

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA AMAZONÍA PERUANA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE UN PROTOTIPO DE EQUIPO CLARIFICADOR HORIZONTAL PARA AGUAS SUPERFICIALES EN LA AMAZONIA PERUANA”

TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO

PRESENTADO POR:

Bach. BARBARAN VERA. Luigi Sly.

Bach. MENDOZA RUIZ. Sandro Humberto.

Bach. SAENZ GUILLEN. Christian Fernando.

ASESOR: ING. JORGE CORNEJO ORBE

IQUITOS – PERÚ

2016

MIEMBROS DEL JURADO



ING. LAURA ROSA GARCÍA PANDURO
CIP: 23792
Presidente



ING. VÍCTOR GARCÍA PÉREZ.
CIP: 33277
Miembro



ING. LUIS GÓMEZ TUESTA
CIP: 55288
Miembro



ING. JORGE ENRIQUE CORNEJO ORBE.
CIP: 93663
Asesor

DEDICATORIA

A mi hermosa mamá Isabel Ruiz, a mi papá Juan Mendoza, a mi hermano José Carlos Mendoza, a todos mis tíos y tías, a mi comprensible novia, a la familia de mi novia; y demás familiares que de muchas formas me apoyaron durante mi formación académica y profesional.

Sandro Humberto Mendoza Ruiz

AGRADECIMIENTO

A mi Madre Rosa Isabel Ruiz Huasanga y mi Padre Juan Climaco Mendoza Tuanama por su esmero, apoyo, comprensión y sus sabios consejos durante toda mi vida, a mi novia por su cariño constante y sus motivaciones en mis estudios; y a todas las personas que me apoyaron en mi vida profesional.

Sandro Humberto Mendoza Ruiz

INDICE

PÁGINA DE JURADO Y ASESOR.....	i
DEDICATORIAS.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
PÁGINA DE CONTENIDO.....	iv
ANTECEDENTES	vii
INTRODUCCIÓN.....	ix
OBJETIVOS	x
- GENERAL:	
- ESPECÍFICOS:	
JUSTIFICACIÓN	xi
CAPITULO I: MARCO TEORICO.....	1
1.1 El Agua.....	1
1.1.1 Estructura del Agua	1
1.1.2 Propiedades Físicas del Agua	2
1.1.3 Propiedades Químicas del Agua	4
1.1.4 Tipos de Agua	6
1.2 Teoría sobre Aguas Turbias.....	7
1.3 Variables y aplicaciones más importantes del proceso primario de tratamiento de aguas residuales.....	9
1.3.1 Variables de Proceso	9
1.3.2 Elementos de medición y transmisión	9
1.3.3 Consideraciones, selección de la tecnología y el sistema de tratamiento	10
1.4 Operaciones en el proceso de purificación del agua	17
1.4.1 Tipos de plantas de purificación	17
1.4.2 Mezcla Rápida	22
1.4.2.1 Mezcladores Rápidos Hidráulicos	23
1.4.3 Floculación	28
1.4.3.1 Tipos de Floculadores	29
1.4.4 Sedimentación	41
1.4.4.1 Tipos de Sedimentación	42
1.4.4.2 Sedimentación Tipo 1	44
1.4.5 Filtración	63
1.4.5.1 Mecanismo de Remoción	63
1.4.5.2 Descripción de la Filtración	67

1.4.5.3	Sistemas de Filtración	68
1.4.5.4	Hidráulica de la Filtración	74
1.4.5.5	Selección de Medio Filtrante	79
1.5	Descripción de las partes principales del equipo.....	83
1.5.1	Partes principales del equipo	83
1.6	Variables para el diseño y construcción del equipo	83
1.7	Uso del equipo en la industria.....	84
CAPITULO II:	CONDICIONES Y CÁLCULO DE DISEÑO	85
2.1	Condiciones para el diseño: Variables específicas del diseño.....	85
2.1.1	Definición del Tamaño de Equipo	85
2.1.2	Volumen del tanque cilíndrico horizontal (V_{tc})	85
2.1.3	Longitud del tanque cilíndrico horizontal (L_{tkc}).....	86
2.1.4	Diámetro del tanque cilíndrico horizontal (D_{tc})	87
2.2	Cálculos efectuados para el diseño	87
2.2.1	Condiciones iniciales a considerar en el diseño	87
2.2.2	Cálculo del Largo del tanque cilindrico en el diseño	87
2.2.3	Cálculo del Diámetro del tanque cilindrico Horizontal.....	88
2.2.4	Cálculo de la dimension de la plancha de acero inoxidable a cortar.....	88
2.2.5	Cálculo del segmento esférico.....	89
CAPITULO III:	CONSTRUCCION E INSTALACION DEL EQUIPO	91
3.1	Selección de Materiales	91
3.2	Materiales Empleados	93
3.3	Descripcion y especificaciones de los componentes del equipo de tratamiento de aguas turbias.....	94
3.3.1	Cuerpo cilíndrico del equipo: características Tecnicas.....	94
3.3.2	Casquetes Esféricos: características Tecnicas.....	94
3.4	Ensamblado, despliegue y Vistas principales del equipo instalado (H, F y P) cortes y secciones.....	95
3.5	Disposición adecuada del equipo en el laboratorio	98
CAPITULO IV:	EVALUACION DE LOS PARAMETROS Y CONTROL DEL EQUIPO	99
4.1	Descripcion del funcionamiento del equipo	99
4.1.1	Equipo para el proceso de contacto con los sólidos	99
4.1.2	Coagulación y floculación.....	100
4.2	Evaluación y calculo delTiempo de retención (Tr) estimado	101
4.3	Ensayos y pruebas del funcionamiento del equipo	102
4.4	Análisis de los resultados obtenidos.....	102

4.5 Determinacion de las condiciones óptimas del funcionamiento del equipo	102
4.6 Diseño Experimental	103
4.7 Manual de instrucciones para el funcionamiento del equipo	103
4.8 Aspecto de seguridad e higiene industrial	106
CAPITULO V: ANALISIS DE COSTOS.....	107
5.1 Costo de diseño	107
5.2 Costo de materiales.....	107
5.3 Costo de construcción e instalación	108
5.4 Costo de ensayos y pruebas de funcionamientos.....	108
5.5 Costos Varios	108
5.6 Costo Total.....	109
RESULTADOS Y DISCUSIONES	109
CONCLUSIONES.....	111
RECOMENDACIONES.....	112
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	113
ANEXOS	116

ANTECEDENTES

Los procesos industriales tienen como objetivo fundamental la transformación de insumos o materia prima en bienes de consumo masivo; en este sentido lo que se busca es crear equipos que cumplan con las exigencias mencionadas.

El tratamiento de aguas turbias encaja en las exigencias dichas anteriormente. Es de conocimiento público que hoy en día las Universidades del Perú se encuentran centrados y enmarcados a desarrollar proyectos de interés académico para implementar módulos (Laboratorios).

La Facultad de Ingeniería Química actualmente cuenta con un equipo de tratamiento para agua con color (ejemplo: Rio Nanay).

El marco que regula los recursos hídricos es Ley de Recursos Hídricos N 29338 cuyos principios son: Valoración del agua y de gestión integrada, prioridad de acceso al agua, participación de la población y cultura, seguridad jurídica, respeto del agua de las comunidades, principio sostenible, descentralización de la gestión pública del agua, carácter precautorio, eficiencia, gestión de cuencas y tutela jurídica. La ley establece la existencia del Sistema Nacional de Gestión de Recursos Hídricos, cuyo ente rector es la Autoridad Nacional del Agua. El Reglamento de la Ley 29338 está Bajo Decreto Supremo N 002-2008-MINAM; donde se especifican los Estándares de Calidad Ambiental para Agua.

La Ley General de Aguas establece lo siguiente: (i) el gobierno nacional es el único propietario y responsable de la gestión de los recursos hídricos; (ii) la autoridad nacional del agua es el Ministerio de Agricultura (MINAG); órgano al que la recientemente creada Autoridad Nacional de Aguas (ANA) rinde cuentas; (iii) el Administrador Técnico de Distrito de Riego (ATDR) es la autoridad a nivel de distrito, y las Autoridades de Cuenca Hidrográfica, a nivel de cuencas y (iv) el Ministerio de Salud es el responsable de la calidad del agua.

Desde 1993 hasta 2003, el gobierno peruano aprobó una serie de leyes sectoriales para regular el uso del agua a través de diferentes acciones, como la Ley de Promoción de las Inversiones en el Sector Agrario (Dec. Leg. 653), Ley de Promoción de las Inversiones en el Sector Pesquero (DL 750), Ley General de Hidrocarburos (DL 26221), Ley General de Minería (DS 014-92-EM), Ley de Concesiones Eléctricas (DL 25844) y Ley General de Turismo (Ley N° 24027).

Existen empresas dedicadas a la fabricación y comercialización de equipos e instrumentos semejantes al equipo en cuestión al que desarrollaremos, tales como NOVE, NOVARSÁ, ACS, etc., con la finalidad de cuidar el medio ambiente y la salud de sus consumidores.

Tales legislaciones se aplican no solamente a la contaminación del medio ambiente y recursos naturales, sino que controla la instalación de los medios para el tratamiento, requiriendo la aprobación del diseño y la supervisión de la operación por parte de alguna comisión del gobierno.

INTRODUCCIÓN

El presente estudio de investigación se llevó a cabo en el Laboratorio de Procesos y Operaciones Unitarias en uno de los ambientes de la Facultad de Ingeniería Química, dado que el trabajo servirá de apoyo como material didáctico tecnológico a las labores académicas de las asignaturas del departamento de Ingeniería.

La Región Loreto es rica en recursos naturales, especialmente por sus aguas de ríos, quebradas, lagunas, pozos artesianos, etc. Por falta de una adecuada tecnología de tratamiento, las aguas son consumidas sin condiciones sanitarias, trayendo consigo enfermedades de origen hídrico.

Los serios problemas involucrados en la disposición de las aguas contaminadas por medios adecuados y eficaces que eliminen toda molestia sin olvidar los desechos y el bienestar de los individuos han dado lugar a que se establezcan leyes y reglamentos que gobiernen tal disposición.

Partimos de la necesidad de que en la Facultad de Ingeniería Química no existe en la actualidad un equipo de este tipo, además de que se cubre la necesidad de contar con equipos para que así los futuros profesionales en Ingeniería adquieran el conocimiento en el manipuleo de accesorios y uso del equipo mencionado.

Cabe mencionar que una vez que el equipo haya sido construido e instalado, al entrar en funcionamiento, los estudiantes tendrán oportunidad de comprobar las leyes físicas que gobierna la mecánica de fluidos. Al mismo tiempo las muestras servirán en prácticas de laboratorio para otros cursos base como química analítica, análisis por instrumentación y análisis químico industrial (control de análisis físicos de calidad del agua).

OBJETIVOS

- GENERAL:

Diseñar, construir e instalar un prototipo de equipo clarificador horizontal para depurar agua turbia en la Facultad de Ingeniería Química (F. I. Q.) – Universidad Nacional de la Amazonia Peruana (U. N. A. P.).

- ESPECÍFICOS:

Diseñar un prototipo de equipo clarificador horizontal para depurar agua turbia.

Construir e instalar el equipo clarificador en el Laboratorio de Procesos y Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería Química.

Poner en práctica el funcionamiento del equipo instalado.

Determinar la operatividad y el rendimiento del equipo.

Comprobar las leyes físicas que implican la Mecánica de Fluidos.

Determinar los parámetros y variables de operación del equipo.

Evaluar costos del diseño.

Elaborar un instructivo de operación del equipo.

JUSTIFICACIÓN

El estudio de investigación tecnológica a llevar a cabo, se hace necesario dado que en el departamento de ingeniería química de la Facultad de Ingeniería Química – UNAP, se dictan cursos concernientes a la construcción de equipos industriales, como son: Mecánica de Fluidos, Fenómenos de Transporte, Resistencia de Materiales, entre otras más. El alumno de ingeniería química debe estar preparado y entrenado en la toma de medidas de variables y reconocimiento del Fluido en estudio.

El presente estudio se justifica porque permitirá consolidar el conocimiento práctico, cuando entre en contacto docente-alumno-equipo; es decir, los estudiantes serán capaces de medir directamente las leyes de las operaciones en sesiones experimentales para desarrollar sus habilidades y generar criterios sobre el manejo de fluidos.

La relevancia de este trabajo de tesis radica en que los datos que se obtengan en la práctica servirán para verificar las leyes de los fluidos en general.

Con este estudio tecnológico, esta facultad resuelve parcialmente la carencia de equipos de ingeniería para el tratamiento de clarificación de aguas, además existe la infraestructura adecuada para la instalación del equipo.

La importancia de este trabajo de tesis es de ir creando conciencia en los estudiantes de ingeniería, de que deben desarrollar la capacidad de diseñar equipos industriales con avances tecnológicos.

Bajo esas consideraciones nos propusimos a desarrollar este trabajo de investigación.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. El Agua.

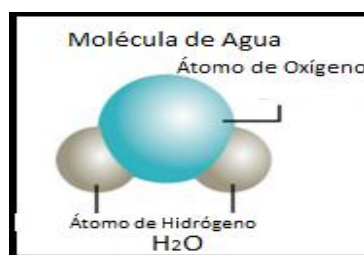
El agua interviene en todas las formas conocidas de vida, por lo que ha sido llamada el líquido de la vida, y es el único compuesto químico que se halla en la naturaleza en grandes cantidades y en los tres estados físicos. Además, es la sustancia química más abundante en la materia viva. El ser humano, por ejemplo, está compuesto en un 63% de agua, las algas en un 98%, y en la escala inferior tenemos la dentina de los dientes con un 10%.

El agua es constituyente importante de la atmósfera, particularmente en las regiones húmedas y templadas, y es el compuesto mayoritario de la hidrósfera.

1.1.1. Estructura del agua.

El agua es un compuesto que está constituido por dos átomos de hidrógeno unidos a un átomo de oxígeno. Los enlaces hidrógeno - oxígeno son covalentes, dado que comparten un par electrónico. Debido a que el oxígeno tiene un carácter no metálico de mayor electronegatividad, el par electrónico de enlace está más cerca de este elemento que del hidrógeno, determinando la polaridad del enlace. La estructura de la molécula de agua es angular, y el ángulo de enlace es de $104,5^\circ$, tal como lo muestra la siguiente figura:

Fig. 01: Estructura de la molécula de agua.



Fuente: www.educarchile.cl

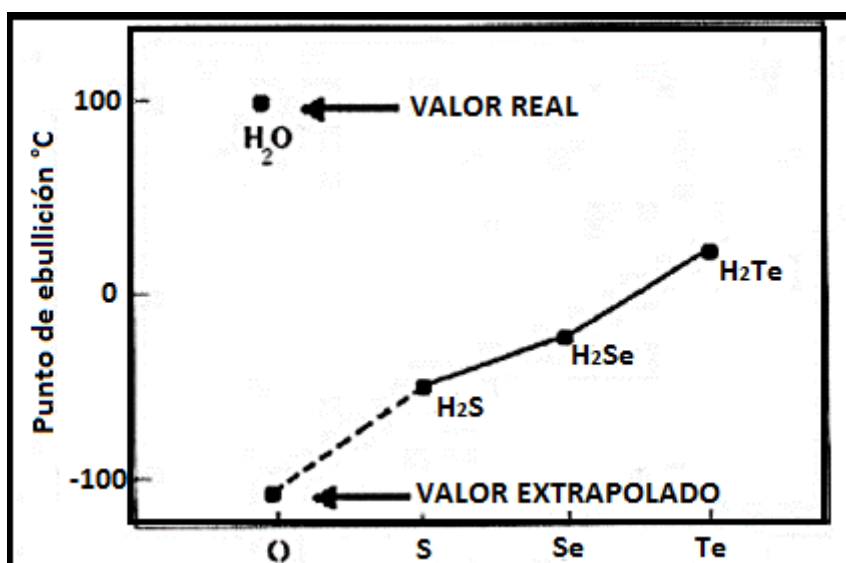
La estructura del agua es un dipolo, donde el oxígeno tiene una densidad de carga negativa, y asociado a los hidrógenos encontramos una densidad de carga positiva. La condición de polaridad de las moléculas del agua hace que estas se atraigan entre sí, generando una interacción molecular entre el polo positivo de una molécula y el polo negativo de otra, mediante una asociación llamada puente de hidrógeno o enlace puente de hidrógeno.

1.1.2. Propiedades físicas del agua

1) Punto de ebullición del agua

Las características estructurales de la molécula de agua explican las propiedades generales de esta, como su elevado punto de ebullición en comparación con sus análogos del mismo grupo del sistema periódico (H_2S - ácido sulfhídrico, H_2Se - Seleniuro de Hidrogeno, H_2Te - ácido Telurhídrico). Si se siguiera la tendencia de estos compuestos, el agua debería hervir a alrededor de $-100\text{ }^\circ\text{C}$, como se muestra en el valor extrapolado de la siguiente figura.

Fig. 02: Comparación del punto de ebullición del agua con sus análogos del mismo grupo del sistema periódico (H_2S , H_2Se , H_2Te).



Fuente: www.educarchile.cl

La razón que explica la mayor energía que es necesario aplicar para que el agua alcance su punto de ebullición (100 °C), responde a la formación de estructuras más estables producto de las atracciones ejercidas por los puentes de hidrógeno. En el caso de agua este punto de ebullición es de 100 °C a nivel del mar, es decir, a la presión normal de 760 mmHg. En la cordillera, este punto de ebullición es menor pues la temperatura cambia con la presión atmosférica.

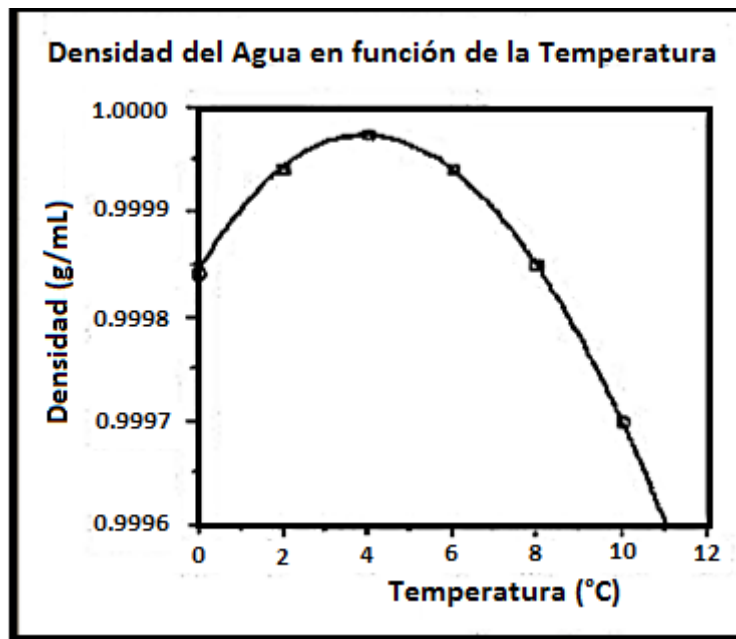
2) Comportamiento anómalo, densidad del agua.

Las atracciones establecidas por los puentes de hidrogeno entre sus moléculas, son las que determinan la dureza del hielo y su baja densidad, que a su vez se debe a la estructura abierta del sólido, donde se ordenan las unidades H₂O enlazadas entre sí por estos puentes.

El hielo presenta una menor densidad que el agua en estado líquido y, además, exhibe una baja conductividad térmica. Dichas propiedades explican que, a bajas temperaturas, el hielo queda en la superficie de los mares y lagos y no se produce el congelamiento completo de estos depósitos naturales, posibilitando así la existencia de variadas formas de vida acuática. El fenómeno anterior se relaciona con la llamada anomalía del agua, que es una excepción a la regla general de que los sólidos son más densos que los líquidos: la densidad del agua líquida sobre 0 °C es mayor que la del hielo. En estado líquido aumenta hasta alcanzar su valor máximo exactamente a 3,98 °C (1 g/mL). A temperaturas mayores que esa se comporta de manera normal, vale decir, como los otros líquidos, disminuyendo su densidad cuando la temperatura aumenta.

En el siguiente gráfico podrás apreciar la variación de la densidad del agua entre 0 °C y 10 °C.

Fig. 03: Variación de la densidad del agua entre 0 °C y 10 °C.



Fuente: www.educarchile.cl

1.1.3. Propiedades químicas del agua.

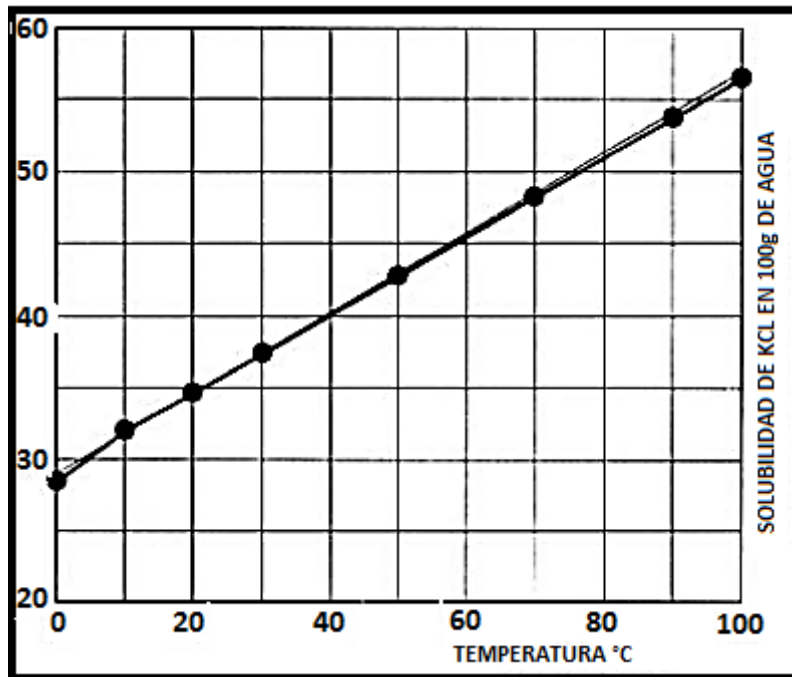
1) Solvente universal

El agua es capaz de disolver una gran variedad de sustancias, tanto inorgánicas como orgánicas, esto es debido a que el agua es una molécula polar y reaccionara con aquellos compuestos que también sean polares. En la naturaleza es de considerable importancia que el agua sea un buen disolvente, ya que muchas reacciones transcurren en medio acuoso. Cuando las reacciones transcurren en agua, decimos que son reacciones en solución acuosa.

