cloro suministrado y el cloro residual libre que es tan bajo, el efluente de la planta no cumple el nivel máximo permisible de coliformes fecales, sobrepasándolo por mucho.

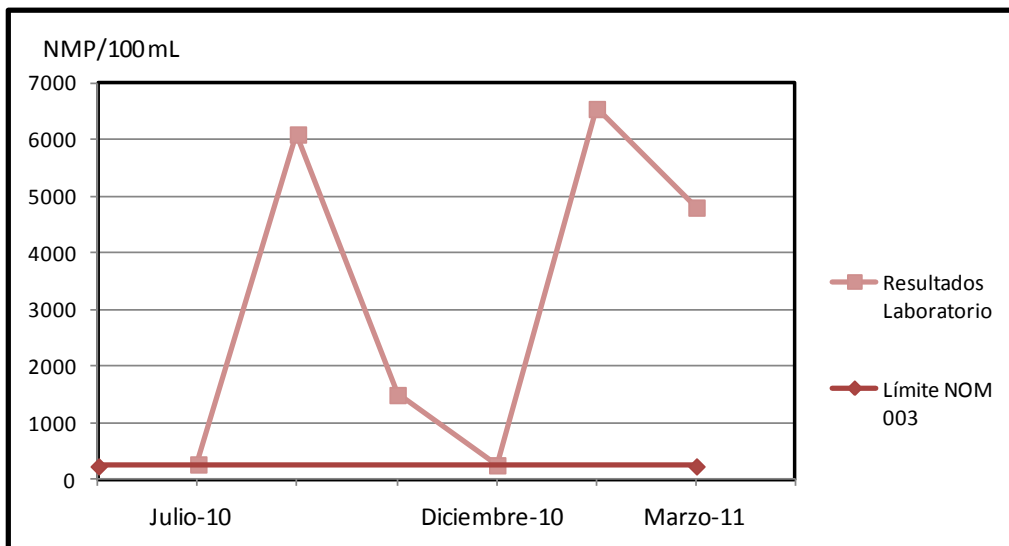


Figura 5.17. Coliformes fecales en la descarga de la Planta de Tratamiento Cerro de la Estrella.

5.2 Planteamiento de alternativas

Las gráficas anteriores proporcionan la información necesaria para la evaluación de la planta en cuanto a la operación que está recibiendo, se ha podido observar los puntos en los que requiere mayor atención así como alguna corrección.

a) Influyente

Según la figura 5.6, la planta está trabajando a tan solo el 37.5% de su capacidad, se sabe que la DBO y DQO de diseño (figura 5.7) no han sido rebasadas, por lo que se descarta que se deba a un exceso de carga orgánica. Por informes del personal se sabe que la planta no funciona a su capacidad de diseño, en parte porque la tubería de lodos de retorno es insuficiente para el caudal de diseño. Se recomienda la instalación de las tuberías necesarias para cubrir el caudal de lodos de retorno, calculándolo bajo condiciones de caudal de diseño. Además de considerar hacer las modificaciones requeridas a los criterios de operación para continuar con la eficiencia de remoción hasta ahora obtenida.

b) Sedimentador primario

En la figura 5.8 se observan grandes variaciones en el porcentaje de remoción de DQO, se recomienda poner atención a estos cambios bruscos para que el sistema opere de manera más estable.

c) Reactor biológico

Según la figura 5.9 el F/M se encuentra dentro del intervalo recomendado, así como el IVL (figura 5.10), lo que indica que la operación es adecuada. Sin embargo, la figura 5.11 indica un tiempo medio de retención celular por debajo de lo recomendado, esto indica que se trabaja con lodos jóvenes y un tasa F/M muy cercana al límite superior. El F/M puede ser reducido para obtener un tiempo medio de retención celular cercano a los valores recomendados.

La figura 5.12 indica niveles de OD por encima de lo recomendado produciendo un gasto innecesario, se recomienda ajustar el suministro de oxígeno para mantener el tanque a un nivel de 2 a 3 mg/L.

El tiempo de retención hidráulico resulta ser de 15.6 horas, es decir 2.6 veces mayor al de diseño; con esto se identificó que el sistema está operando como uno de aeración prolongada. Este alto tiempo de retención se debe al bajo caudal de entrada, es necesario realizar pruebas de tratabilidad ya que puede presentarse una materia orgánica más resistente a la degradación que requiere un tiempo de retención mayor.

d) Efluente

En las figuras 5.13 y 5.14 se observa que la concentración de DBO y DQO es aceptable.

El cloro residual libre (figura 5.16), en muchos de los meses es indetectable y en otros muy bajo, lo que provoca la presencia de coliformes fecales en el efluente de la planta que sobrepasan la

norma (figura 5.17). Se recomienda determinar la dosis de cloro necesaria experimentalmente y monitorear continuamente la presencia de coliformes fecales en el efluente ya que esta no es una prueba realizada en la planta. Aplicando la tabla 4.8, se recomienda revisar si es un problema del tiempo de contacto y/o la tasa de alimentación.

En el tanque sedimentador secundario se observa un crecimiento de algas pegadas a las paredes, según la tabla 4.9, es recomendable alimentación periférica de cloro, o bien para evitar problemas con los lodos de retorno, mantener bajo vigilancia la limpieza y el mantenimiento del tanque.

Existe un sistema de filtración que se encuentra fuera de operación, es recomendable reparar y poner en operación nuevamente.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De los resultados obtenidos, se concluye que la metodología sugerida en este trabajo permite evaluar la eficiencia de operación de los diversos componentes que constituyen las plantas de lodos activados convencionales.

Del total de las plantas de tratamiento en el Distrito Federal, según la CONAGUA, la mayoría trabaja por debajo de su capacidad de diseño, esto indica que se requiere de inversión para su rehabilitación. Debido a la gran sobrepoblación que provoca una insuficiencia de espacio en el Distrito Federal para instalar nuevas plantas, conviene rehabilitar las ya instaladas; además de considerar la gran inversión inicial que todas estas plantas requirieron y que no está siendo aprovechado al máximo.

De la aplicación de esta metodología para evaluar el funcionamiento de la Planta de Tratamiento Cerro de la Estrella, se obtuvo:

- Aunque la planta fue diseñada para $4 \text{ m}^3/\text{s}$, el caudal tratado es casi una cuarta parte, esto puede ser por una o varias de las razones anteriormente mencionadas.
- La DQO y DBO de entrada son similares a los de diseño, sin embargo los tiempos de retención son mucho más altos a los de diseño, es posible que esto se deba a que presenta una materia orgánica más resistente a la degradación.
- El Oxígeno Disuelto en el reactor biológico se encuentra muy por encima del nivel mínimo recomendado, por lo que se pueden obtener ahorros al disminuir la aeración obteniendo buenos resultados.
- Aún con las variaciones que se tienen de F/M, el efluente cumple con la norma, se cree que se debe al gran tiempo de retención hidráulico que se le esta proporcionando.
- La dosis de cloro no es suficiente por lo que el cloro residual libre es muy bajo o no detectable y los coliformes fecales sobrepasan la norma.

Se recomienda mediante pruebas de tratabilidad, verificar la hipótesis sobre la resistencia a degradación de la materia orgánica, incluyendo la determinación de las dosis de cloro.

Dado que no hay sistema de control de caudal de retorno, se recomienda instalar uno.

Dado que existe un crecimiento de algas, se recomienda verificar si contribuye a la carga de DBO del efluente y en el consumo de cloro.

Se recomienda hacer un análisis para determinar el volumen del sistema de lodos de retorno, revisar la factibilidad para corregirlo y obtener un caudal tratado mayor.

Ya que se cuenta con sistema de filtración, se recomienda reparar y poner de nuevo en operación, de esta manera llegar a una calidad que puede ser suficiente para fines más exigentes.

Los alcances de esta tesis llegan a este punto, ya que procedería realizar un análisis económico de las posibles soluciones y elegir entre las mejores para aplicarlas a la planta y rehabilitarla, de este modo llevarla lo más cercano posible a que su caudal de entrada sea su caudal de diseño, o bien, observar las nuevas dificultades que surjan.