El poder disolvente del agua frente a otras sustancias también incrementa las posibilidades de contaminación, más todavía al interior de la corteza terrestre, donde el agua se suele encontrar a altas temperaturas, en particular, en zonas con actividad volcánica. La solubilidad de las sales en

el agua aumenta con la temperatura, como se puede observar, por ejemplo, en el caso del cloruro de potasio (KCl).

Fig. 04: Comportamiento de la solubilidad del cloruro de potasio (KCl) en el agua.



Fuente: www.educarchile.cl

En este caso hay una relación prácticamente lineal entre la solubilidad de la sal en agua y la temperatura, pero no se debe pensar que eso debe ser siempre así.

El poder disolvente del agua ha provocado que esta sea caracterizada como un solvente universal, pero tal designación debe ser evitada, ya que no existe un disolvente con tales características, como tampoco habría recipiente alguno en el cual pudiera ser contenido. De hecho, el agua no disuelve grasas, aceites, celulosa, metales nobles, cuarzo y una gran cantidad de materiales de naturaleza muy diversa.

2) Soporte o medio donde ocurren las reacciones metabólicas

Puede intervenir como reactivo en reacciones del metabolismo, aportando iones hidrógeno (H^+) o bien iones hidroxilos (OH^-) al medio. Esta función

como disolvente es básico para la vida, pues casi todas las reacciones biológicas tienen lugar en el estado líquido y en un medio acuoso.

1.1.4. Tipos de aguas superficiales de la Amazonia.

Los tipos de aguas en la Amazonía están directamente relacionados con las características fisicoquímicas, encontrándose fundamentalmente cuatro categorías, NÚÑEZ (2005). Para los objetivos del presente trabajo.

- a) Aguas Mixtas o intermedias, donde se entre mezclan o confluyen aguas claras, con cualquier otra categoría, asociadas a corrientes hídricas superficiales que drenan en material geológico plioleistocénico amazónico, fisicoquímicamente proporciona una fertilidad intermedia.
- b) Aguas claras, se caracterizan por drenar sobre materiales de muy difícil alteración, por lo tanto muy difícil la contaminación por materiales orgánicos como ácidos orgánicos, en especial lo fúlvicos, aguas que se encuentran en la llamada tierras bajas amazónicas, con pH ligeramente ácido, transparencia mayor de 2 m, la vegetación predominante es la que corresponde a bosques de galería, bosque alto, localizado en los márgenes de sur y norte de la amazonia, fisicoquímicamente proporciona una fertilidad moderada a baja.
- c) Aguas negras, se diferencian por encontrarse fundamentalmente sobre materiales geológicos peniplanicies que al meteorizarse, aportan muy limitadas concentraciones de nutrientes y baja mineralización de las aguas, pH muy ácidos de 3,8 hasta 5,2, con una transparencia de aproximadamente 2 m, esta se caracteriza por la contaminación con materiales orgánicos con altas tasas de solubilidad y movilidad por el ácido fúlvico y en forma de coloide, superando las

tasas de descomposición total de dióxido de carbono, fisicoquímicamente proporciona una fertilidad muy baja.

- d) Agua blanca, se diferencia de los otros tipos de aguas por llevar unas concentraciones en suspensión de materiales arcillosos y limosos producto de los procesos erosivos en los paisajes andinos, andino amazónicos, se destaca los niveles de baja transparencia, con escala de pH básicos entre los rangos de 6,2 y 7,2, con una conductividad de 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, son aguas ricas en nutrientes, por lo tanto una capacidad fisicoquímica elevada, lo cual incide en una fertilidad alta.

Fig. 05: Amazonia cuenca hidrográfica y como Selva Húmeda Tropical.



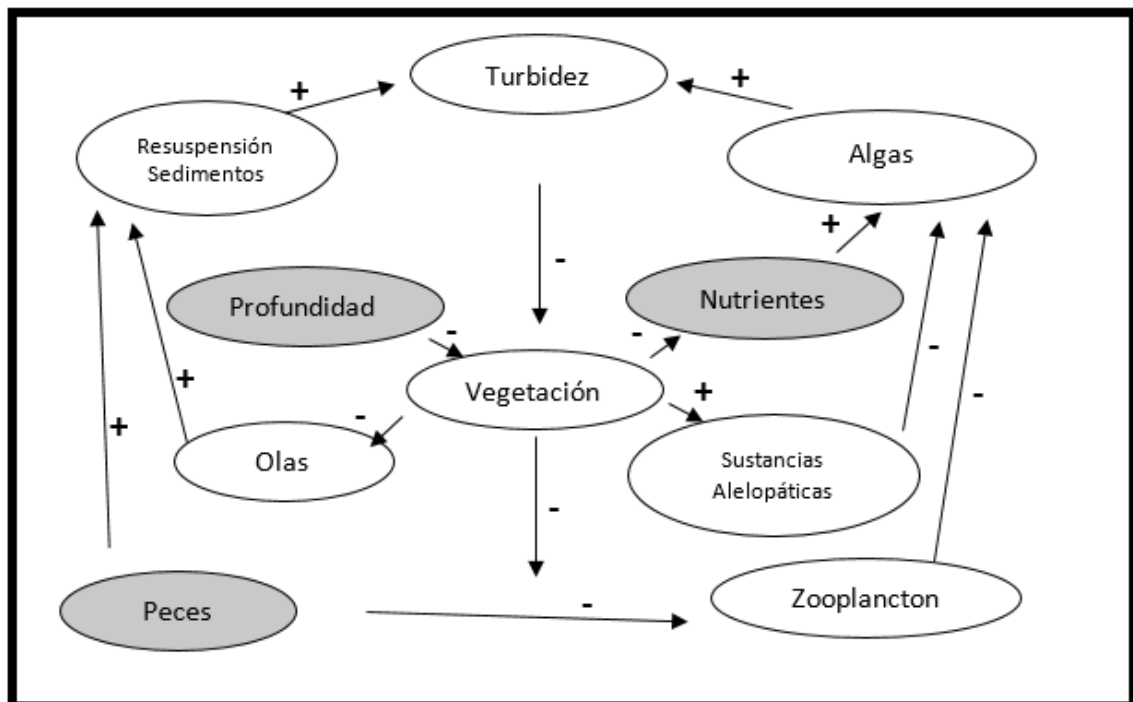
Fuente: COMUNIDAD ANDINA DE NACIONES (CAN) (2005).

1.2. Teoría sobre aguas turbias.

Scheffer (1993), ha postulado la existencia de dos estados de equilibrio alternativos y sus mecanismos de estabilización. Según estos autores, bajo ciertas concentraciones de nutrientes una laguna puede encontrarse en un estado de aguas claras o aguas turbias. El estado de aguas claras está caracterizado por bajos niveles de turbidez, alta biomasa de macrófitas arraigadas y bajas

densidades de fitoplancton. El estado de aguas turbias es un estado dominado por altas densidades de fitoplancton que le confieren a la laguna su elevada turbidez y carece de macrófitas arraigadas. El pasaje de un estado a otro puede ocurrir por diversos mecanismos que están principalmente vinculados a la interacción positiva existente entre la vegetación sumergida y la transparencia de la laguna. La densidad de fitoplancton, el nivel hidrométrico, la turbulencia, la presencia de peces y/o de zooplancton, las sustancias alelopáticas de las macrófitas, la concentración de nutrientes y la resuspensión de sedimentos son diferentes factores que conforman una red de interacciones positivas y negativas que contribuyen a estabilizar uno u otro estado.

Fig. 06: Principales interacciones positivas y negativas en lagos someros.



Fuente: Scheffer (1993).

1.3. Variables y aplicaciones más importantes del proceso primario de tratamiento de aguas residuales.

1.3.1. Variables de Proceso.

Las variables tradicionales que se miden y controlan en los procesos son cuatro: Presión, Temperatura, nivel de interface y caudal (condiciones de proceso). Estas variables están vinculadas a las condiciones operativas de los procesos. También interesa en la industria de procesos ciertas características físicas de la materia a tratar (densidad, viscosidad, etc.) y químicas (composición, conductividad, pH, etc.) que también se miden y controlan, pero en mucha menor escala.

1.3.2. Elementos de medición y transmisión.

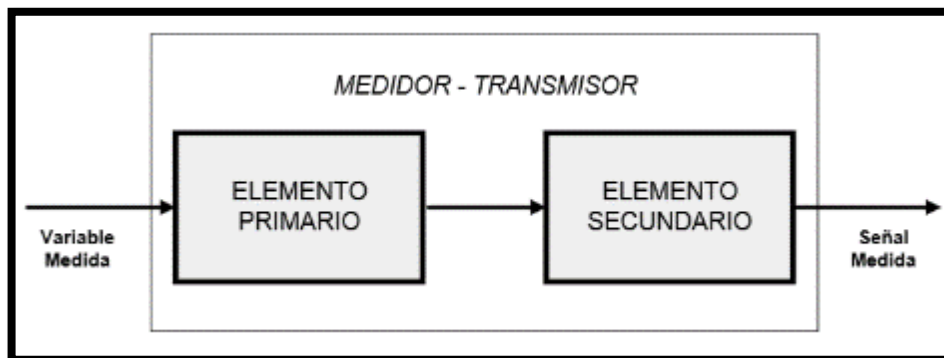
Son los dispositivos que se encargan de transformar la variable de ingeniería (temperatura, por ejemplo) en una señal mecánica, eléctrica, etc. que puede ser usada por otros instrumentos (indicadores, controladores, registradores, etc.). Estos dispositivos tienen dos partes:

- a)** Elemento primario: Los procesos de tratamiento primario también son básicamente físicos. Generalmente, la remoción de sólidos inertes y orgánicos fácilmente sedimentables se realiza a través de las cámaras de sedimentación, pero los tamices de malla fina también pueden usarse como auxiliares en las diversas etapas del tratamiento. Las cámaras de sedimentación a menudo están diseñadas para remover grasa y sólidos flotantes mediante el uso de deflectores y removedores de aceite e incluyen rastrillos mecánicos para la remoción de sólidos y lodos que se sedimentan en el fondo de la cámara.

- b) Elemento secundario: Capta la señal elaborada por el elemento primario y la transforma en una salida mecánica (indicación, por ejemplo) o genera una señal estandarizada que puede ser captada por otro instrumento en forma local o remota.

Estas dos partes pueden estar claramente separados como en el caso de un tubo Venturi (elemento primario) con transmisor de presión diferencial (elemento secundario) o bien ambos elementos están confundidos en un mismo dispositivo (medidor de presión tipo Bourdon con indicación de aguja). Analizando las relaciones causa efecto, se puede representar a un medidor-transmisor como dos sistemas en serie:

Fig. 07: Representación medidor – transmisor.



Fuente: Elaboración Propia.

1.3.3. Consideraciones, selección de la tecnología y el sistema de tratamiento.

Para definir los criterios de calidad para la selección de la fuente, se recomienda seguir la clasificación de las aguas crudas en cinco grupos, los cuales han sido preparados en base a criterios establecidos por el Servicio de Salud Pública de los Estados Unidos de Norteamérica, y conformé a las Guías Internacionales de Agua Potable de la OMS.

A) Grupo I.

Agua que necesite únicamente desinfección.

a. Calidad Bacteriológica

a.1. Densidad de coliformes totales:

La media aritmética mensual deberá ser menor que 100 por 100 mL de muestra.

a.2. Densidad de coliformes fecales:

Si se lleva a efecto la determinación de coliformes fecales, la cifra de coliformes totales puede exceder de 100 por 100 mL de muestra, pero en tal caso los coliformes fecales no deben superar de 20 por 100 mL de muestra, computados por la media aritmética mensual.

b. Calidad física

Debe cumplir con las Guías para la Calidad del Agua Potable de la Organización Mundial de la Salud (OMS), excepto con relación a turbiedad y color que serán como sigue:

Tabla 01: Concentración de turbiedad y color de acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS).

	Concentración	
	Máxima deseada	Máxima admisible
Turbiedad	1 unidad	5 unidades
Color	5 unidades	15 unidades

Fuente: Organización Mundial de la Salud (OMS).

Tabla 02. Sustancias que afectan la salud.

Constituyentes inorgánicos Admisibles	Máx. (mg/L)
Arsénico (As)	0,05
Bario (Ba)	1,0
Cadmio (Cd)	0,005
Cromo total (Cr)	0,05
Cianuro (CN)	0,01
Plomo (Pb)	0,05
Mercurio (Hg)	0,001
Nitrato (NO ⁻³)	45
Selenio (Se)	0,01
Constituyentes orgánicos	
Compuestos extractables al carbón cloroformo.	0,1
Sustancias activas al azul de metileno.	No deben producir espuma ni problemas de sabor y olor.
Fenoles	0,1

Fuente: Organización Mundial de la Salud (OMS).

Tabla 03: Compuestos que afectan la calidad estética y organoléptica.

Compuesto	Max. Recom.	Max. Admis.
Turbiedad Agua tratada filtrada	3 NTU	5 NTU
Turbiedad Agua sin filtración	-----	15 NTU
Color Verdadero	-----	15 UC.
Olor y Sabor	Inofensivo a la mayoría de los Consumidores.	
Residuos totales mg/L	500	1 000
pH	6,5 – 8,5	
Dureza (CaCO ₃) mg/L	200	-----
Sulfatos (SO ₄) mg/L	250	400
Cloruro (Cl ⁻) mg/L	250	600
Fluoruro (F ⁻) mg/L		1,5
Sodio (Na ⁺) mg/L		100
Aluminio (Al ³⁺) mg/L		0,2
Cobre (Cu) mg/L		1,0
Hierro (Fe) mg/L		0,3
Manganeso (Mn) mg/L		0,1
Calcio (Ca ²⁺) mg/L	75	-----

Fuente: Organización Mundial de la Salud (OMS).

c. Calidad química

Debe cumplir con las Guías para la Calidad del Agua Potable de la OMS. Deberá constatarse el contenido de sustancias tóxicas de origen inorgánico y orgánico muy especialmente pesticidas, herbicidas, etc.

d. Calidad radiológica

Debe cumplir con las Guías para la Calidad del Agua Potable de la OMS.

e. Tratamiento adicional

Si la calidad del agua no es "estable" durante todo el año, según lo especificado en a, b, c, d y e se haría indispensable considerarla en otro aspecto, para lo cual necesitaríamos darle un tratamiento adicional durante el período en que se deteriora la calidad produciéndose un aumento de turbiedad, olor, etc.

B) Grupo II

Aguas que necesitan de tratamiento convencional, tal como coagulación, sedimentación, filtración rápida y desinfección (postcloración) o filtración lenta y desinfección (postcloración).

a. Calidad bacteriológica

1. Densidad de coliformes totales. La media geométrica mensual debería ser menor que 3 000 por 100 mL de muestra.

2. Densidad de coliformes fecales. Si se lleva a efecto la determinación de los coliformes fecales, la cifra de los coliformes

totales puede exceder de 3 000 por 100 mL de muestra, pero en tal caso los coliformes fecales no deben exceder de 600 por 100 mL de muestra computados por la media geométrica mensual.

b. Calidad física

Elementos tales como color, turbiedad y olor contribuyen en forma significativa al tratamiento y potabilización del agua.

b.1. Color. No se puede fijar un límite para el color natural, pues éste puede ser removido mediante tratamiento convencional completo.

Se recomienda remover la mayor parte de color mediante coagulación a bajo pH. Luego de un tratamiento completo, el color real debe cumplir con las Guías Internacionales para el Agua Potable de la OMS.

No se consideran aquí los tipos de colores originados por efluentes industriales, por cuanto éstos serán considerados al determinar la calidad química del agua.

El color real del agua tratada será:

Concentración máxima deseada:	5 unidades
Concentración máxima admisible:	15 unidades

b.2. Turbiedad. Los límites de turbiedad son variables, la turbiedad debe permanecer en un rango fácilmente tratable por medios convencionales. Cuando existen turbiedades altas, las plantas deben ser diseñadas a base de tanques pre sedimentadores, embalses o doble coagulación. En caso de utilizar filtros lentos, los límites de remoción de turbiedad estarán en el orden de 20 UT o menos durante el 90% del tiempo. La turbiedad máxima deseable del agua tratada

será de 1 UT y la concentración máxima admisible será de 5 unidades.

b.3. Olor. El olor del agua cruda debe ser de tal grado y naturaleza que su remoción por métodos convencionales no sea imposible. Aquí consideramos la aireación como un método convencional.

c. Calidad Química.

Puesto que el tratamiento convencional completo tiene poco efecto en la remoción de ciertos compuestos químicos, el agua cruda debe cumplir con los límites recomendados por las Guías Internacionales para el Agua Potable de la OMS.

d. Calidad radiológica.

Debe cumplir con las Normas Internacionales para el Agua Potable de la OMS.

C) Grupo III

Aguas que necesitan tratamiento convencional como coagulación, sedimentación, filtración rápida y desinfección (pre y postcloración).

a. Calidad bacteriológica

a.1. Densidad de coliformes totales. La media geométrica mensual debería ser menor que 20 000 por 100 mL de muestra.

a.2. Densidad de coliformes fecales. El total de la determinación de coliformes totales puede exceder de 20 000 por 100 mL de muestra, pero en tal caso los coliformes fecales no deben exceder de 4 000 por 100 mL de muestra computados por la media geométrica mensual.

b. Calidad física

Debe cumplir con los mismos requisitos del Grupo II-B.

c. Calidad química

Debe cumplir con los mismos requisitos indicados en el Grupo I-C.

d. Calidad radiológica

Debe cumplir con las Normas Internacionales para el Agua Potable de la OMS.

D) Grupo IV

Aguas que no cumplen con los requisitos bacteriológicos expresados en los grupos anteriores (por ejemplo, aguas que tienen más de 20 000 coliformes totales o 4 000 coliformes fecales por 100 mL de muestra).

No se recomienda utilizar estas aguas como fuente de abastecimiento ya que su tratamiento por métodos convencionales es inadecuado. Sin embargo, de no existir una fuente de agua disponible y, dado el avance de la tecnología, podrían utilizarse después de un tratamiento adecuado. En este caso, debe efectuarse un estricto control de calidad y observarse en todo momento las Normas Internacionales para Agua Potable de la OMS, en especial en lo referente a calidad bacteriológica.

E) Grupo V

Aguas que no cumplen con uno o más de los requisitos físicos, químicos, radiológicos o de contenido de contaminantes orgánicos indicados.

No se recomienda utilizar estas aguas como fuente de abastecimiento. Sin embargo, en caso de no existir otra fuente de agua disponible, se recomienda dar el tratamiento adecuado para asegurar que su calidad cumpla en todo momento con las Guías Internacionales para el Agua Potable de la OMS.

1.4. Operaciones en el proceso de purificación del agua.

La purificación del agua es uno de los problemas de las ingenierías civil y ambiental de más urgente solución. El objetivo inmediato es proveer a toda la sociedad de agua potable, porque de esta manera cada comunidad satisface un requerimiento fundamental para su bienestar y comodidad. En Latinoamérica existen miles de municipios, muchos de ellos sin ningún sistema de purificación del agua.

1.4.1. Tipos de plantas de purificación.

La calidad del agua cruda oscila grandemente de una fuente a otra; por ello, el tipo de tratamiento requerido para producir agua potable también varía. Dependiendo de la calidad del agua cruda, el grado de complejidad del tratamiento es diferente. El diseño de una planta de tratamiento eficiente y económico requiere un estudio de ingeniería cuidadoso basado en la calidad de la fuente y en la selección apropiada de los procesos y operaciones de tratamiento más adecuados y económicos para producir agua de la calidad requerida. Como no existe una norma o fórmula que permita

Tesis: "Diseño, construcción e instalación de un prototipo de Equipo Clarificador Horizontal para aguas superficiales en la Amazonia Peruana".

determinar el tipo de planta requerido para tratar un agua, es necesario realizar los estudios de tratabilidad. Se han formulado criterios generales de tratamiento de agua cruda, según la calidad de la fuente, los cuales sirven como guía. La tabla 04 resume las recomendaciones sobre requisitos de tratamiento del USPHS en relación con la calidad bacteriológica del agua cruda.

Tabla 04: Requisitos de tratamiento.

Grupo	Tipo de tratamiento	Contenido de bacterias coliformes
I	Ninguno	Limitado a aguas subterráneas no sujetas a ningún tipo de contaminación
II	Cloración	Promedio en cualquier mes 50/100 mL
III	Completo con filtración rápida en arena y postcloración	Promedia en cualquier mes 5 000/100 mL sin exceder este valor en más del 20% de las muestras examinadas en cualquier mes.
IV	Tratamiento adicional presedimentación y precloración	Promedio en cualquier mes 5 000/100 mL pero excediendo este valor en más del 20% de las muestras analizadas en cualquier mes, y sin exceder de 20 000/100 mL en más del 5% de las muestras examinadas en cualquier mes.

Fuente: United States Public Health Service (USPHS), Servicio de Salud Pública de los Estados Unidos.

El Comité de Control de Polución del Estado de California ha promulgado estándares de calidad del agua cruda para suministros domésticos, los cuales se incluyen en la tabla 05.

Tesis: "Diseño, construcción e instalación de un prototipo de Equipo Clarificador Horizontal para aguas superficiales en la Amazonia Peruana".

Tabla 05: Estándares para fuentes de aguas crudas, suministro doméstico.

PARÁMETRO	FUENTE EXCELENTE Requiere solamente desinfección como tratamiento	FUENTE BUENA Requiere tratamiento usual tal como filtración y desinfección	FUENTE POBRE Requiere tratamiento especial o adicional y desinfección
DBO mg/L Promedio mensual	0,75 – 1,5	1,5 – 2,5	>2,5
máximo diario, o muestra	1,0 – 3,0	3,0 – 4,0	>4,0
NMP de coliformes/100 mL Promedio mensual	50 – 100	50 – 5 000	>5 000
máximo diario o muestra	<5% sobre 100	<20% sobre 5 000	<5% sobre 20 000
OD Promedio mg/L	4,0 – 7,5	4,0 – 6,5	4,0
% saturación	>75	> 60	
pH promedio	6,0 – 8,5	5,0 – 9,0	3,8 – 10,5
Cloruros mg/L máx.	<50	50 - 250	>250
Fluoruros mg/L	<1,5	1,5-3,0	>3,0
Fenoles mg/L máx.	0	0,005	>0,005
Color - unidades	0 – 20	20-150	>150
Turbiedad, unidades	0 – 10	10-250	>250

Fuente: Comité de Control de Polución del Estado de California.

En la tabla 06 se resumen los procesos de purificación de agua más usados en la actualidad.

Tabla 06: Procesos de purificación de agua.

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

Fuente: Jairo A. Romero Rojas, "Potabilización del Agua".

Tesis: "Diseño, construcción e instalación de un prototipo de Equipo Clarificador Horizontal para aguas superficiales en la Amazonia Peruana".

La efectividad relativa de los principales procesos y operaciones unitarias usados en la purificación de aguas se resume en la tabla 07.

Tabla 07: Atributos comunes del agua afectados por los procesos y operaciones unitarias convencionales de tratamiento.

El grado relativo de efectividad de cada operación o proceso unitario se indica por un signo +, los hasta un límite de cuadro; los efectos indirectos se registran mediante paréntesis colocados alrededor de los signos. Otros factores y limitaciones se indican con notas al pie de la tabla.

Atributo (a)	Aireación (b)	Coagulación y sedimentación (c)	Ablandamiento con Cal - soda y Sedimentación (d)	Filtración lenta en arena sin (c) (e)	Filtración rápida en arena precedida de (c) (f)	Cloración (g)
Bacterias	0	+	(+++) ^{1,2}	++++	++++	++++
Color	0	+++	0	+	++++	0
Turbidez	0	+++	(++) ²	++++ ³	++++	0
Olor y sabor	++ ⁴	(+)	(++) ²	+	(++)	+++ ⁵ (-) ⁶
Dureza	+	(-) ⁷	++++ ¹¹	0	(-) ⁷	0
Corrosividad	+++ ⁵ (- -) ⁹	(- -) ¹⁰	11	0	(- -) ¹⁰	0
Hierro y Mn	+++	+ ¹²	(++)	++++ ¹²	++++ ¹²	0

Fuente: Jairo A. Romero Rojas, "Potabilización del Agua".

1. Cuando se producen valores muy altos de pH por tratamiento con exceso de cal.
2. Mediante inclusión en los precipitados.
3. Por turbidez alta los filtros se taponan muy rápidamente.
4. Sin Incluir sabores por clorofenoles.
5. Cuando se emplea cloración al punto de quiebres o supercloración seguida de dechloración.
6. Cuando no se emplea (12) en presencia de olores y sabores intensos.
7. Algunos coagulantes convierten carbonatos en sulfatos.
8. Mediante remoción de dióxido de carbono.
9. Mediante adición de oxígeno.
10. Algunos coagulantes introducen dióxido de carbono.
11. Variable; algunos metales son atacados a valores de pH altos.
12. Después de la aireación.

El agua debe purificarse para que esté siempre libre de todo organismo patógeno, es decir, que sea biológicamente segura. La desinfección es efectiva para dicho propósito si el agua carece de material suspendido. La posibilidad de que los microorganismos patógenos, especialmente los virus se encuentren embebidos dentro de un recubrimiento protector del material que produce turbiedad en el agua hace necesario, para una buena desinfección, la remoción previa de la turbiedad.

El Comité sobre virus de la AWWA recomienda, para una desinfección apropiada, mantener niveles de turbiedad menores de 1 NTU. Lo anterior supondría, por lo tanto, como tratamiento mínimo para aguas de consumo, la filtración y desinfección.

1.4.2. Mezcla rápida.

La mezcla rápida es una operación empleada en el tratamiento del agua con el fin de dispersar diferentes sustancias químicas y gases.

Las plantas de purificación de agua el mezclador rápido generalmente el propósito de dispersar rápida y uniformemente el coagulante a través de toda la masa o flujo de agua.

La mezcla rápida puede efectuarse mediante turbulencia, provocada por medios hidráulicos o mecánicos, tales como: resaltos hidráulicos en canales, canaletas Parshall, vertederos rectangulares, tuberías de succión de bombas, mezcladores mecánicos en línea, rejillas difusoras, chorros químicos y tanques con equipo de mezcla rápida.

En los mezcladores hidráulicos la mezcla es ejecutada como resultado de la turbulencia que existe en el régimen de flujo; en los mecánicos la mezcla es inducida a través de impulsores rotatorios

del tipo de hélice o turbina. Los de hélice, semejantes a hélices de barco, generan corrientes axiales fuertes que crean gran intensidad de mezcla y se han usado para mezcla de alta velocidad con rotaciones de hasta 2 000 revoluciones por minuto.

1.4.2.1. Mezcladores Rápidos Hidráulicos.

Los mezcladores rápidos hidráulicos se utilizan cuando se dispone suficiente cabeza o energía en el flujo de entrada. En general se utilizan resaltos hidráulicos, canaletas Parshall, tubos vénturi, dispersores de tubos perforados y tanques con baffles, para disipar energía en turbulencia y aprovecharla para la mezcla del coagulante.

El mezclador hidráulico tiene la ventaja de no requerir equipo mecánico, consideración muy importante en el diseño de planta para lugares en el que no se dispone de personal capacitado para mantenimiento ni de suministro apropiado de repuestos.

CONSIDERACIONES DE DISEÑO.

La principal observación formulada, con respecto al diseño de mezcla rápida, radica en la importancia de dispersar uniformemente la coagulación en el agua cruda de manera que se evite el subtratamiento o el sobretatamiento.

El tiempo y grado de mezcla han sido considerados como los factores más importantes en el diseño; sin embargo, consideraciones adicionales sobre el mecanismo de la coagulación y la cinética de las reacciones de coagulación también son necesarias. Según AMIRTHARAJAH, la coagulación en el agua,

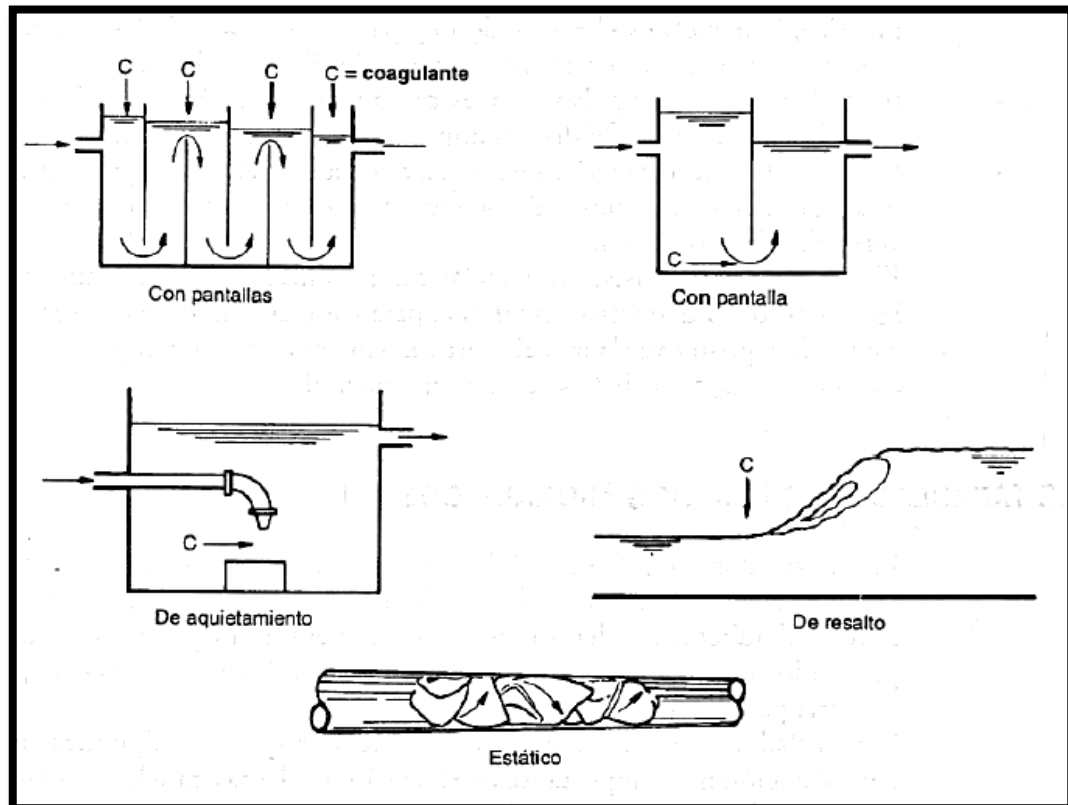
con alumbre, ocurre predominantemente dos mecanismos: adsorción de las especies hidrolizadas solubles sobre el coloide, con consecuente desestabilización de éste, y coagulación de barrido, en la cual el coloide es atrapado dentro del hidróxido de aluminio precipitante. La figura 08 presenta un esquema de dichos mecanismos. Es la adsorción – desestabilización las reacciones son muy rápidas; ocurren en microsegundos si no hay formación de polímeros, y en un segundo si se forman polímeros.

La coagulación de barrido es más lenta y ocurre en 1 a 7 segundos. Por lo tanto, para adsorción – desestabilización los coagulantes deben dispersarse en el agua cruda tan rápido como sea posible, en menos de 1 segundo. Para la coagulación de barrido no son muy importantes tiempos tan extremadamente cortos puesto que la coagulación ocurrirá predominantemente por entrampamiento de los coloides dentro del precipitado del coagulante.

Lo anterior explica por qué algunos estudios recomiendan la mezcla instantánea del coagulante, con mezcladores en línea o de flujo en pistón, mientras en otros informes se ha encontrado que el tiempo óptimo de mezcla fue de varios minutos y que su instantaneidad no era esencial para una buena floculación.

Probablemente la coagulación de un agua cruda sea el resultado de la ocurrencia simultánea de ambos mecanismos de coagulación. Como las recomendaciones de diseño no distinguen entre ellos, se observan criterios o guías muy diferentes para el dimensionamiento de cámaras y equipos de mezcla rápida.

Fig. 08: Mezcladores hidráulicos.



Fuente: Jairo A. Romero Rojas, "Potabilización del Agua".

ECUACIONES PARA DISEÑO

El modelo básico de diseño fue formulado por Camp y Stein en 1943 y, aunque se reconoce que el concepto del gradiente de velocidad no es completamente adecuado para el diseño de mezcladores rápidos, sigue siendo el criterio más usado en la práctica. El gradiente de velocidad es ampliamente aceptado, como un medio para calcular los requerimientos energéticos de mezcla.

Los gradientes de velocidad pueden calcularse con las ecuaciones siguientes:

Para mezcladores hidráulicos:

$$G = \sqrt{\frac{g \cdot H}{\nu \cdot T}} \quad (1.1)$$

donde:

G = gradiente de velocidad, s⁻¹

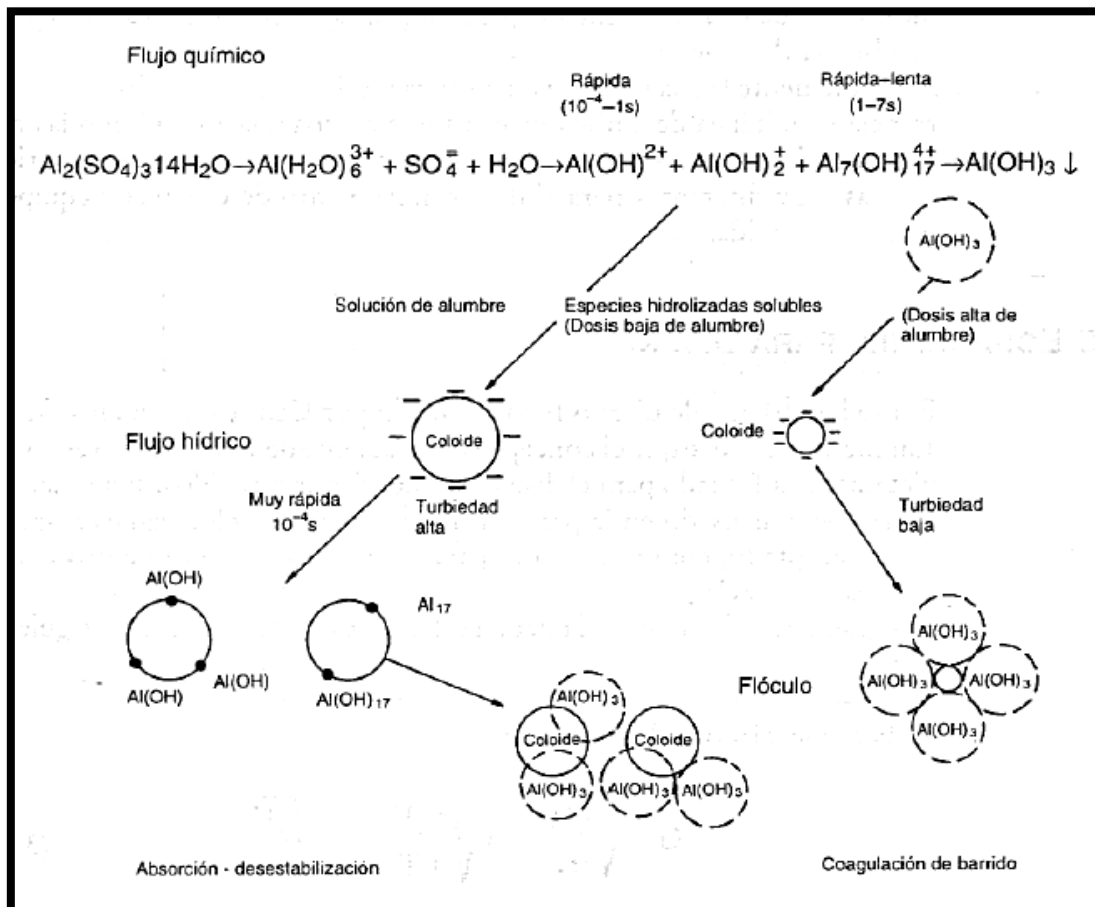
g = aceleración de la gravedad, m/s²

H = pérdida de energía debida a la fricción, m

ν = viscosidad cinemática del agua, m²/s

T = tiempo de retención, s

Fig. 09: Mecanismo de coagulación.



Fuente: Jairo A. Romero Rojas, "Potabilización del Agua".

Según LETTERMAN y otros, para optimizar la mezcla rápida se puede usar la expresión siguiente:

$$G.T_0.C^{1,46} = 5,9 \times 10^6 \quad (1.2)$$

donde:

T_0 : tiempo óptimo de mezcla rápida, s

C : dosis de alumbre, mg/L

La ecuación anterior, como lo señala Amirtharajah, no ha sido demostrada para diferentes condiciones de coagulación. Fue desarrollada para coagulación, con alumbre, de suspensiones coloidales de carbón activado y sirve como criterio adicional en el diseño de mezcladores rápidos.

CRITERIOS PARA DISEÑO

Según el Manual de diseño de plantas de tratamientos de agua de la AWWA, los criterios de diseño son los incluidos en la tabla 08.

Tabla 08: Tiempo de contacto y gradiente de velocidad para mezcla rápida.

TIEMPO DE CONTACTO s	G, s⁻¹
20	1 000
30	900
40	790
>40	700

Fuente: Asociación American de obras del agua/American Water Works Association (AWWA) - Manual de diseño de plantas de tratamientos de agua

Según ARBOLEDA para mezcladores hidráulicos son más aconsejables gradientes de velocidad entre 1 000 y 2 000 s⁻¹.

1.4.3. Floculación.

El término floculación se refiere a la aglomeración de partículas coaguladas en partículas floculantes; es el proceso por el cual, una vez desestabilizados los coloides, se provee una mezcla suave de las partículas para incrementar la tasa de encuentros o colisiones entre ellas sin romper o disturbar los agregados preformados.

De la misma manera que la coagulación, la floculación es influenciada por fuerzas químicas y físicas tales como la carga eléctrica de las partículas, la capacidad de intercambio, el tamaño y la concentración del floculo, el pH, la temperatura del agua y la concentración de los electrolitos. En partículas muy pequeñas el movimiento browniano provee cierto grado de transporte de ellas creando la floculación pericinética, pero en partículas grandes el movimiento browniano es muy lento y se requiere algún mecanismo de transporte que induzca la colisión de las partículas creando la floculación ortocinética.

Teniendo en cuenta que la influencia y magnitud del efecto de cada uno de los factores que participan en la floculación no están aún definidas exactamente, es importante conocer el comportamiento del agua mediante ensayos de jarras o experiencias previas en plantas de tratamiento.

En la floculación, una vez introducido y mezclado el coagulante, las partículas diminutas coaguladas son puestas en contacto una con otra y con las demás partículas presentes, mediante agitación lenta prolongada, floculación, durante la cual las partículas se aglomeran, incrementan su tamaño y adquieren mayor densidad. El floculador es, por lo tanto, un tanque con algún medio de mezcla

suave y lenta, con un tiempo de retención relativamente prolongado.

1.4.3.1. Tipos de floculadores.

La mezcla lenta para floculación puede efectuarse mecánicamente, usando rotores de paletas, o hidráulicamente, como resultado del movimiento del agua. Algunos ejemplos de floculadores utilizados en el tratamiento de aguas.

Los floculadores hidráulicos más comunes son los de flujo horizontal y los de flujo vertical. El floculador de flujo horizontal consiste en un tanque de concreto dividido por tabiques, bailes o pantallas de concreto u otro material adecuado, dispuestos en tal forma que el agua haga un recorrido de ida y vuelta alrededor de los extremos libres de los tabiques. En el floculador de flujo vertical el agua fluye hacia arriba y hacia abajo, por encima y por debajo de los tabiques, pantallas o bailes que dividen el tanque. En general, los floculadores hidráulicos, con una velocidad de flujo apropiada y un número adecuado de bailes para asegurar suficientes curvas, proveen una floculación efectiva.

En la práctica, los floculadores hidráulicos de flujo horizontal se usan para plantas pequeñas, caudales menores de 50 L/s.

En comparación con los floculadores mecánicos, se pueden señalar como desventajas de los floculadores hidráulicos la alta pérdida de carga (30 – 150 cm) y la poca flexibilidad de control en el grado de mezcla para caudales variables. Entre las ventajas se hace notar la inexistencia de equipo mecánico y el mantenimiento mínimo.

En los floculadores mecánicos se introduce potencia al agua para asegurar una mezcla lenta mediante agitadores mecánicos. El tipo

de agitador mecánico más usado es el de paletas, ya sean de eje horizontal o vertical las cuales imparten un movimiento rotatorio al agua, así como cierta turbulencia interna. También existen impulsores de turbina y de flujo axial. Como el grado de mezcla óptimo es variable, según la calidad del agua, se recomienda que el equipo agitador mecánico sea de velocidad variable.

OTRAS CONSIDERACIONES DE DISEÑO

La agitación del agua, mediante mezcla hidráulica o mecánica, produce gradientes de velocidad cuya intensidad controla el grado de floculación producido. El número de colisiones entre partículas está directamente relacionado con el gradiente de velocidad. Se puede determinar la potencia introducida al agua, necesaria para obtener un grado particular de floculación, según un gradiente de velocidad específico. El periodo de floculación debe ser inmediato al de mezcla rápida; en algunas aguas, períodos largos tienden a aumentar la rotura del flóculo y producir características pobres de sedimentación; por el contrario, períodos cortos pueden no ser suficientes para una formación completa del flóculo. Aunque la floculación no es siempre necesaria, por ejemplo, en plantas de floculación por contacto, en donde el coagulante se aplica directamente a la entrada del agua a los filtros de lecho dual, se reconoce su importancia en aguas turbias y coloreadas,

Los dos criterios principales que controlan el proceso de floculación son la intensidad de la mezcla y el período de agitación. Según Camp y Stein, la relación básica para caracterizar el proceso de floculación es la siguiente:

$$N = \frac{G \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot (d_1 + d_2)^3}{6} \quad (2.1)$$

donde G, gradiente de velocidad, es el término que describe la intensidad de la mezcla, y N es el número de colisiones, por unidad de tiempo, entre N₁, partículas de diámetro d₁, y N₂, partículas de diámetro d₂.

Según HUDSON (27), si se supone que N₁ son las partículas en suspensión que causan turbiedad, generalmente de diámetro d₁, muy pequeño, menor de 10 μm, el término d₁ se puede despreciar. Por otra parte, si se supone que las partículas N₂ son flóculos de tamaño d₂ mucho mayor que d₁ (100 – 2 000 μm), las cuales se adhieren al colisionar, se puede escribir:

$$N = \frac{dN_t}{dt} = \frac{G \cdot \theta \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot d_2^3}{6} \quad (2.2)$$

Donde θ es un coeficiente que tiene en cuenta el hecho de que no todas las partículas que colisionan se adhieren, o sea que es el factor de adherencia.