BIBLIOGRAFÍA

- (CEPIS), C. P. *Módulos de Formación y de Perfeccionamiento del personal de las plantas de tratamiento de aguas residuales.*
- APHA, AWWA, WPCF. (1992). *Standard Methods.*
- Arboleda Valencia, J. (1974). *Métodos de evaluación de procesos en plantas de tratamiento de agua.* Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS).
- CONAGUA. (2011). *Estadísticas del Agua en México, 2011.*
- CONAGUA. (2010). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación.*
- Da Cámara, L. (2000). *Manual de Diseño para plantas de tratamiento de aguas residuales alimenticias.* Departamento de Fenómenos de Transporte.
- Daigger, G. T. (1992). *Upgrading Wastewater Treatment Plants.*
- Eckenfelder, W. (1995). *Activated Sludge Treatment of Industrial Wastewater.* Technomic Publishing Company Inc.
- EPA. (1978). *Field Manual for Performance Evaluation and Troubleshooting at Municipal Wastewater Treatment Facilities.*
- EPA. (1979). *Inspectors Guide for Evaluation of Municipal Wastewater Treatment Plants.*
- EPA. (2010). *Interactive Handbook for Managing Individual and Clustered Wastewater Treatment Systems, Resource Guide 12 Inspection and Monitoring.*
- EPA. (2010). *Interactive Handbook for Managing Individual and Clustered Wastewater Treatment Systems, Resources Guide 9 Operation and Maintenance.*
- Fair, G. (2008). *Purificación de aguas, tratamiento y remoción de aguas residuales.* Limusa.
- Federation, W. P. (1987). *Activated Sludge, Manual of practice no. OM-9.*
- Federation, W. P. (1990). *Operation of Municipal Wastewater Treatment Plants, Volume II Liquid Processes.*
- González, E. P. (2001). *Canal Parshall.* Obtenido de Coordinación de Tecnología Hidráulica (IMTA): http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/canal_parshall.pdf
- Industries, B. (2009). *Integrated Fixed Film/ Activated Sludge (IFAS) Systems.* Obtenido de http://www.brentwoodindustries.com/water/ifas_main.html
- Masters, G. M. (2007). *Introduction to environmental engineering and science.*

- Metcalf-Eddy. (2003). *Wastewater Engineering. Treatment and Reuse*. California: Mc Graw Hill.
- Mihelcic, J. R. (2008). *Fundamentos de Ingeniería Ambiental*. Limusa.
- Miryoussef Norouzian, A. V. (1985). *Capacitación de operadores de plantas de tratamiento de aguas residuales*. Instituto de Ingeniería.
- Ramalho. (1990). *Tratamiento de Aguas Residuales*.
- Sainz Sastre, J. A. (2005). *Tecnologías para la sostenibilidad: procesos y operaciones unitarias en depuración de aguas residuales*. EOI.
- Solutions, L. W. (2011). *Moving bed biofilm reactor*. Obtenido de <http://lenntech.com/processes/mbbr.htm>
- Sotelo Avila, G. (1995). *Hidráulica General*. Limusa.
- Vater, W. (1992). *Módulos de formación y de perfeccionamiento del personal de las plantas de tratamiento de aguas residuales*. Programa de Salud Ambiental.
- Water Pollution Control Federation. (1990). *Operation of Municipal Wastewater Treatment Plants, Volume I Management and Support Systems*.
- Wiley. (1980). *Weirs and Flumes for Flow Measurement*.
- Winkler, M. A. (1994). *Tratamiento biológico de aguas de desecho*. Limusa.

REFERENCIAS

- CONAGUA. (2011). *Estadísticas del Agua en México, 2011*.
- CONAGUA. (2010). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación*.
- Da Cámara, L. (2000). *Manual de Diseño para plantas de tratamiento de aguas residuales alimenticias*. Departamento de Fenómenos de Transporte.
- Daigger, G. T. (1992). *Upgrading Wastewater Treatment Plants*.
- Eckenfelder, W. (1995). *Activated Sludge Treatment of Industrial Wastewater*. Technomic Publishing Company Inc.
- EPA. (1978). *Field Manual for Performance Evaluation and Troubleshooting at Municipal Wastewater Treatment Facilities*.
- EPA. (2010). *Interactive Handbook for Managing Individual and Clustered Wastewater Treatment Systems, Resource Guide 12 Inspection and Monitoring*.
- EPA. (2010). *Interactive Handbook for Managing Individual and Clustered Wastewater Treatment Systems, Resources Guide 9 Operation and Maintenance*.
- Masters, G. M. (2007). *Introduction to environmental engineering and science*.
- Metcalf-Eddy. (2003). *Wastewater Engineering. Treatment and Reuse*. California: Mc Graw Hill.
- Mihelcic, J. R. (2008). *Fundamentos de Ingeniería Ambiental*. Limusa.
- Miryoussef Norouzian, A. V. (1985). *Capacitación de operadores de plantas de tratamiento de aguas residuales*. Instituto de Ingeniería.
- Sainz Sastre, J. A. (2005). *Tecnologías para la sostenibilidad: procesos y operaciones unitarias en depuración de aguas residuales*. EOI.
- Sotelo Avila, G. (1995). *Hidráulica General*. Limusa.
- Vater, W. (1992). *Módulos de formación y de perfeccionamiento del personal de las plantas de tratamiento de aguas residuales*. Programa de Salud Ambiental.
- Water Pollution Control Federation. (1990). *Operation of Municipal Wastewater Treatment Plants, Volume I Management and Support Systems*.
- Winkler, M. A. (1994). *Tratamiento biológico de aguas de desecho*. Limusa.