El volumen del flóculo, suponiéndolo de diámetro constante, será:

$$V = \frac{N_2 \cdot \pi \cdot d_2^3}{6} \quad (2.3)$$

Por lo tanto,

$$-\frac{dN_1}{dt} = \frac{G \cdot \theta \cdot V \cdot N_1}{\pi} \quad (2.4)$$

Integrando la ecuación anterior entre 0 y t se tiene:

$$\frac{N_t}{N_0} = e^{-\theta.V.G.t/\pi} \quad (2.5)$$

donde:

N_0 = Número de partículas suspendidas originalmente presentes.

N_t = Número de partículas suspendidas remanentes sin flocular para el tiempo t.

sea,

$$N_t = N_0 \cdot e^{-\theta.V.G.t/\pi} \quad (2.6)$$

La ecuación anterior indica la importancia del volumen del floculo y de G_t en la floculación; la floculación es proporcional al volumen de floculo V y al producto G_t ; sin embargo, no tiene en cuenta que a valores muy grandes de G_t el floculo se puede romper y se daña la floculación.

Diferentes estudios sobre floculación han demostrado los efectos adversos de mucha o muy poca agitación, así como las ventajas de tener varios compartimientos de floculación y floculación gradual, o sea disminución de intensidad de mezcla a lo largo de la cámara de floculación.

Un gradiente de velocidad alto puede romper el floculo e impedir que adquiera un tamaño adecuado para su sedimentación rápida; un gradiente muy bajo no produce suficiente agitación, no permite

una compactación suficiente ni una floculación completa. Sin embargo, cuando el agua es difícil de flocular y el flóculo no es fuerte, puede ser necesario un gradiente de velocidad tan bajo como 5 s^{-1} a menos que flocs muy pequeños sean aceptables. Cuando la resistencia del flóculo es alta, son deseables gradientes de velocidad tan altos como 100 s^{-1} pues así se promueve un flóculo compacto de buena sedimentabilidad y filtrabilidad.

El flóculo puede romperse en puntos de agitación fuerte, como tuberías u otros puntos de flujo restringido, o en filtros donde la agitación sea suficiente para producir paso completo del flóculo a través de ellos. Por esta razón, es conveniente poder cambiar la intensidad de la floculación para mejorar la resistencia del flóculo, así como modificar los caudales de tratamiento; aunque el método más común para incrementar la resistencia del flóculo es el de utilizar ayudas de coagulación, como la sílice activada y los polielectrólitos.

Tanto en los floculadores hidráulicos como en los mecánicos se usa frecuentemente la floculación gradual; es decir que el grado de mezcla se reduce progresivamente, de tal manera que al final del período de floculación el esfuerzo cortante sobre el flóculo preformado sea mínimo y le facilite la formación de partículas más grandes con mejor sedimentabilidad.

Algunos esquemas satisfactorios para floculación se muestran en la figura 10.

ECUACIONES PARA DISEÑO

Cuando un elemento de fluido, como el de la figura 11, está sometido a mezcla lenta, existirá un esfuerzo cortante τ entre las

láminas de fluido de área $\Delta x.\Delta z$, separadas una distancia Δy , y una diferencia de velocidad, dv .

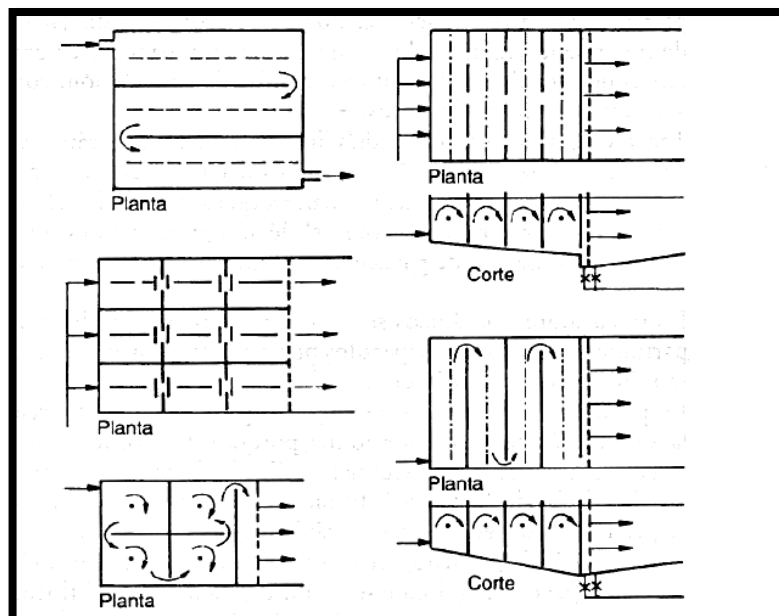
La potencia disipada en la mezcla está dada por:

$$P = F.v = \tau.\Delta x.\Delta z \left(\frac{dv}{dy} \right) \Delta y \quad (2.7)$$

La potencia consumida por unidad de volumen de fluido será;

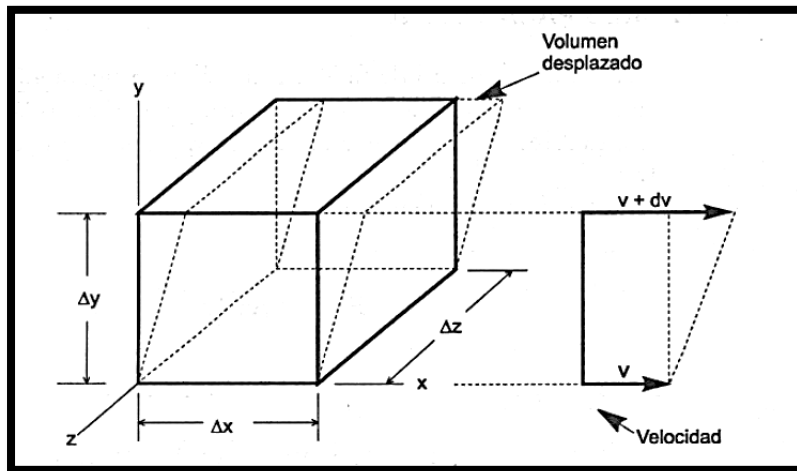
$$\frac{P}{V} = \frac{\tau.\Delta x.\Delta y.\Delta z}{\Delta x.\Delta y.\Delta z} \left(\frac{dv}{dy} \right) = \tau \left(\frac{dv}{dy} \right) \quad (2.8)$$

Fig. 10: Esquemas de floculadores.



Fuente: Jairo A. Romero Rojas, "Potabilización del Agua".

Fig. 11: Elemento de fluido sometido a mezcla lenta.



Fuente: Jairo A. Romero Rojas, "Potabilización del Agua".

Según la Ley de Newton de la viscosidad:

$$\tau = \mu \left(\frac{dv}{dy} \right) \quad (2.9)$$

Por lo tanto,

$$\frac{P}{V} = \mu \left(\frac{dv}{dy} \right)^2 \quad (2.10)$$

Por definición,

$$G = \frac{dv}{dy} \quad (2.11)$$

Por consiguiente,

$$\frac{P}{V} = \mu.G^2 \quad (2.12)$$

y,

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu.V}} \quad (2.13)$$

donde:

G = Gradiente de velocidad, s⁻¹

P = Potencia disipada en la mezcla, W

μ = Viscosidad dinámica del fluido, N.s/m², Pa.s, kg/m.s

V = Volumen, m³

Para turbulencia hidráulica en un tanque con baffles:

$$P = \gamma.Q.H \quad (2.14)$$

$$P = \frac{\gamma.V.H}{t} \quad (2.15)$$

$$\frac{P}{V} = \frac{\gamma.H}{t} = \frac{\rho.g.H}{t} \quad (2.16)$$

Reemplazando en la ecuación 2.7 se tiene

$$G = \sqrt{\frac{\gamma.H}{\mu.t}} = \sqrt{\frac{\rho.g.H}{\mu.t}} = \sqrt{\frac{g.h}{\nu.t}} \quad (2.17)$$

donde:

G = Gradiente de velocidad, s^{-1}

H = Pérdida de energía en el tanque, m

μ = Viscosidad dinámica, $N.s/m^2$, Pa.s, $kg/m.s$

γ = Peso específico del fluido, N/m^3

ν = Viscosidad cinemática, m^2/s

ρ = Densidad del fluido, kg/m^3

g = Aceleración de la gravedad, $9,8 m/s^2$

t = Tiempo de retención, s

CRITERIOS PARA DISEÑO DE FLOCULADORES HIDRÁULICOS

En los floculadores de flujo vertical, la pérdida de energía, para flujo por encima de cada tabique, se calcula por la fórmula para vertedero ahogado rectangular de pared delgada, sin contracciones. La pérdida de energía por flujo por debajo de cada tabique, igual a la de un orificio ahogado. La altura de los tabiques para paso por encima se va disminuyendo, de acuerdo con la pérdida, con el fin de mantener constante la altura del agua. Para prevenir la formación de lodo, en el fondo del tanque, se deja un orificio en los tabiques correspondientes, a ras del piso, de área igual al 5% del área horizontal de cada canal entre baffles.

Según Smethurst:

$$G = 20 - 100 s^{-1}$$

$$Gt = 20\,000 - 150\,000$$

$$T = 10 - 60 \text{ min}$$

$$H = h_f + h \quad (2.18)$$

La pérdida por fricción, h_f , se calcula por la fórmula de Hazen Williams con $C = 50$. La pérdida adicional en las curvas, h , en un floculador hidráulico de flujo vertical u horizontal, se calcula por:

$$h = \frac{n.v_1^2 + (n-1)v_2^2}{2.g} \quad (2.19)$$

donde:

h = Pérdida adicional por curvas en el canal, m

$n - 1$ = Número de baffles

V_1 = Velocidad de flujo entre los baffles, m/s

V_2 = Velocidad de flujo en la abertura de los baffles, m/s

H = Pérdida de energía en el floculador, m

La velocidad de flujo = 0,15 – 0,5 m/s

La pérdida de energía, comúnmente entre 0,15 – 0,6 m

Según ARBOLEDA, para floculadores hidráulicos:

$$G = 10 - 100 \text{ s}^{-1}$$

$$t = 15 - 20 \text{ min}$$

$$H = h_f + h \quad (2.20)$$

La pérdida por fricción, h_f , se calcula por la fórmula de Manning, con $n = 0,013$ para superficies de cemento, y $n = 0,012$ para asbesto-cemento, pérdida adicional, h , en floculadores de flujo horizontal, se calcula por:

$$h = \frac{3(N-1)v^2}{2.g} \quad (2.21)$$

donde:

h = Pérdida adicional por curvas en el canal, m

$N - 1$ = Número de tabiques

v = Velocidad promedio de flujo

H = Pérdida de energía en el floculador, m

La velocidad de flujo = 0,10 – 0,60 m/s

El espaciamiento entre los tabiques y la pared, igual a 1,5 veces la separación entre tabiques. Sin embargo, para minimizar el efecto del flujo longitudinal, sin crear bloques ni efecto de contraflujo en las curvas, algunos autores sugieren un espaciamiento igual a 0,5 veces la separación entre tabiques.

Según INSFOPAL, para floculadores de flujo horizontal:

$$t = 15 - 60 \text{ min}$$

$$\text{Altura mínima} = 0,90 \text{ m}$$

$$\text{Separación mínima entre tabiques} = 0,45 \text{ m}$$

$$\text{Velocidad de flujo} = 0,15 - 0,45 \text{ m/s}$$

Según HARDENBERGH y RODIE:

$$t = 20 - 50 \text{ min}$$

$$H = h_f + h \quad (2.22)$$

La pérdida por fricción se calcula mediante cualquier fórmula clásica de la hidráulica. La pérdida adicional, h , se calcula por:

$$h = \frac{3,2(N - 1)v^2}{2 \cdot g} \quad (2.23)$$

donde:

h = Pérdida adicional en el canal, m

$N - 1$ = Número de tabiques

v = Velocidad de flujo, m/s

H = Pérdida de energía en el floculador, m

La velocidad de flujo = 0,15 – 0,45 m/s

Altura mínima en floculadores de flujo horizontal = 0,90 m

Separación mínima entre tabiques = 0,45 m

Distancia de los baffles o tabiques a la pared del tanque = 1,5 veces la separación entre tabiques; debe ser mayor de 0,60 m.

1.4.4. Sedimentación.

Se designa por sedimentación la operación por la cual se remueven las partículas salidas de una suspensión mediante la fuerza de gravedad; en algunos casos se denomina clarificación o espesamiento. Dos son las formas de sedimentación usadas en la purificación del agua; sedimentación simple y sedimentación después de coagulación y floculación o ablandamiento.

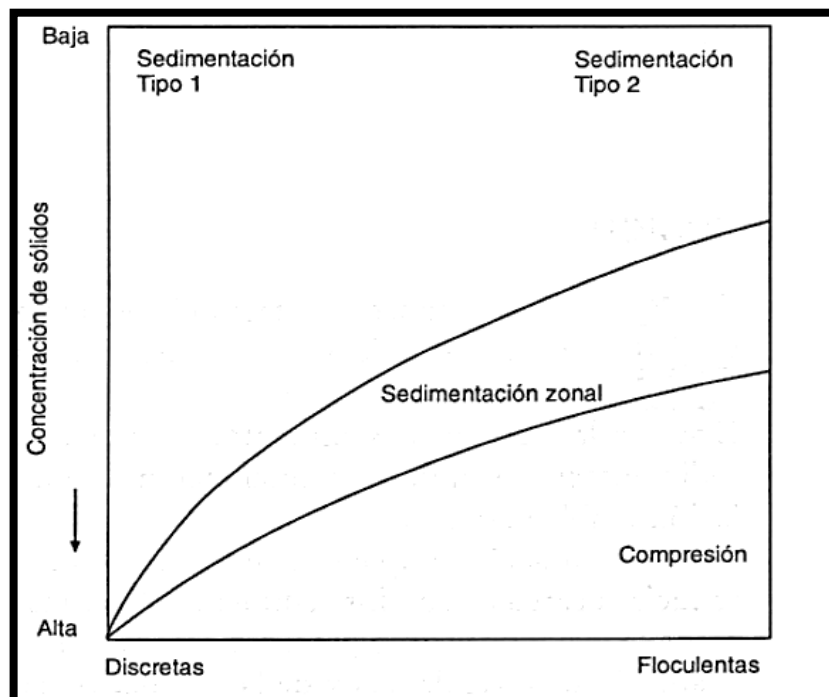
La sedimentación simple es generalmente un tratamiento primario para reducir la carga de sólidos sedimentables antes de la coagulación; en esos casos se le conoce como pre sedimentación. La sedimentación después de la adición de coagulantes y de la floculación se usa para remover los sólidos sedimentables que han sido producidos por el tratamiento químico, como en el caso de remoción de color y turbiedad o en el ablandamiento con cal. La sedimentación puede ser precedida por pre sedimentación y aireación; generalmente va seguida de la filtración. En el tratamiento de aguas residuales, la sedimentación se usa principalmente para remover sólidos suspendidos sedimentables, tratamiento primario, y para la remoción de material orgánico y biomasa preformada en los sistemas de tratamiento secundario y para espesamiento de lodos.

1.4.4.1. Tipos de Sedimentación

La sedimentación ocurre de maneras diferentes, según la naturaleza de los sólidos, su concentración y su grado de floculación.

En el agua se pueden encontrar partículas llamadas discretas, las cuales no cambian su tamaño, o forma o peso cuando se sedimentan, y partículas floculentas y precipitantes en las cuales la densidad y el volumen cambia a medida que ellas se adhieren unas con otras mediante mecanismos de floculación, precipitación, arrastre o barrido. La existencia de diferentes tipos de partículas en concentraciones distintas hace que sea necesario considerar tipos desiguales de sedimentación, de acuerdo con la clase de concentración de partículas, como lo describe Fitch en la figura 12.

Fig. 12: Diagrama Paragenético.



Fuente: Jairo A. Romero Rojas, "Potabilización del Agua".

Dichos tipos de sedimentación son:

a) Sedimentación tipo 1.

Se refiere a la remoción de partículas discretas no floculentas en una suspensión diluida. En estas condiciones se dice que la sedimentación es no interferida y es función solamente de las propiedades del fluido y de las características de la partícula. Es el tipo de sedimentación que ocurre con partículas de características floculentas mínimas en suspensiones diluidas, como sería el caso de sedimentación de materiales pesados inertes.

b) Sedimentación tipo 2.

Se refiere a la sedimentación de suspensiones diluidas de partículas floculentas, en las cuales es necesario considerar las propiedades floculentas de la suspensión junto con las características de asentamiento de las partículas. Ocurre generalmente en el tratamiento de aguas residuales, dada la naturaleza de los sólidos en ellas presentes, y en la purificación de aguas potables cuando los sedimentadores están precedidos de floculadores y coagulación.

c) Sedimentación zonal:

Describe la sedimentación másica y se refiere al proceso de sedimentación de suspensiones de concentración intermedia de material floculento, en las cuales se presenta un asentamiento interferido debido a la cercanía entre partículas. Dicha cercanía permite a las partículas, gracias a las fuerzas entre ellas, tener una posición relativa fija de unas con otras; se forma una matriz porosa

soportada por el fluido que desplazan, y como resultado la masa de partículas se desplaza hacia el fondo como un solo bloque, creando una interfase clara de separación entre el sobrenadante clarificado y el lodo, en un régimen descrito como sedimentación zonal.

d) **Compresión:**

Ocurre cuando la concentración aumenta a un valor en que las partículas están en contacto físico unas con otras y el peso de ellas es sostenido parcialmente por la masa compactada. Se presenta en operaciones de espesamiento de lodos cuando las partículas se acumulan en el fondo del tanque de sedimentación; su peso es soportado por la estructura de la masa en compactación y el asentamiento es función de la deformación de las partículas o flóculos.

En la práctica, durante una operación de sedimentación, es común que se presente más de un tipo de sedimentación al mismo tiempo y es posible que coincidan todos los cuatro tipos.

1.4.4.2. Sedimentación Tipo 1.

Como se dijo previamente, la sedimentación tipo 1 se refiere a la sedimentación de partículas discretas, de aquellas partículas que no cambian su forma, tamaño o peso a medida que se sedimentan; en otras palabras, es el tipo de sedimentación libre, no interferida, función solamente de las propiedades del fluido y de la partícula.

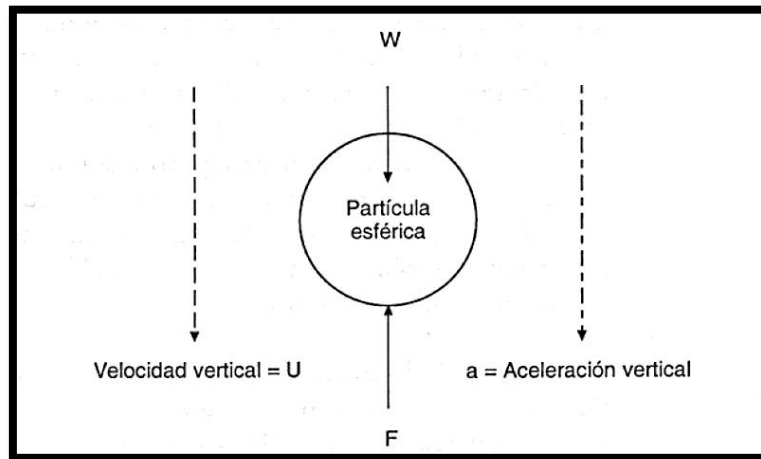
Cuando se coloca una partícula discreta en un fluido en reposo, la partícula se mueve verticalmente debido a la gravedad, si su densidad difiere de la del fluido. Las fuerzas verticales que actuarán sobre una partícula discreta en el agua serán: una fuerza vertical

hacia abajo igual al peso de la partícula en el agua, W , y una fuerza vertical hacia arriba, F o fuerza de arrastre debida a la fricción.

El peso de la partícula discreta en el agua es igual a:

$$W = V(\rho_s - \rho_w)g \quad (3.1)$$

Fig. 13: Sedimentación de la partícula discreta en reposo.



Fuente: Jairo A. Romero Rojas, "Potabilización del Agua".

donde:

W = Peso de la partícula en el agua, N

V = Volumen de la partícula, m^3

ρ_s = Densidad de la partícula, kg/m^3

ρ_w = Densidad del agua, kg/m^3

g = Aceleración de la gravedad, $9,8 m/s^2$

La fuerza vertical de arrastre o fricción es función de la rugosidad, de la forma, tamaño y velocidad vertical de la partícula, así como de la densidad y viscosidad del agua. Empíricamente se ha encontrado que para partículas discretas:

$$F = \frac{C \cdot A_n \cdot \rho_w \cdot U^2}{2} \quad (3.2)$$

donde:

F = Fuerza de arrastre vertical, N

C = Coeficiente de arrastre de Newton, adimensional

A_n = Área de la sección transversal de la partícula normal a la dirección de asentamiento, m²

U = Velocidad de asentamiento, m/s

ρ_w = densidad del agua, kg/m³

El valor del coeficiente de arrastre, C, es función del número de Reynolds:

$$N_{RE} = \frac{D \cdot U}{\nu} \quad (3.3)$$

donde:

D = Diámetro de la partícula, m

U = Velocidad de asentamiento, m/s

ν = Viscosidad cinemática, m²/s

Para partículas esféricas y $N_{RE} < 10000$, Fair y Geyer han encontrado que:

$$C = \frac{24}{N_{RE}} + \frac{3}{(N_{RE})^{1/2}} + 0,34 \quad (3.4)$$

Inicialmente la partícula se acelerará hasta que la fuerza de fricción o de arrastre del fluido se haga igual a la fuerza impulsora de asentamiento. Cuando las fuerzas verticales están en equilibrio, de acuerdo con la segunda ley de Newton, la aceleración se hace cero y la velocidad se vuelve constante. Por lo tanto, para partículas esférica

$$V(\rho_s - \rho_w)g = \frac{C.A_n.\rho_w.U^2}{2}$$

$$U^2 = \frac{2.V(\rho_s - \rho_w)g}{C.A_n.\rho_w} = \frac{2.V.g}{C.A_n} (S_s - 1) \left(\frac{\pi.D^3 / 6}{\pi.D^2 / 4} \right)$$

$$U = \sqrt{\frac{4.g(S_s - 1)D}{3.C}} \quad (3.5)$$

donde:

S_s = Densidad relativa de la partícula

En la zona de asentamiento viscoso, intervalo de Stokes, $N_{RE} < 0,5$, la relación entre el número de Reynolds y el coeficiente de arrastre se puede tomar igual a:

$$C = \frac{24}{N_{RE}} = \frac{24 \cdot v}{D \cdot U} \quad (3.6)$$

Sustituyendo en la ecuación 3.5 se tiene:

$$U = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{g \cdot D \cdot U}{24 \cdot v} (S_s - 1) D} = \sqrt{\frac{g \cdot D^2 (S_s - 1) U}{18 \cdot v}} \quad (3.7)$$

$$U = \frac{g \cdot D^2 (S_s - 1)}{18 \cdot v}$$

La ecuación anterior se conoce como Ley de Stokes y ha sido comprobada experimentalmente.

En el intervalo de Newton, $1\ 000 < N_{RE} < 100\ 000$, el valor de C es aproximadamente constante e igual a 0,4; por lo tanto,

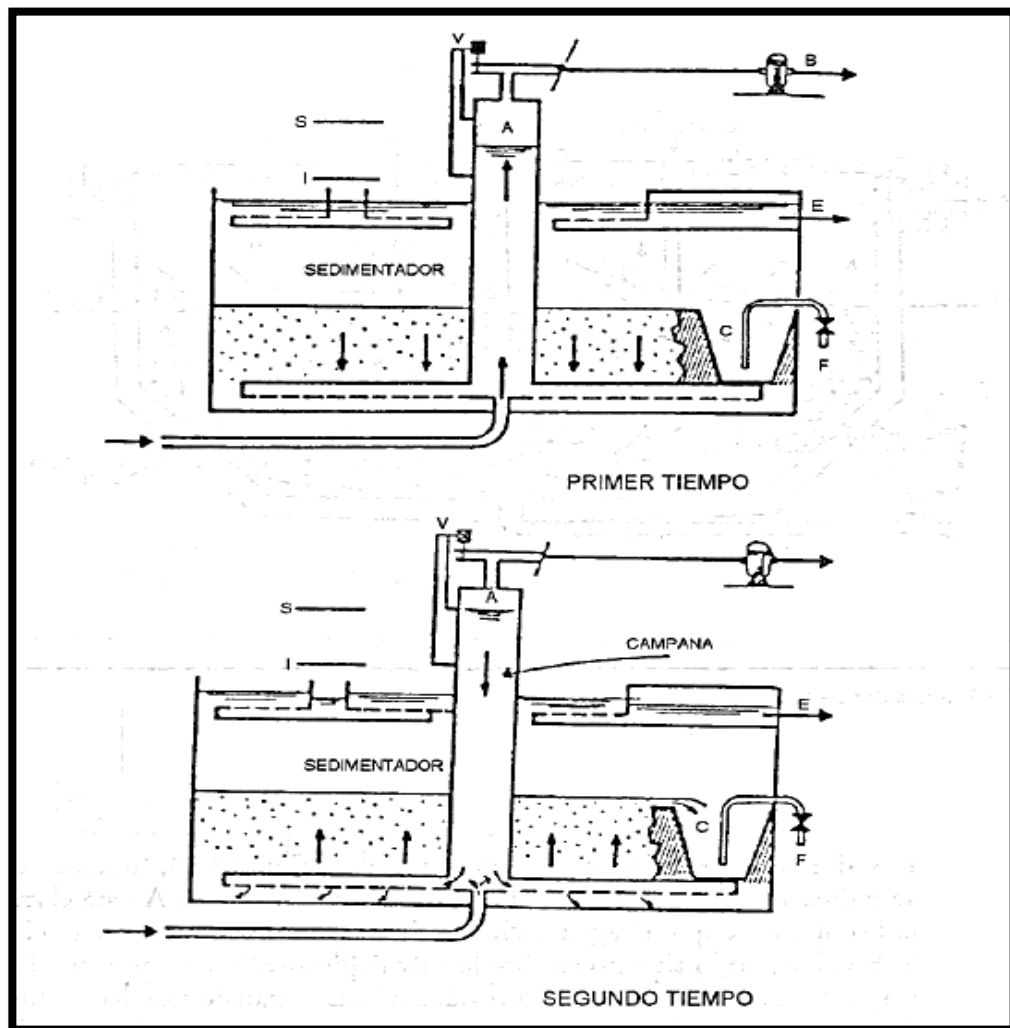
$$U = \sqrt{\frac{10 \cdot g (S_s - 1) D}{3}} \quad (3.8)$$

Vale la pena señalar que en la discusión anterior se supone que $W = F$, lo cual implica la satisfacción de las siguientes condiciones:

- Relación V/A_n constante; corresponde a partículas discretas esféricas.
- Ausencia de viento y corrientes de densidad o térmicas.
- Ausencia de cortocircuitos.
- C constante y por consiguiente viscosidad y temperatura constantes.

Obviamente, en la práctica no es posible satisfacer todas estas condiciones simultáneamente.

Fig. 14: Sedimentador de manto de lodos pulsante.



Fuente: Jairo A. Romero Rojas, "Potabilización del Agua".

CRITERIOS DE DISEÑO

Los criterios de diseño de sedimentadores para clarificación del agua se basan en valores obtenidos a través de la experiencia en la operación de prototipos de plantas y plantas piloto de tratamiento del agua.

a) Propiedades de asentamiento de sólidos suspendidos.

La ley de Stokes:

$$U = \frac{g \cdot D^2}{18 \cdot \nu} (S_s - 1) \quad (3.9)$$

Indica que existen varias propiedades del agua y de sus sólidos suspendidos que afectan la sedimentación: la temperatura del agua, la densidad de las partículas y el tamaño y la forma de las mismas. La velocidad de asentamiento de una partícula varía inversamente con la viscosidad cinemática, la cual es función de la temperatura, como puede verse en la tabla 09.

Tabla 09: Viscosidad cinemática del agua a diferentes temperaturas.

T (°C)	$\nu \cdot 10^6$, (m ² /s)
0	1,785
6	1,519
10	1,306
16	1,139
20	1,003
25	0,893
30	0,800

Fuente: Fenómenos de Transporte - R. BYRON BIRD - WARREN E. STEWART - EDWIN N. LIGHTFOOT

Por ejemplo, cambiando la temperatura del agua de 10°C a 30°C, la velocidad de asentamiento de una partícula se incrementa:

$$\frac{1,306}{0,800} = 1,63 \text{ veces}$$

A la vez, reduciendo la temperatura del agua de 10°C a 0°C se reduce la velocidad de asentamiento en:

$$\frac{1,306}{0,785} = 0,73 \text{ veces}$$

Por lo tanto, la temperatura tiene un efecto importante en la sedimentación, y con aguas frías debería reducirse la carga superficial de diseño. La velocidad de asentamiento de una partícula variará también directamente con el valor de la diferencia $S_s - 1$. Por ello, a mayor densidad de la partícula mayor será su velocidad de asentamiento, o sea mayor la carga superficial de diseño.

El efecto de la variación en la densidad relativa de la partícula, S_s , para partículas discretas, puede determinarse con la ley de Stokes, pero para partículas floculentas, en las cuales cambia su tamaño y densidad, la ecuación mencionada no es aplicable y es necesario recurrir a los análisis de columna de sedimentación como se vio previamente. En las partículas discretas el efecto del tamaño de la partícula se visualiza con los valores de la tabla 10.

Tabla 10: Velocidades de asentamiento para algunas partículas.

Diámetro Partícula (mm/s)	Clasificación	U (mm/s)	CS (m³/d.m²)
10,0	grava	1 000	86 400
1,0		100	8 640
0,6		63	5 443
0,4	arena gruesa	42	3 629
0,2		21	1 814
0,1		8	691
0,06		3,8	328
0,04	arena fina	2,1	181
0,02		0,62	54
0,01		0,154	13
0,004	limo	0,0247	2

Fuente: Jairo A. Romero Rojas, "Potabilización del Agua".

b) Carga superficial o tasa de sedimentación superficial.

Una de las principales características del tanque de sedimentación es su área superficial, la cual depende de la carga o tasa de sedimentación superficial. La carga superficial es el parámetro más usado en la práctica para diseño y clasificación de sedimentadores.

En el tanque ideal de sedimentación convencional, la carga superficial podría hacerse igual a la velocidad de asentamiento de las partículas que se desea remover. Sin embargo, como no existen en la práctica tanques ideales, se acostumbra reducir la carga superficial y aumentar los tiempos teóricos de retención.

Los valores de la tabla 11 resumen algunos criterios de carga superficial usados para el diseño de sedimentadores convencionales.

Tabla 11: Cargas superficiales típicas en sedimentadores convencionales.

Tipo de agua	Tratamiento	Carga superficial (m ³ /d.m ²)
Superficial	Flóculo de alumbre	14-22
	Flóculo de polímero	18-27
Superficial o Subterránea	Ablandamiento con cal	22-44
		82 37
	Unidades de flujo Ascensional	<58 108 58-88 22-58 Agua fría 58-88 Agua cálida
		147 22-88 88-132 73 106
Ablandamiento en Unidades de flujo Ascensional		

Fuente: Jairo A. Romero Rojas, "Potabilización del Agua".

Según FAIR, GEYER y OKUN, la velocidad de asentamiento del floculo de hierro y aluminio a 10°C es de 5 cm/min, es decir una carga superficial de 72 m³/m²d. Según la EPA, las cargas superficiales típicas para diseño de sedimentadores de aguas residuales con precipitación química son:

Alumbre: 20 - 24,5 m³/d.m²

Hierro : 28,5 - 32,5 m³/d.m²

Cal : 57- 65 m³/d.m²

Según INSFOPAL la carga superficial depende de la clase de tratamiento y oscila entre 15 y 90 m/d. Según AZEVEDO NETTO, la carga superficial para sedimentadores convencionales oscila entre 20 y 60 m/d.

Para sedimentadores de tasa alta tampoco existe un criterio unificado de valores de carga superficial; algunos de los intervalos o valores recomendados en la literatura se incluyen en la tabla 12.

Tabla 12: Cargas superficiales típicas en sedimentadores de tasa alta.

Cs, (m/d)	Observaciones
120 - 300	----
120 - 240	Flujo ascensional
150 - 240	Flujo horizontal, T < 4°C, turbiedad < 100
150 - 180	Flujo horizontal. T < 4°C, turbiedad 100 – 1 000
150 - 240	Flujo horizontal. T > 10°C, turbiedad <
150 - 180	Flujo horizontal. T > 10°C, turbiedad 100 – 1 000
60 - 240	Valor promedio 180 m/d
150	Flóculo de alumbre, agua fría
216	Sedimentadores tubulares
180 - 300	Sedimentadores Tubulares

Fuente: Jairo A. Romero Rojas, "Potabilización del Agua".

c) Profundidad.

La eficiencia del tanque de sedimentación es afectada por el grado de floculación de los sólidos suspendidos, el cual, a la vez, depende del tiempo de retención. El volumen del tanque de sedimentación es igual al producto de su área superficial A por la profundidad:

$$V = A.d$$

El tiempo de retención es igual al volumen del tanque dividido por el caudal:

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{A.d}{Q} \quad (3.10)$$

Por consiguiente, el tiempo de retención teórico es directamente proporcional a la profundidad; por ello, la eficiencia de remoción de partículas floculentas dependerá de la profundidad del tanque. Sin embargo, la eficiencia de remoción no está relacionada linealmente con el tiempo de retención; así, por ejemplo, si el 80% de los sólidos suspendidos son removidos con un tiempo de retención de dos horas, es posible que con 3 horas de retención sólo se remuevan 90%. Además, como los tanques profundos son más costosos, no es deseable tenerlos excesivamente profundos. En general, la profundidad de los tanques de sedimentación es mayor de 3 metros.

d) Tiempo de retención.

El tiempo de retención depende del propósito del sedimentador. Para tanques o dársenas de sedimentación simple, el tiempo de retención debe ser lo suficientemente largo como para permitir el asentamiento de partículas con velocidad de asentamiento muy baja; en este caso el tiempo de retención puede ser de varios días.

En tanques convencionales usados para sedimentación de los sólidos provenientes de coagulación o ablandamiento de aguas, un tiempo de retención de 2 a 4 horas es generalmente suficiente como preparación del agua para su filtración subsecuente. Cuando el agua va a ser usada sin filtración se proveen tiempos de

retención hasta de 12 horas. En sedimentadores tubulares de alta tasa el tiempo de retención es de 3 a 6 minutos; en los de placas inclinadas, de 15 a 25 minutos.

e) Velocidad horizontal.

La velocidad de flujo a través del tanque de sedimentación no será uniforme en toda la sección transversal del tanque perpendicular a la dirección de flujo, aunque la entrada y salida sean diseñadas para distribución uniforme, debido a la existencia de corrientes de densidad, corrientes de inercia, cortocircuito y operación de mecanismos de remoción de lodos.

La corriente de densidad es el flujo de un fluido dentro de otro, relativamente quieto, con una densidad diferente. Una corriente de densidad mayor que la del cuerpo principal del fluido se hundirá y circulará a lo largo del fondo del tanque a una velocidad mayor. Si la corriente de densidad es más liviana, correrá a lo largo del techo del tanque. Las diferencias de densidad se deben a diferencias de temperatura, contenido de sales o contenido de material suspendido.

El cortocircuito se presenta cuando una porción del fluido atraviesa el tanque en un tiempo menor que el tiempo de retención, debido a diferencias en las velocidades y longitudes de las trayectorias de corriente. El cortocircuito se incrementa mediante mezcla del contenido del contenido del tanque, altas velocidades de entrada, y por corrientes de densidad; por ello se presenta en todos los tanques reales.

Para minimizar las interferencias mencionadas, la velocidad a través de un tanque de sedimentación debe mantenerse entre 0,25 y 1,5 cm/s. Para tanques de alta tasa se recomiendan valores de velocidad promedio de flujo menores de 1 cm/s.

Según SMETHURST, la velocidad media en el tanque de sedimentación debe ser menor de 2 cm/s.

f) Unidades de entrada y salida del sedimentador.

La entrada al sedimentador se diseña para distribuir el agua uniformemente sobre la sección transversal del tanque entre el floculador y el sedimentador. Es más importante que la unidad de salida para controlar corrientes de densidad e inercia, y afecta por ello en mayor grado la eficiencia del sedimentador. La mejor unidad de entrada es una que permita el paso del agua al sedimentador sin tuberías o canales. La velocidad en los canales debe ser lo suficientemente baja para evitar que el flóculo se rompa, generalmente entre 15 y 60 cm/s. El principal propósito de la unidad de entrada es el de proveer una transición suave entre la velocidad relativamente alta de la tubería afluente y la velocidad baja uniforme deseable en la zona de asentamiento para minimizar su interferencia con este proceso. El canal de entrada debe extenderse a todo lo ancho del tanque para asegurar la distribución uniforme sobre toda la sección transversal.

El propósito de la unidad de salida es similar al de la unidad de entrada, o sea proveer una transición suave entre la velocidad de flujo en el sedimentador y la velocidad en la tubería efluente; generalmente el nivel del agua en el sedimentador se controla a la salida. Las salidas pueden ser vertederos o aberturas sumergidas con control manual ejercido por las válvulas de control de nivel de entrada a los filtros.

A menudo los vertederos de salida son del tipo de abertura en V, algunas veces con facilidades para ajustar verticalmente su altura y controlar el caudal de salida. Cargas típicas para vertederos de salidas se muestran en la tabla 13.

Tabla 13: Cargas típicas de rebose sobre vertederos.

Tipo de servicio	CARGA, (L/s.m)
Clarificación	< 7,25
Flóculo de alumbre liviano	1,7 – 2,1
Flóculo de alumbre pesado	2,1 – 3,1
Flóculo de ablandamiento	3,1 – 3,7
Flóculo de coagulación	< 3,7
Flóculo de coagulación	2 – 7

Fuente: Jairo A. Romero Rojas, "Potabilización del Agua".

- g) De conformidad con estudios realizados por Kawamura se deben tener en cuenta, además, los siguientes aspectos:
- La mejor Localización de la pantalla difusora de entrada al sedimentador es de 2 – 2,5 m aguas, abajo del muro de entrada.
 - El tipo de difusor más efectivo tiene distribuidos uniformemente orificios de 125 mm con una relación de abertura del 6 – 8 % para tanques con relación longitud/ancho y ancho/profundidad aproximadamente igual a 4/1.
 - La velocidad máxima del flujo a través de los orificios debe ser 150 mm/s para prevenir rotura del floculo.
 - La pérdida de carga óptima en los orificios de entrada es igual a 2 – 3 mm.
 - En tanques sujetos a vientos severos, corrientes de densidad o variaciones de caudal, son recomendables dos paredes difusoras intermedias.
 - En tanques sujetos a vientos benignos, corrientes de densidad o variaciones de caudal, una pared difusora intermedia es recomendable.

h) Almacenamiento de lodos.

Al diseñar el sedimentador hay que tener en cuenta el volumen destinado al almacenamiento de lodos. Los lodos generalmente se mueven hidráulicamente hacia una tolva de lodos de donde son extraídos mediante una tubería de desagüe. El tanque tendrá, por consiguiente, en su fondo una pendiente suave hacia la tolva de lodos. Para el arrastre de los lodos se pueden también usar mecanismos de arrastre de lodos, de movimiento lento para no alterar el proceso de sedimentación o la resuspensión de los lodos; por esta razón, la velocidad del mecanismo de arrastre de los lodos debe ser menor de 0,5 cm/s.

Según SÁNCHEZ MONTENEGRO, la pendiente longitudinal varía entre 2 y 3%, la pendiente transversal del 10 al 12% y el diámetro mínimo del desagüe 30 cm. Otros autores recomiendan pendiente mayores de 0,4% y diámetro mínimo del desagüe de 15 cm. En general la pendiente más usada para el fondo de tanques rectangulares es del 1% y de 1,2/1 a 2/1 para las tolvas de lodos.

i) Criterios adicionales para diseño de sedimentadores.

- Los sedimentadores deben tener capacidad suficiente para permitir la sedimentación adecuada de los caudales extremos en la planta.
- El número de tanques se determina mediante el caudal total, el grado de flexibilidad de operación y la economía del diseño. Debe proveerse un mínimo de dos tanques, para poder sacar una unidad de servicio para mantenimiento y limpieza. Según SÁNCHEZ MONTENEGRO, si hay varias unidades rectangulares adosadas, el costo mínimo se produciría cuando se cumple la ecuación:

$$\frac{a}{L} = \frac{n+1}{2.n} \quad (3.11)$$

donde:

a = Ancho de cada sedimentador

L = Longitud de cada sedimentador

n = Número de sedimentadores

Los sedimentadores estarían adosados según la dimensión L, o sea que el ancho total es n.a

En plantas grandes, sin embargo, el número de tanques será determinado por el tamaño máximo práctico posible de un solo tanque y por la efectividad de la sedimentación.

- La carga superficial y el tiempo de retención se seleccionan de conformidad con las propiedades de asentamiento de los sólidos suspendidos, como se vio previamente.
- Si se usa equipo mecánico de recolección de lodos se ajusta la pendiente (generalmente es 0,17%) y la relación longitud/ancho de tal forma que permita acomodar satisfactoriamente el equipo.
- En tanques rectangulares se usa comúnmente una relación longitud/ancho entre 3/1 y 5/1. En general se prefieren tanques de menos de 75 m de longitud.
- Los lodos pueden recogerse en una, dos o tres tolvas de lodos; en cada caso, cada tolva debe equiparse con tubería separada de drenaje. Se debe poder desocupar el tanque en un tiempo de 30 – 60 minutos. Para calcular la tubería de desagüe se puede usar la fórmula siguiente:

$$S = \frac{A}{4850.t} \cdot \sqrt{d} \quad (3.12)$$

donde:

S = Sección del desagüe, m²

A = Área superficial del sedimentador, m²

t = Tiempo de vaciado en horas

d = Altura del agua sobre la boca del desagüe, m

La descarga de desagüe para la altura máxima d está dada por:

$$Q = 0,61.S\sqrt{g.d} \quad (3.13)$$

donde:

Q = Descarga en m³/s

g = Aceleración de la gravedad, m/s²

Para prevenir asentamientos de lodo en la tubería de desagüe, la velocidad de flujo debe ser mayor de 1,4 m/s.

- La longitud del vertedero de salida se determina para la carga sobre el vertedero escogido. Cuando un solo vertedero, a lo ancho del extremo del tanque, no satisface la longitud requerida, se provee la longitud necesaria usando varios vertederos colocados en el tercio extremo de salida del tanque o agregando vertederos en V a las canaletas de recolección de agua clarificada. El nivel del agua en el tanque de sedimentación se controla por las canaletas y, en la

actualidad, no se recomiendan pantallas permeables sobre la estructura de salida del sedimentador.

- En un tanque de sedimentación real, en la mayoría de los casos, el flujo es turbulento y debe evitarse que ocurra arrastre del material sedimentado. La velocidad requerida para iniciar el arrastre de las partículas puede calcularse por la expresión desarrollada por Camp, a partir de estudios hechos por Shíelds:

$$Q = 0,61S\sqrt{g.d} \quad (3.14)$$

donde:

Va = Velocidad de arrastre o velocidad horizontal de flujo, m/s²

$\beta = 0,04 - 0.1$

0,04 – 0,06, constante que depende del tipo de material sedimentado

F = Factor de fricción de Darcy - Weisbach, 0.03 para arena, 0,02 – 0,03.

g = Aceleración de la gravedad, m/s²

D = Diámetro promedio de las partículas, m.

S_s = Densidad relativa de las partículas

La ecuación anterior indica que la velocidad requerida para iniciar el arrastre es independiente del tamaño y profundidad del tanque y sólo es función del factor de fricción, el tamaño promedio de las partículas y su densidad relativa.

Según el Insfopal, la velocidad de flujo en un sedimentador debe ser menor de 1,25 cm/s, la relación longitud/ancho, de 3 a 5, la relación longitud/profundidad, de 7 a 30 y la carga de rebose sobre el vertedero, menor o igual a 7 L/s.m.

1.4.5. Filtración.

El primer filtro de arena se inventó en Escocia en 1804. En 1829 la Compañía del río Támesis, en Londres, emprendió la construcción de filtros lentos de arena y, en 1829, se demostró su eficiencia para control biológico con ocasión de la epidemia la cólera ocurrida en Hamburgo.

La producción de agua clara y cristalina es prerrequisito para el suministro de agua segura y requiere de la filtración. Aunque cerca del 90% de la turbiedad y el color son removidos por la coagulación y la sedimentación, una cierta cantidad de flóculo pasa al tanque de sedimentación y requiere su remoción. Por ello, para lograr la clarificación final se usa la filtración a través de medios porosos generalmente dichos medios son arena o arena y antracita.

En la planta de purificación la filtración remueve el material suspendido, medido en la práctica como turbiedad, compuesto de flóculo, suelo, metales oxidados y microorganismos. La remoción de microorganismos es de gran importancia puesto que muchos de ellos son extremadamente resistentes a la desinfección y, sin embargo, son removibles mediante filtración. Lo anterior indica por qué en la práctica se considera que el propósito principal de la filtración es remover turbiedad e impedir la interferencia de la turbiedad con la desinfección, al proveer protección a los microorganismos de la acción del desinfectante.

1.4.5.1. Mecanismo de remoción

Generalmente se piensa de los filtros como de un tamiz o microcriba que atrapa el material suspendido entre los granos del medio filtrante. Sin embargo, la acción de colar, cribar o tamizar el

agua es la menos importante en el proceso de filtración, puesto que la mayoría de las partículas suspendidas pueden pasar fácilmente a través de los espacios existentes entre los granos del medio filtrante.

El mecanismo por el cual un filtro retiene y remueve el material suspendido ha sido explicado de distintas maneras por diferentes autores. Posiblemente el fenómeno es el resultado de la acción conjunta de diferentes acciones físicas, químicas y biológicas ocurrientes en el filtro con mayor o menor intensidad según el tipo de filtro y la calidad del agua filtrada. TCHOBANOGLIOUS resume los mecanismos de remoción de partículas y las variables principales en el diseño de filtros como se indica en las tablas 14 y 15.

Como puede observarse, la filtración depende de una combinación compleja de mecanismos físicos y químicos; en aguas de consumo la adsorción juega el papel más importante ya que a medida que el agua pasa a través del lecho del filtro las partículas suspendidas hacen contacto y son adsorbidas sobre la superficie de los granos del medio o sobre material previamente depositado. Las fuerzas que atraen y retienen las partículas sobre los granos son las mismas que en la coagulación y floculación y, por lo tanto, es muy importante obtener una buena coagulación antes de la filtración.

Tabla 14: Variables principales en el diseño de filtro.

VARIABLE	SIGNIFICADO
<ol style="list-style-type: none"> 1. Características del medio filtrante <ol style="list-style-type: none"> a. Tamaño del grano b. Distribución granulométrica c. Forma, densidad y composición del grano d. Carga del medio 2. Porosidad del lecho filtrante 3. Profundidad del lecho filtrante 4. Tasa de filtración 5. Pérdida de carga disponible 6. Características del afluente <ol style="list-style-type: none"> a. Concentración de sólidos Suspendidos b. Tamaño y distribución del flóculo c. Resistencia del flóculo d. Carga eléctrica del floculo e. Propiedades del Fluido 	<ul style="list-style-type: none"> - Afecta la eficiencia de remoción de partículas y el incremento en pérdida de carga. - Determina la cantidad de sólidos que pueden almacenarse en el filtro. - Afecta la pérdida de carga y la duración de la carrera. - Determina el área requerida y la pérdida de carga. Afecta la calidad del efluente. - Variable de diseño. - Afectan las características de remoción del filtro.

Fuente: Jairo A. Romero Rojas, *Potabilización del Agua*".

Tabla 15: Mecanismos de remoción en un filtro.

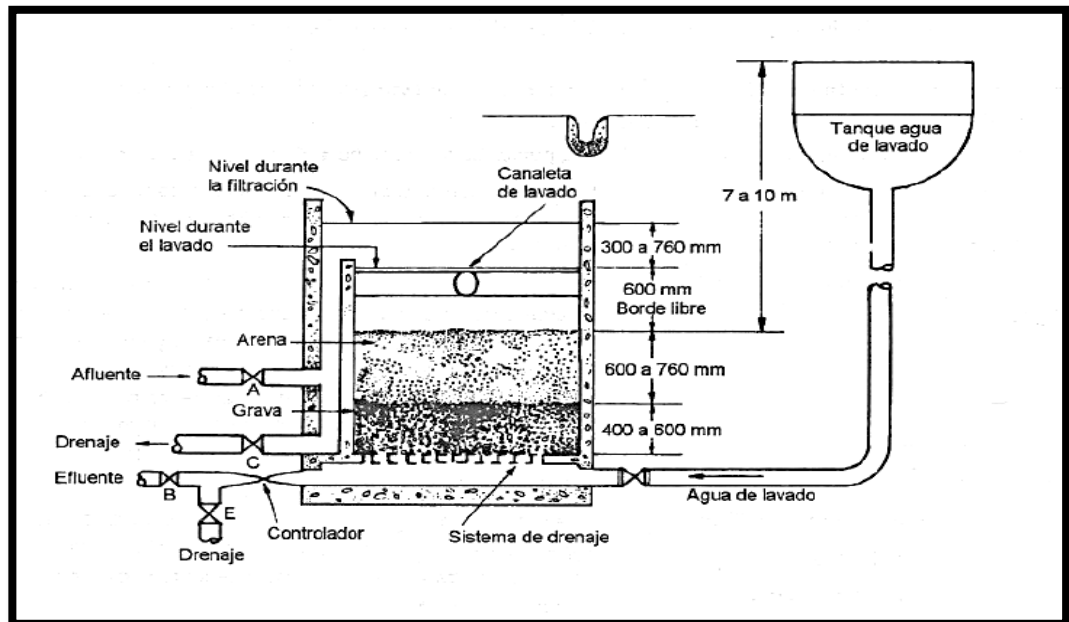
MECANISMO	DESCRIPCIÓN
1. Cribado a. Mecánico b. Oportunidad de contacto	Partículas más grandes que los poros del medio son retenidos mecánicamente. Partículas más pequeñas que los poros del medio son retenidos por oportunidad de contacto.
2. Sedimentación	Las partículas se sedimentan sobre el medio filtrante, dentro del filtro.
3. Impacto inercia	Las partículas pesadas no siguen las líneas de comente.
4. Intercepción	Muchas partículas que se mueven a lo largo de una línea de corriente son removidas cuando entran en contacto con la superficie del medio filtrante.
5. Adhesión	Las partículas floculentas se adhieren a la superficie del medio filtrante. Debido a la fuerza de arrastre del agua, algunas son arrastradas antes de adherirse fuertemente y empujadas más profundamente dentro del filtro. A medida que el lecho se tapona, la fuerza cortante superficial aumenta hasta un límite para el cual no hay remoción adicional. Algún material se fugará a través del fondo del filtro haciendo aparecer turbiedad en el efluente.
6. Adsorción química a. Enlace b. Interacción química	Una vez que una partícula ha entrado en contacto con la superficie del medio filtrante o con otras partículas, la adsorción, física y, o, química, permite su retención sobre dichas superficies.
7. Adsorción física a. Fuerzas electrostáticas b. Fuerzas electrocinéticas c. Fuerzas de Vander Waals	
8. Floculación	Partículas más grandes capturan partículas más pequeñas y forman partículas aún más grandes.
9. Crecimiento biológico	Reducen el volumen del poro y puede promover la remoción de partículas.

Fuente: Jairo A. Romero Rojas, "Potabilización del Agua".

1.4.5.2. Descripción de la filtración

El filtro rápido por gravedad es el tipo de filtro más usado en tratamiento de aguas. La operación de filtración supone dos etapas: filtración y lavado; las dos etapas se identifican en la figura 15.

Fig. 15: Operación de un filtro rápido convencional de arena.



Fuente: Jairo A. Romero Rojas, "Potabilización del Agua".

Tabla 16: Esquema indicativo de la operación de un filtro rápido convencional de arena.

VÁLVULA	POSICIÓN DE LA VÁLVULA		
	Filtrando	Lavando	Filtrando a desecho
A. Afluente	Abierta	Cerrada	Abierta
B. Efluente	Abierta	Cerrada	Cerrada
C. Drenaje efluente de lavado	Cerrada	Abierta	Cerrada
D. Agua de lavado	Cerrada	Abierta	Cerrada
E. Drenaje agua filtrada	Cerrado	Cerrada	Abierta

Fuente: Jairo A. Romero Rojas, "Potabilización del Agua".

En un filtro rápido convencional, el final de la etapa de filtración o carrera del filtro se alcanza cuando los sólidos suspendidos (turbiedad) en el efluente comienzan a aumentar; cuando la pérdida de carga es tan alta que el filtro ya no produce agua a la tasa deseada, usualmente 2,4 m de pérdida, o cuando la carrera del filtro es de 36 horas o más. Generalmente, cuando una de las condiciones anteriores se presenta, se procede a lavar el filtro para remover el material suspendido acumulado dentro del lecho filtrante y para recuperar su capacidad de filtración. Usualmente el lavado se hace invirtiendo el flujo a través del filtro (figura 15), aplicando un flujo suficiente agua para fluidizar el medio filtrante y producir el frote entre los granos del mismo, y desechando el material removido a través de las canaletas de lavado.

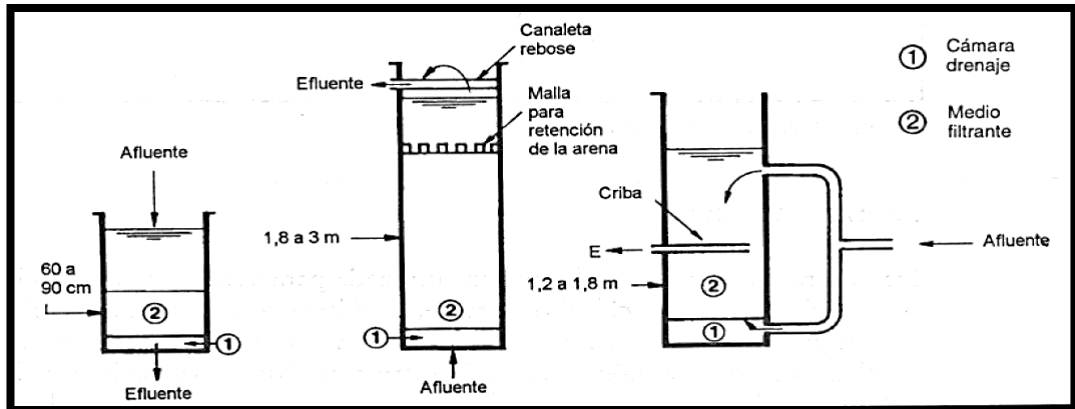
1.4.5.3. SISTEMAS DE FILTRACIÓN

Muchos son los sistemas de filtración propuestos y construidos; sin embargo, se puede hacer una clasificación de acuerdo con la dirección de flujo, el tipo de lecho filtrante, la fuerza impulsora, la tasa de filtración y el método de control de la tasa de filtración.

a) Dirección de flujo.

De acuerdo con la dirección de flujo, los filtros pueden ser de flujo hacia abajo, hacia arriba, o de flujo dual, como se esquematiza en la figura 16.

Fig. 16: Tipos de filtros.

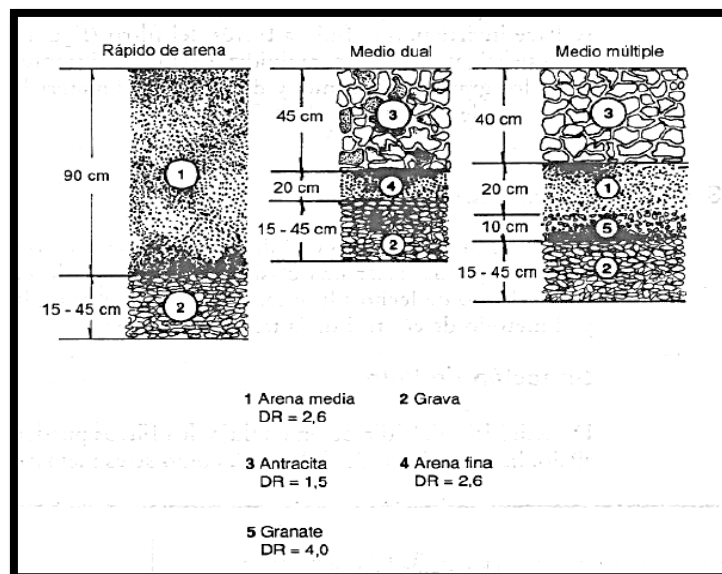


Fuente: Jairo A. Romero Rojas, "Potabilización del Agua".

b) Tipo de lecho filtrante.

Los filtros utilizan generalmente un solo medio, arena o antracita; un medio dual, arena y antracita, o un lecho mezclado; arena, antracita y granate o ilmenita. La figura 17 permite comparar los tres tipos de medios filtrantes comúnmente usados en tratamientos de aguas.

Fig. 17: Medios de filtración.



Fuente: Jairo A. Romero Rojas, "Potabilización del Agua".

c) Fuerza Impulsora.

De acuerdo con la fuerza impulsora utilizada para vencer la resistencia friccional ofrecida por el lecho filtrante, los filtros se clasifican como filtros de gravedad o de presión. El filtro por gravedad es el filtro más usado en plantas de purificación de agua. El filtro a presión se ha usado principalmente en la filtración de aguas para piscinas y en pequeñas plantas donde su instalación es ventajosa.

d) Tasa da filtración.

Los primeros filtros usados para tratamiento de agua fueron los filtros lentos, figura 16, los cuales utilizan una capa de arena fina de 1 m soportada sobre un lecho de grava de aproximadamente 0,30 m. Estos filtros fueron luego reemplazados por los filtros rápidos, filtros de arena, generalmente con lavado ascensional, con tasas de filtración mucho mayores y, por consiguiente, con requerimientos de área mucho menores. Posteriormente, con el uso de medios filtrantes duales o lechos mezclados, se lograron diseños mucho más económicos en área, al usar tasas de filtración todavía mayores que las de los filtros rápidos convencionales.

La tabla 17 resume algunas de las principales características de los filtros por gravedad más utilizados en nuestro medio.

Tabla 17: Principales características de filtros.

Característica	Filtros lentos de arena	Filtros rápidos de arena	Filtros de alta tasa
Tasa de filtración	2 – 5 (<12 m/d)	120 m/d	180 – 480 m/d
Medio	Arena	Arena	Arena y antracita
Distribución del medio	No estratificado	Estratificado: fino a grueso	Estratificado: grueso a fino
Duración carrera	20 – 60 días	12 – 36 horas	12 – 36 horas
Pérdida de carga	Inicial: 0,6 m	Inicial: 0,3 m	Inicial: 0,3 m
	final: 1,2 m	final: 2,4 – 3 m	final: 2,4 – 3 m
Agua de lavado	No usa	2-4% del agua filtrada	6% del agua filtrada
Profundidad del medio	0,6 – 1,0 m	0,60 – 0,75 m	Antracita 0,4 – 0,6 m arena 0,15 – 0,3 m
Profundidad de drenaje	0,30 m	0,30 – 0,45 m	0,30 – 0,45 m
Drenaje	Tubería perforada	tubería perforada Falsos fondos	Tubería perforada Falsos fondos

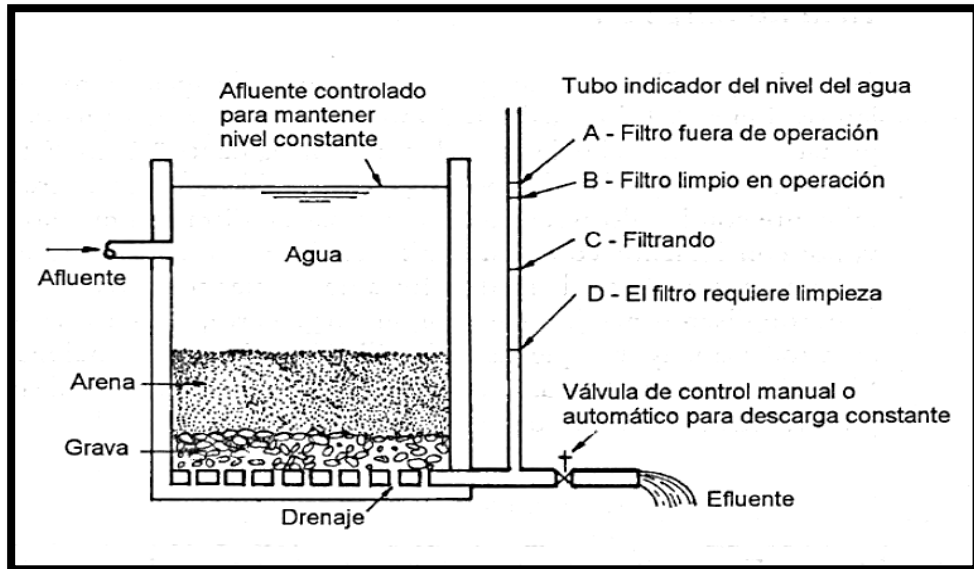
Fuente: Jairo A. Romero Rojas, "Potabilización del Agua".

e) Método de control

La tasa de filtración puede expresarse así:

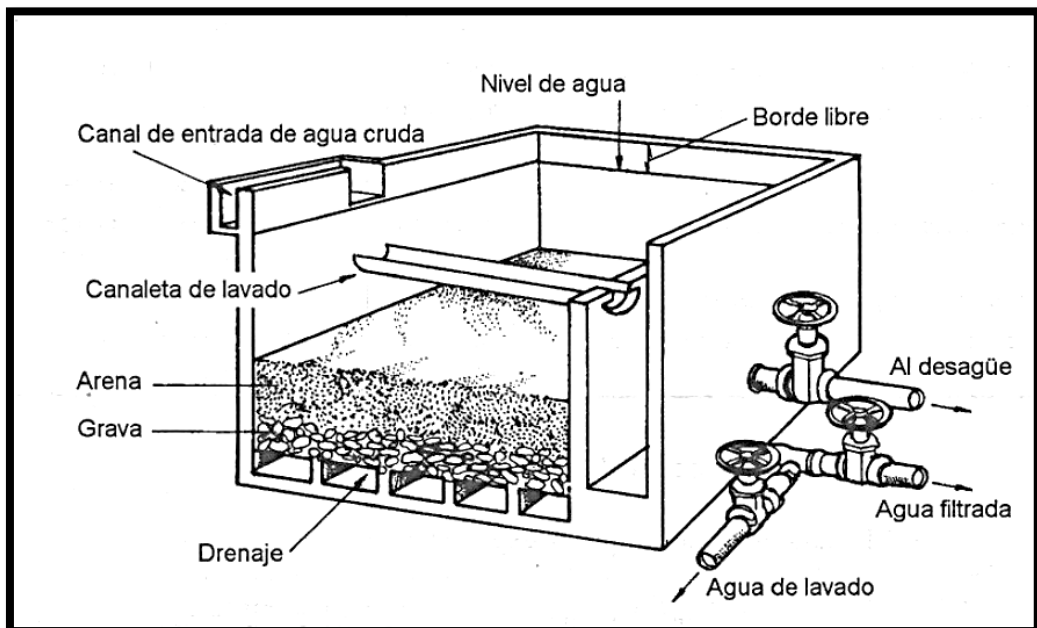
$$\text{Tasa de filtración} = \frac{\text{Fuerza impulsora}}{\text{Resistencia del filtro}} \quad (3.15)$$

Fig. 18: Filtro lento de arena.



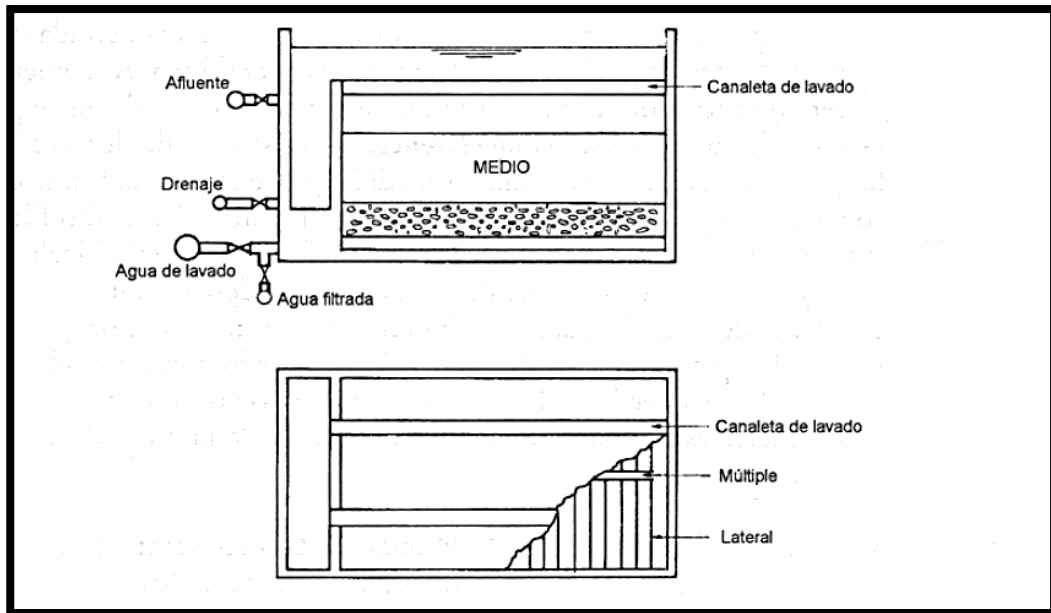
Fuente: Jairo A. Romero Rojas, "Potabilización del Agua".

Fig. 19: Filtro rápido de arena.



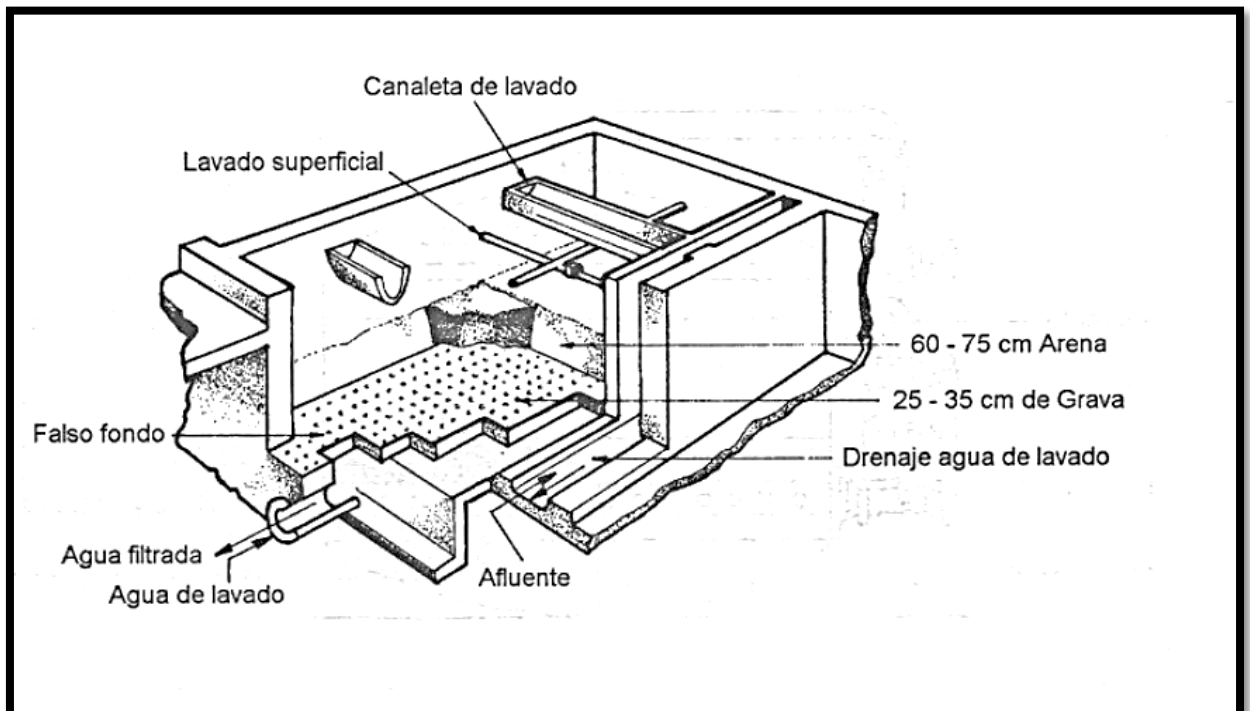
Fuente: Jairo A. Romero Rojas, "Potabilización del Agua".

Fig. 20: Corte a través de un filtro de presión.



Fuente: Jairo A. Romero Rojas, "Potabilización del Agua".

Fig. 21: Filtro rápido de arena.



Fuente: Jairo A. Romero Rojas, "Potabilización del Agua".

En la ecuación anterior la fuerza impulsora representa la pérdida de presión en el filtro, la cual empuja el agua a través del filtro. Al comenzar la carrera de filtración, el filtro está limpio; la fuerza impulsora requerida es mínima pues sólo se requiere vencer la resistencia del lecho filtrante limpio y del sistema de drenaje. A medida que se efectúa la filtración, los sólidos suspendidos removidos se acumulan dentro del medio filtrante; la fuerza impulsora debe vencer la resistencia ofrecida por el lecho taponado y el sistema de drenaje. Por lo tanto, si se desea mantener una tasa constante de filtración, la fuerza impulsora debe aumentar proporcionalmente al aumento en la resistencia del filtro; de lo contrario, el caudal a través del filtro declina y la filtración será de tasa declinante.

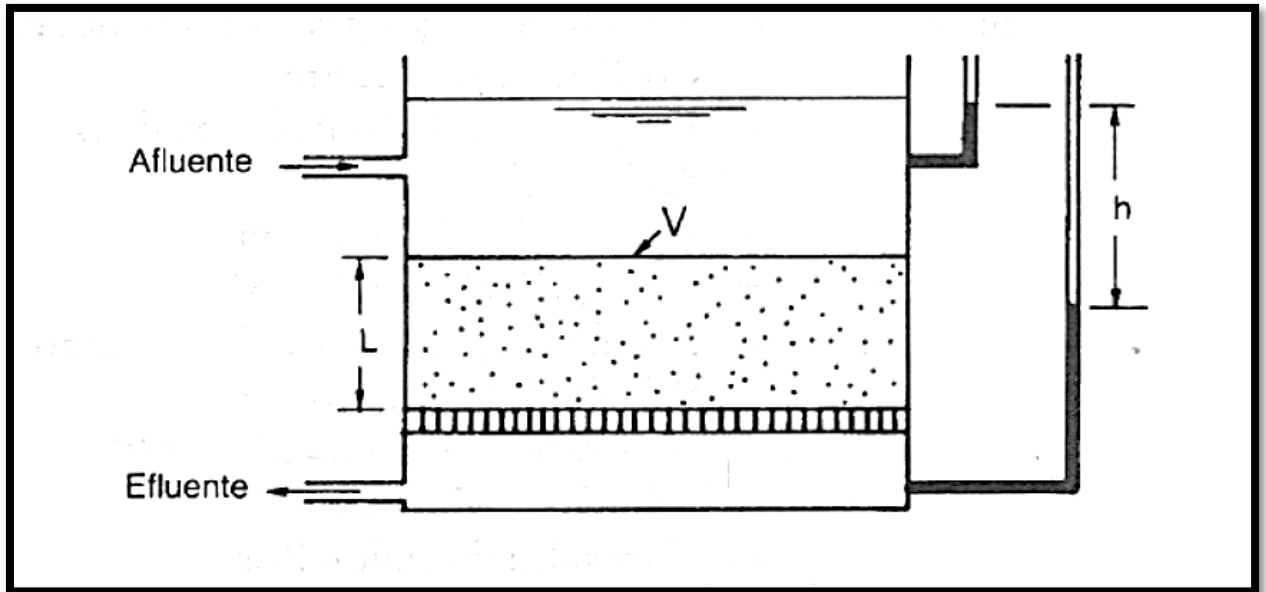
1.4.5.4. Hidráulica de la filtración.

Muchas son las ecuaciones utilizadas para determinar la pérdida de carga en un filtro limpio, entre las más conocidas las de Carmen Kozeny, Fair y Hatch, Rose y Hazen.

El flujo de agua a través de un filtro, a las tasas empleadas en tratamiento de agua, obedece a la ley de Darcy (ver figura 21).

$$V = K \cdot \frac{h}{L} \quad (3.16)$$

Fig. 22: Esquema de flujo de un filtro.



Fuente: Jairo A. Romero Rojas, "Potabilización del Agua".

donde:

h = Pérdida de carga en el lecho, m

L = Profundidad del lecho, m

v = Velocidad superficial, m/s

k = Coeficiente de permeabilidad, m/s

Por lo tanto, la tasa de filtración es directamente proporcional a la cabeza o energía disponible de filtración y a la permeabilidad del lecho, e inversamente proporcional al espesor del medio.

Mediante análisis dimensional e investigación experimental Rose estableció una ecuación que permite determinar analíticamente la pérdida de carga por fricción a través de lechos de material granular, granos de arena esféricos de tamaño uniforme, la cual tiene aplicación en el cálculo de pérdida de energía a través de un filtro limpio. La ecuación de Rose es la siguiente:

$$h = 1,067.C_D \frac{1}{e^4} \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{V^2}{g} \quad (3.17)$$

$$C_D = \frac{24}{N_{RE}} + \frac{3}{\sqrt{N_{RE}}} + 0,34 \quad (3.18)$$

$$N_{RE} = \frac{\rho.v.d}{\mu} = \frac{v.d}{\nu} \quad (3.19)$$

donde:

h = Pérdida de carga en el lecho, m

C_D = Coeficiente de arrastre

e = Porosidad del lecho (volumen de vacío/volumen del lecho)

L = Profundidad del lecho, m

v = Velocidad de filtración, m/s

d = Diámetro característicos de los granos, m

μ = Viscosidad dinámica, Pa.s

ν = Viscosidad cinemática, m²/s

ρ = Densidad del agua, kg/m³

g = Aceleración de la gravedad, 9,8 m/s²

N_{RE} = Numero de Reynolds

La ecuación 3.17 es de fácil aplicación si se supone un lecho de filtración de tamaño uniforme. Sin embargo, para aplicarla a lechos filtrantes estratificados como los de los filtros rápidos, se debe reemplazar adecuadamente el término del diámetro de los granos. Haciendo:

α = Factor de forma de área superficial

β = Factor de forma de volumen

A = Área superficial real del grano

V = Volumen real del grano

d = Diámetro medido del grano

γ = Factor de esfericidad

d_0 = Diámetro del grano esférico de volumen equivalente

A_0 = Área superficial de la esfera de diámetro d_0

Se tiene: $A = \alpha \cdot d^2$

$V = \beta \cdot d^3$

$$d = \frac{\alpha}{\beta} \cdot \frac{V}{A} \quad (3.20)$$

$$\psi = \frac{A_0}{A} = \frac{\pi \cdot d_0^2}{\alpha \cdot d^2} = 4,84 \cdot \frac{\beta^{2/3}}{\alpha}$$

Para partículas esféricas de diámetro d:

$$\frac{A}{V} = \frac{\pi \cdot d_0^2}{\frac{\pi \cdot d^3}{6}} = \frac{6}{d}$$

$$\frac{\alpha}{\beta} = 6,0 ; \quad d = \frac{6 \cdot V}{A}$$

Por lo tanto, reemplazando en la ecuación 3.17 se tiene:

$$\frac{h}{L} = 0,178 \cdot \frac{C_D \cdot v^2 \cdot A}{g \cdot e^4 \cdot V} \quad (3.21)$$

La aplicación de la ecuación 3.20 es directa, excepto por la evaluación del término A/V. Si todos los granos del medio filtrante son de tamaño y forma uniforme, el valor de A/V para un solo grano es el mismo que para el lecho total y se cumple la ecuación 3.20:

$$d = \frac{\alpha}{\beta} \bullet \frac{V}{A}$$

Si los granos varían en tamaño, pueden estar empacados homogéneamente dentro del lecho, caso de los filtros lentos, o pueden estar estratificados por tamaño, caso de los filtros rápidos. Suponiendo que las partículas o granos entre tamices adyacentes son de tamaño uniforme, se puede encontrar el valor de la relación A/V en

términos de la componente o proporción en peso retenida entre tamices.

Para lechos estratificados, filtros rápidos,

$$\frac{A}{V} = \frac{\alpha}{\beta} \cdot \sum C_{Di} \cdot \frac{P_i}{d_i} \quad (3.22)$$

donde:

P_i = Fracción en peso de partículas de tamaño d_i

$d_i = (d_1 \cdot d_2)^{1/2}$, tamaño promedio geométrico de las aberturas de los dos tamices adyacentes.

C_{Di} = Coeficiente de arrastre para los granos de tamaño promedio d_i

1.4.5.5. Selección del medio filtrante

Como lo señala KAWAMURA, la selección de un medio filtrante es determinada por la durabilidad requerida, el grado deseado de purificación, la duración de la carrera del filtro y la facilidad deseable de su lavado.

El medio ideal debe poseer un tamaño tal que permita obtener un efluente satisfactorio; debe ser de un material durable, capaz de retener la máxima cantidad de sólidos y ofrecer facilidad para limpiarlo con una cantidad mínima de agua de lavado.

En una arena gruesa la permeabilidad es mayor que en una arena fina aunque la porosidad, y el volumen de vacíos, sean igual. Los poros pequeños de la arena fina causan mayor resistencia al flujo, o sea menor permeabilidad.

Una arena puede poseer partículas del mismo tamaño, es decir, gradación uniforme; o puede estar constituida por partículas que van

desde tamaño fino hasta grueso, gradación no uniforme. La arena de gradación posee mayor porosidad que una no uniforme, y por ello, mayor permeabilidad.

Allen Haz en (1892) definió el tamaño efectivo, TE, como el tamaño de partículas o del grano, en mm, tal que un 10% del material en peso es más pequeño que dicho tamaño. En otras palabras, él TE es el tamaño del tamiz, en mm, que permite el paso del 10% del medio filtrante. El TE corresponde, aproximadamente, al tamaño promedio por conteo y es un parámetro usado para caracterizar medios filtrantes. De la misma manera, Hazen definió el coeficiente de uniformidad, CU, como la relación del tamaño de granos que tiene un 60% más fino que él mismo, al tamaño que tiene un 10% más fino que él mismo. En otras palabras:

$$TE = d_{10}$$

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{\text{Tamaño} \cdot \text{partícula} \cdot \text{del} \cdot 60\% \cdot \text{que} \cdot \text{pasa}}{\text{Tamaño} \cdot \text{partícula} \cdot \text{del} \cdot 10\% \cdot \text{que} \cdot \text{pasa}} = \frac{d_{60}}{TE}$$

También puede afirmarse que el CU es la relación entre el tamaño del tamiz que deja pasar el 60%, en peso, del material y su TE. El coeficiente de uniformidad representa la pendiente promedio de la curva granulométrica, en la región comprendida entre los tamaños correspondientes al 60% y al 10% que pasan, Entre más bajo sea su valor, más uniforme será la gradación de la arena y, consecuentemente, entre más alto sea su valor, menos uniforme será la arena.

HAZEN demostró que la permeabilidad varía en proporción al cuadrado del tamaño efectivo.

a) Arena

La arena es el medio filtrante más usado, posiblemente por ser el más económico, En filtros rápidos de arena la profundidad del lecho es de 60 - 70 cm, el TE de 0,45 – 0,51 mm y el CU de 1,2 – 1,7 (15). El manual de diseño de plantas de tratamiento de la AWWA (1) señala: la mayoría de los filtros rápidos de arena usan arena con TE de 0,35 – 0,50 mm, aunque algunos tienen arena con TE de 0,7 mm, El CU es generalmente 1,3 – 1,7 y la profundidad de 60 - 75 cm. Una especificación típica de arena para filtros tapidos es la de la tabla 18.

Tabla 18: Arena típicas para filtros rápidos.

Nº Tamiz	Abertura mm	% Retenido sobre el	
		Mínimo	Máximo
70	0,208	0	1
50	0,296	0	9
40	0,417	40	60
30	0,689	40	60
20	0,633	0	9
16	1,168	0	1

Fuente: Jairo A. Romero Rojas, "Potabilización del Agua".

La arena para filtros debe tener una solubilidad en ácido clorhídrico al 40%, en 24 horas, menor del 5%; una densidad relativa mayor de 2,5 y debe ser limpia y bien gradada, según la norma AWWA B100 – 53.

De acuerdo con CULP (18) el tamaño efectivo de la arena en filtros rápidos varía entre 0,35 y 0,7 mm; un valor típico es el de 0,5 mm. Dicho medio permite tratar aguas con turbiedades de 5 – 10 UTJ a tasas hasta de 120 m/d.

El coeficiente de uniformidad varía entre 1,3 y 1,7.

b) Lecho de Grava

El tamaño y la profundidad de la capa interior de grava depende del sistema de drenaje usado; asimismo, el tamaño y la profundidad de la capa superior de grava depende del tamaño de la capa interior de medio fino (arena o antracita) que soporte.

El lecho de grava ideal es uno en el cual esta es casi esférica en forma y existe un incremento uniforme en tamaño desde el techo hasta el fondo. La profundidad del lecho de grava puede variar entre 15 y 60 cm; es usual una profundidad de 45 cm en filtros rápidos. Piedras tan grandes como de 7,5 cm pueden colocarse cerca de los drenajes del filtro, pero se prefiere un tamaño máximo de 2,5 cm. La capa del fondo debe extenderse por lo menos 10 cm sobre el punto de salida más alto del agua de lavado proveniente del sistema de drenaje. La grava debe ser dura, redondeada, con una densidad relativa promedio no menor de 2,5.

La tabla 19 presenta las características de un lecho típico de grava para un sistema de drenaje por tuberías.

Tabla 19: Lacho típico da grava para sistema de drenaje por tuberías.

Descripción	Nº de la capa				
	1	2	3	4	5
Profundidad da la capa en cm	10	7,5	7,5	10	10
Abertura de la malla cuadrada en pulgadas					
Pasando 1	1	3/4	1/2	1/4	1/8
	3/4	3/4	1/4	1/8	1/16

Fuente: Jairo A. Romero Rojas, "Potabilización del Agua".

1.5. Descripción de las partes principales del equipo.

1.5.1. Partes principales del equipo.

El equipo consta principalmente de 2 cámaras:

- a) CAMARA PRIMARIA: el Agua cruda antes de entrar a la cámara recibe una dosis de coagulante $Al_2(SO_4)_3$, con la finalidad de conseguir en la cámara, en forma simple y eficaz una DECANTACION ACELERADA de los lodos floculados producto de la reducción de los sólidos suspendidos y regulación del pH, produciendo agua clarificada.

- b) CAMARA SECUNDARIA: El agua proveniente de la cámara primaria, pasa a la cámara secundaria compuesta por una malla de filtración, donde son retenidas las partículas en suspensión, para luego salir al servicio, recibiendo antes la aplicación de desinfectantes.

1.6. Variables para el diseño y construcción del equipo.

- a) Variables de diseño y construcción.

Son aquellas variables cuyos valores sirven para determinar la cantidad de material a emplearse en la construcción del equipo.

No necesariamente requieren medición de la magnitud, cuando se lleva a cabo un experimento.

- b) Variables de Operación.

Son aquellas que necesariamente requieren de medición de la magnitud, cuando se lleva a cabo un experimento.

1.7. Uso del equipo en la industria.

Los clarificadores, equipos industriales de tratamiento del agua, encuentran uso en molinos de pulpa y fábrica de papel, reciclaje de fibra, bebidas, procesamiento de comidas, lecherías, molinos de textiles, municipalidades y otros. La eliminación total de sólidos flotantes a menos de 50 ppm de sólidos filtrables y sedimentos de consistencia espesa de 2-4% son indicativos de la eficiente operación de estas plantas industriales para el tratamiento del agua.

Aquí hay una lista indicativa de las aplicaciones en la industria:

- ✓ Recuperación de Fibra en Molinos Pulpa y fábricas de Papel
- ✓ Recuperación de Sólidos
- ✓ Municipalidades
- ✓ Producción de Carbono Negro
- ✓ Procesamiento de Pescado
- ✓ Industria del Jabón
- ✓ Procesamiento y empaque de carne y pescado
- ✓ Espesamiento de los sedimentos
- ✓ Lecherías
- ✓ Procesamiento de Aceite Vegetable
- ✓ Plantas de Enlucido
- ✓ Agua Embotellada
- ✓ Reciclaje del agua
- ✓ Eliminación de Algas
- ✓ Procesamiento de pollo
- ✓ Panaderías
- ✓ Procesamiento de Papas
- ✓ Refinerías
- ✓ Operaciones de lavado de carros
- ✓ Eliminación del almidón

CAPÍTULO II: CONDICIONES Y CÁLCULO DE DISEÑO.

2.1. Condiciones para el diseño: variables específicas del diseño.

Son aquellas variables cuyos valores sirven para determinar la cantidad de material a emplearse en la construcción del equipo.

Se consideran las siguientes variables de diseño y construcción.

2.1.1. Definición del tamaño del equipo.

El tamaño del equipo está definido por los usos, que en este caso se le va a dar, en función de los objetivos del trabajo de investigación.

Los usos están referidos a:

- Prácticas de laboratorio de procesos y operaciones.
- Tratamiento de aguas con los alumnos.

En base a estos usos y los estándares de tratamiento de aguas que se tiene, se define el tamaño del equipo y en función del volumen de tratamiento a obtener. Este volumen es superior a los 100 L.

2.1.2. Volumen del tanque cilíndrico horizontal (V_{tc}).

El valor se ha fijado en aproximadamente 100 L, (solo del tanque cilíndrico, es decir, sin contar el volumen de los casquetes) teniéndose en cuenta que, para el tanque cilíndrico, **la altura debe ser el doble de su Diámetro.**

Es decir:

$$h_{tc} = 2 \cdot D_{tc}$$

2.1.3. Longitud del tanque cilíndrico horizontal (L_{tc}).

Conociendo el valor del volumen del tanque cilíndrico y teniendo en consideración que: $h_{tc} = 2 \cdot D_{tc}$; se puede deducir la ecuación para calcular la altura del Tanque cilíndrico horizontal.

Se sabe que el volumen de un tanque cilíndrico se puede calcular mediante:

$$V_{tc} = \frac{\pi \cdot D_{tc}^2}{4} \cdot h_{tc} = 0,785 \cdot D_{tc}^2 \cdot h_{tc}$$

Reemplazando:

$$h_{tc} = 2 \cdot D_{tc} \rightarrow D_{tc} = \frac{h_{tc}}{2}$$

Entonces:

$$V_{tc} = 0,785 \cdot \left(\frac{h_{tc}}{2}\right)^2 \cdot h_{tc}$$

$$V_{tc} = \frac{0,785}{4} \cdot h_{tc}^3 = 0,19625 \cdot h_{tc}^3$$

$$h_{tc} = \sqrt[3]{\frac{V_{tc}}{0,19625}}$$

2.1.4. Diámetro del tanque cilíndrico horizontal. (D_{tc})

Está en relación con L_{tc} mediante la siguiente ecuación:

$$D_{tc} = 0,5 \cdot h_{tc}$$

2.2. Cálculos efectuados para el diseño.

2.2.1. Condiciones iniciales a considerar en el diseño.

$$V_{tc} = 100 \text{ L} = 0,1 \text{ m}^3$$

2.2.2. Cálculo del Largo del tanque cilindro en el diseño.

Aplicando la ecuación:

$$L_{tc} = \sqrt[3]{\frac{V_{tc}}{0,19625}}$$

$$L_{tc} = \sqrt[3]{\frac{0,1 \text{ m}^3}{0,19625}}$$

$$L_{tc} \approx 0,80 \text{ m} \cong 80 \text{ cm}$$

2.2.3. Calculo del Diámetro del tanque cilindro Horizontal.

Aplicando la relación:

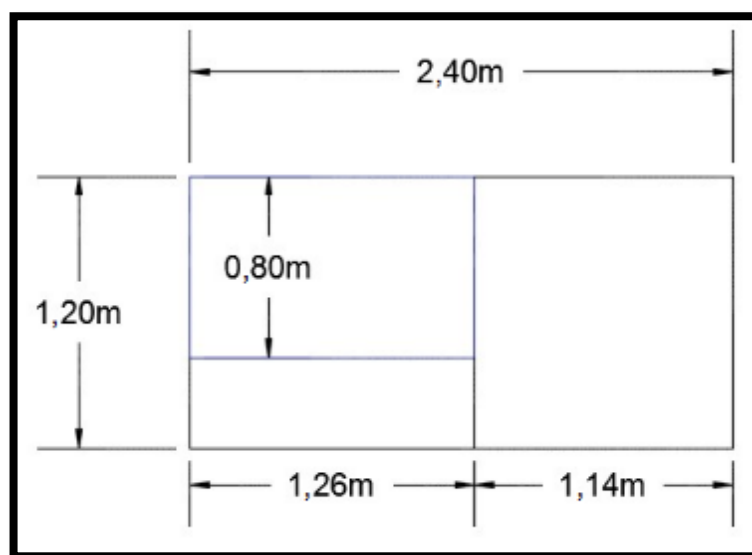
$$D_{tc} = \frac{h_{tc}}{2}$$

$$D_{tc} = \frac{08 \text{ cm}}{2} = 40 \text{ cm}$$

2.2.4. Calculo de la dimensión de la plancha de acero inoxidable a cortar.

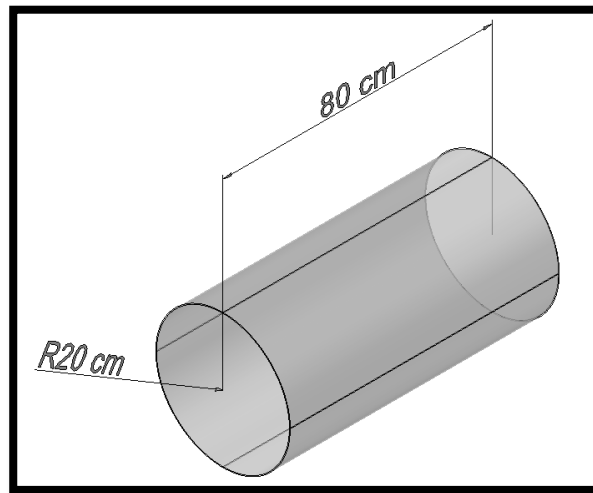
$$B = \pi \cdot D = \pi \cdot 0,4 \text{ m} = 1,257 \text{ m} = 126 \text{ cm}$$

Fig. 23: Dimensionamiento de la plancha de acero para la construcción de cilindro.



Fuente: Elaboración propia.

Fig. 24: Vista isométrica del cilindro.



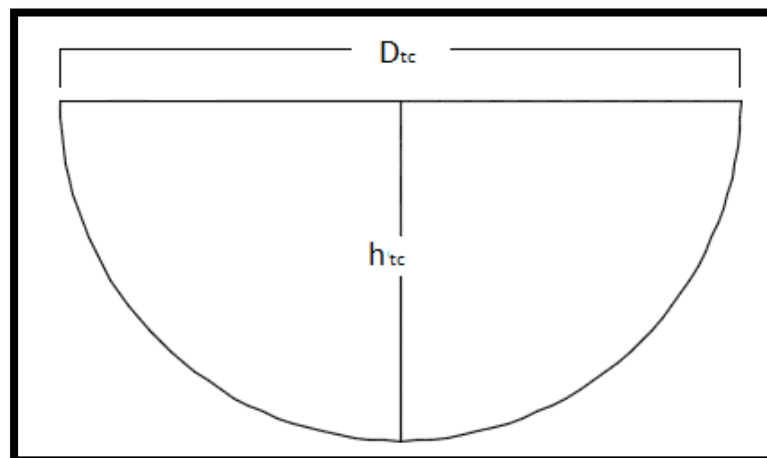
Fuente: Elaboración propia.

2.2.5. Cálculo del segmento esférico.

Altura del segmento esférico:

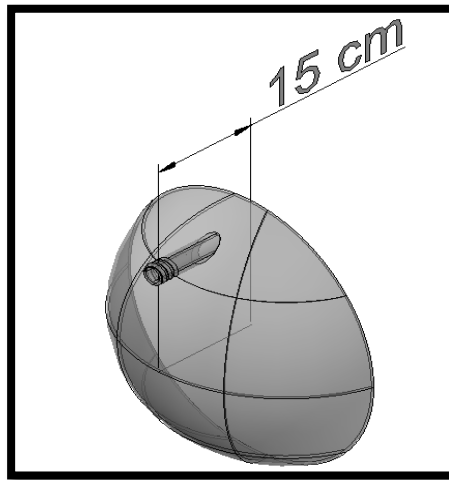
$$h_{se} = 15 \text{ cm} = 0,15 \text{ m}$$

Fig. 25: Dimensiones del segmento esférico.



Fuente: Elaboración propia.

Fig. 26: Vista isométrica del segmento esférico.



Fuente: Elaboración propia.

Diámetro del tanque cilíndrico horizontal:

$$V_{se} = \frac{\pi \cdot h^2 \left(\frac{3}{2} D - h \right)}{3}$$

$$V_{se} = \frac{\pi \cdot 0,15^2 \left[\left(\frac{3}{2} \right) (0,4) - 0,15 \right]}{3}$$

$$V_{se} = 0,0106 \text{ m}^3 = 10,60 \text{ L}$$

Por lo tanto:

$$2 V_{se} = (2)10,60 = 21,20 \text{ L}$$

Volumen total:

$$V_{tc} + V_{se} = 100 + 21,20 = 121,20 \text{ L}$$

CAPÍTULO III: CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DEL EQUIPO

3.1. Selección de Materiales.

La corrosión es la causa principal del deterioro de los equipos de la industria química. La mayoría de destrucciones pueden prevenirse escogiendo adecuadamente los materiales dentro de la gama muy amplia que dispone el ingeniero. Entre ellos se encuentran una gran variedad de metales, plásticos, materiales cerámicos y pinturas.

En las plantas que operan en continuo, las pérdidas en producción debido a deterioros por corrosión son tan costosas que justifican los materiales más costosos. En instalaciones más sencillas, puede ser más económico seleccionar materiales de menor costo y programar limpiezas frecuentes de los equipos para prevenir la corrosión.

Para la selección del material a utilizar en los distintos equipos dentro de una planta es necesario tomar en cuenta los siguientes factores:

- Tamaño de planta
- Condiciones de trabajo
- Tipo de corrosión
- Adecuada información de los materiales que se puedan escoger
- Características frente a la corrosión
- Cuestiones económicas

El acero inoxidable AISI 304 es el más versátil y uno de los aceros inoxidables de la serie 300. Tiene excelentes propiedades para el conformado y soldado. Se puede usar para aplicaciones de embutición profunda, de rolado y de corte.

Tiene buenas características para la soldadura, no requiere recocido tras la soldadura para que se desempeñe bien en una amplia gama de condiciones corrosivas. La resistencia a la corrosión es excelente, excediendo al tipo 302 en una amplia variedad de ambientes corrosivos incluyendo productos de petróleo calientes o con vapores de combustión de gases.

Tiene excelente resistencia a la corrosión en servicio intermitente hasta 870 °C y en servicio continuo hasta 925 °C. No se recomienda para uso continuo entre 425 – 860 °C, pero se desempeña muy bien por debajo y por encima de ese rango.

El uso que se le da a este material es muy variado; se destacan los equipos para procesamiento de alimentos, enfriadores de leche, intercambiadores de calor, contenedores de productos químicos, tanques para almacenamiento de vinos y cervezas, así como también para partes para extintores de fuego.

El acero inoxidable AISI 304 presenta las siguientes características:

- Norma de Construcción : ASTM A 276

- Propiedades Mecánicas : Resistencia a la fluencia 310 MPa (45 KSI)
Resistencia Máxima 620 MPa (90 KSI)
Elongación 30% (en 50 mm)
Reducción de área 40%
Módulo de elasticidad 200 GPa (29 000 KSI)

Tesis: "Diseño, construcción e instalación de un prototipo de Equipo Clarificador Horizontal para aguas superficiales en la Amazonia Peruana."

- Propiedades Físicas : Densidad 7,8 g/cm³ (0,28 lb/in³)
- Propiedades Químicas : 0,08 % C mín
2,00 % Mn
1,00 % Si
18,0 – 20,0 % Cr
8,0 – 10,5 % Ni
0,045 % P
0,03 % S

Después de seleccionar los materiales para el equipo, hay que asegurarse que estos han sido fabricados con las especificaciones correctas.

3.2. Materiales empleados.

Cuadro 01: Materiales empleados.

MATERIALES
02 planchas de acero inoxidable de 5/64" espesor (2mm)
2 docenas de pernos de 5/16 x 1"
01 metro cuadrado de empaquetadura
01 tubo de 2" de acero inoxidable
01 tubo T de 3/4" PVC
05 Kg de soldadura inoxidable de 3/32
05 Kg de soldadura inoxidable de 1/8
02 válvulas de paso de 2"
02 válvulas de paso de 3/4 "
01 mallas de acero inoxidable 2mm (espesor)
01 Tanque de plástico
Teflón, pegamento y cierra

Fuente: Elaboración propia.

3.3. Descripción y especificaciones de los componentes del equipo de tratamiento de aguas turbias.

3.3.1 Cuerpo cilíndrico del equipo: Características Técnicas

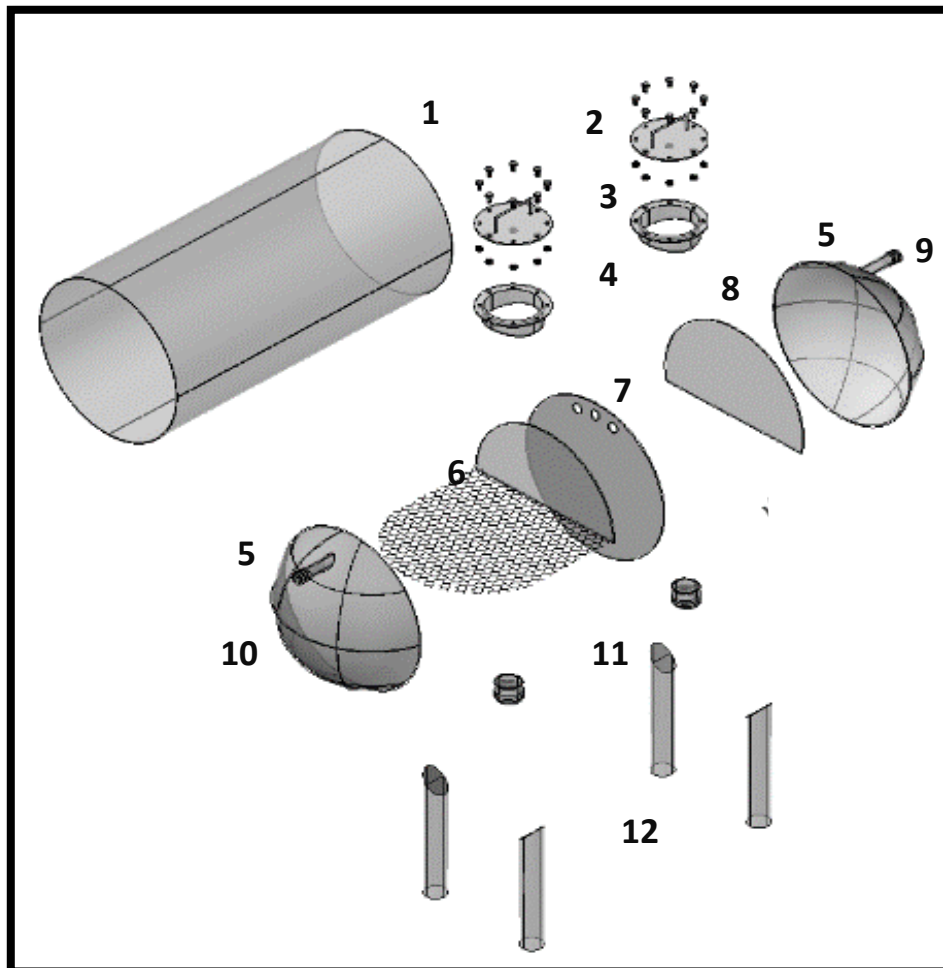
- Material : Acero Inoxidable AISI 304
- Diámetro : 0,40 m
- Altura : 0,80 m
- Capacidad : 100 L
- Espesor : 2 mm

3.3.2 Casquetes Esféricos: Características Técnicas

- Material : Acero Inoxidable AISI 304
- Diámetro : 0,40 m
- Altura : 0,20 m
- Espesor : 2 mm

3.4. Ensamblado, despliegue y Vistas principales del equipo instalado (H, F y P) cortes y secciones.

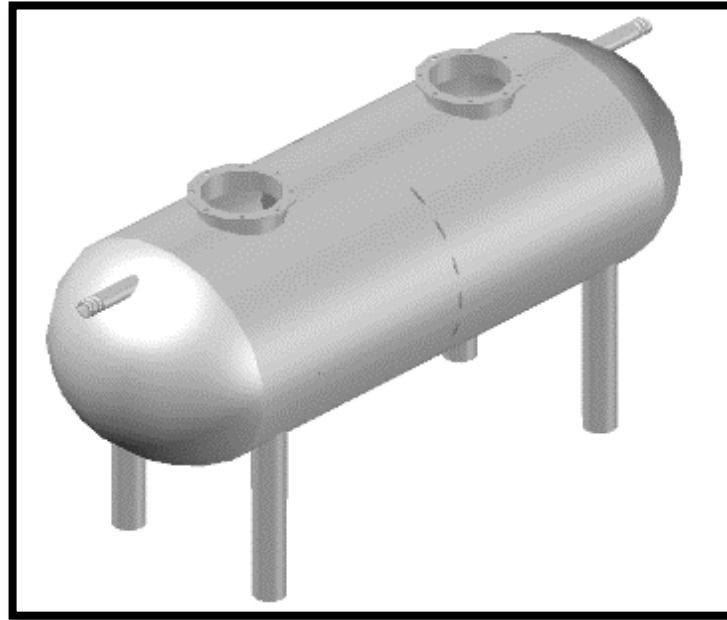
Fig. 25: Despliegue del prototipo de Equipo Clarificador Horizontal.



Fuente: Elaboración Propia.

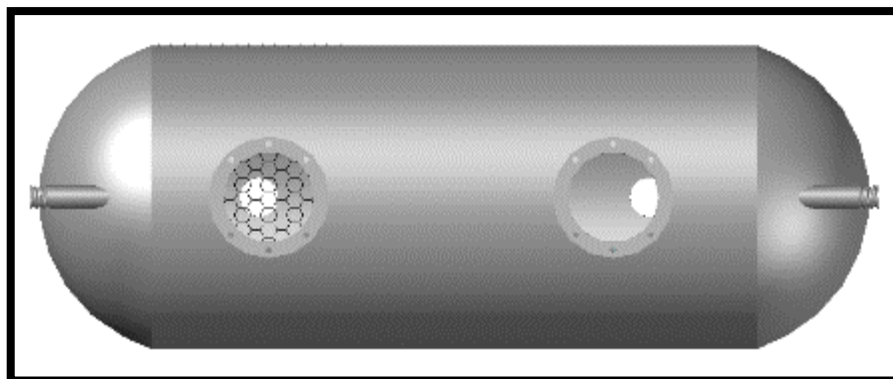
- | | |
|---------------------------|--------------|
| 1. Cilindro | 7. Plancha 1 |
| 2. Pernos y Tuercas | 8. Plancha 2 |
| 3. Tapas | 9. Entrada |
| 4. Entradas Mantenimiento | 10. Salida |
| 5. Casquetes | 11. Purgas |
| 6. Malla | 12. Patas |

Fig. 26: Ensamblado del prototipo de Equipo Clarificador Horizontal.



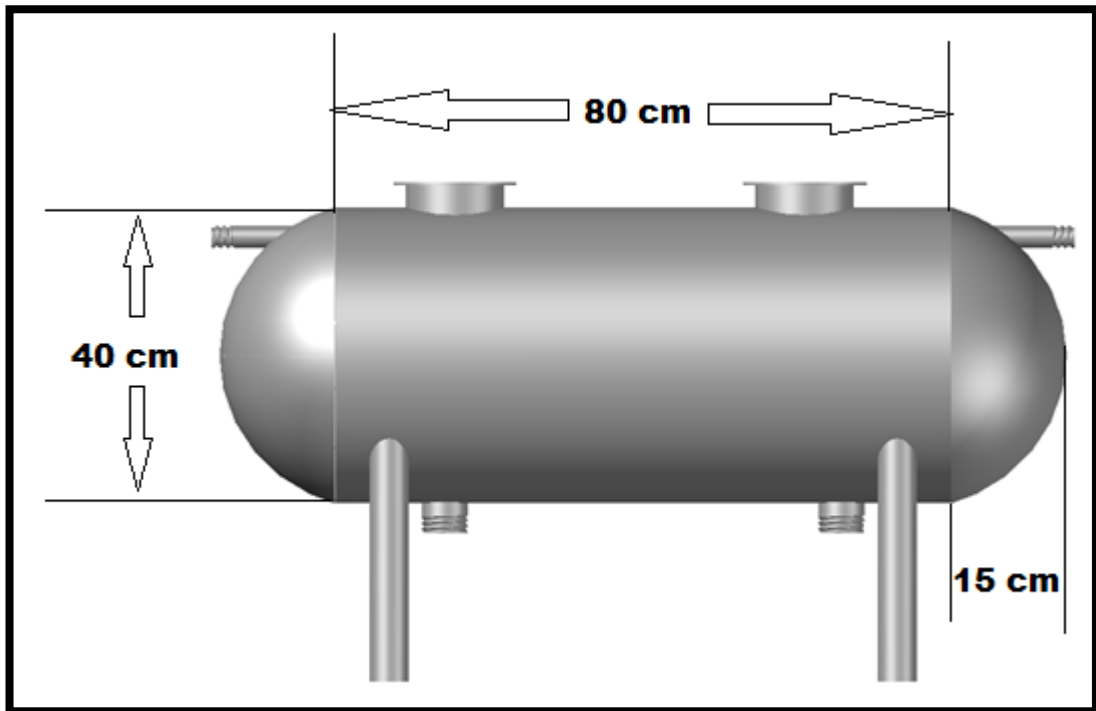
Fuente: Elaboración Propia.

Fig. 27: Vista superior del prototipo de Equipo Clarificador Horizontal.



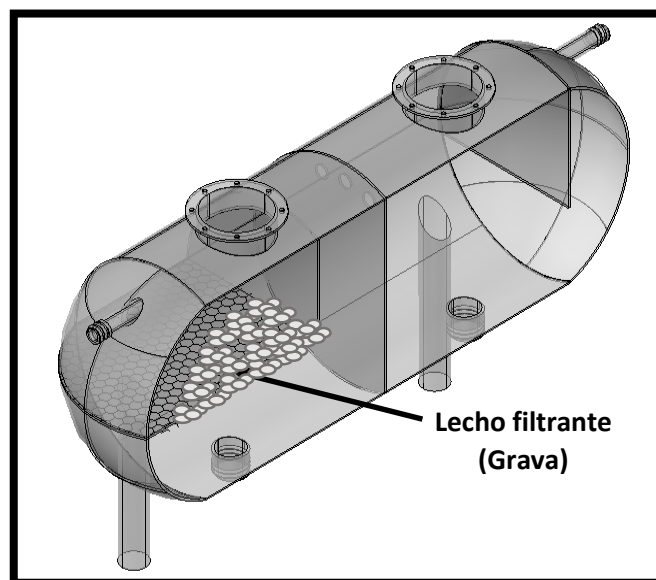
Fuente: Elaboración Propia.

Fig. 28: Vista lateral del prototipo de Equipo Clarificador Horizontal.



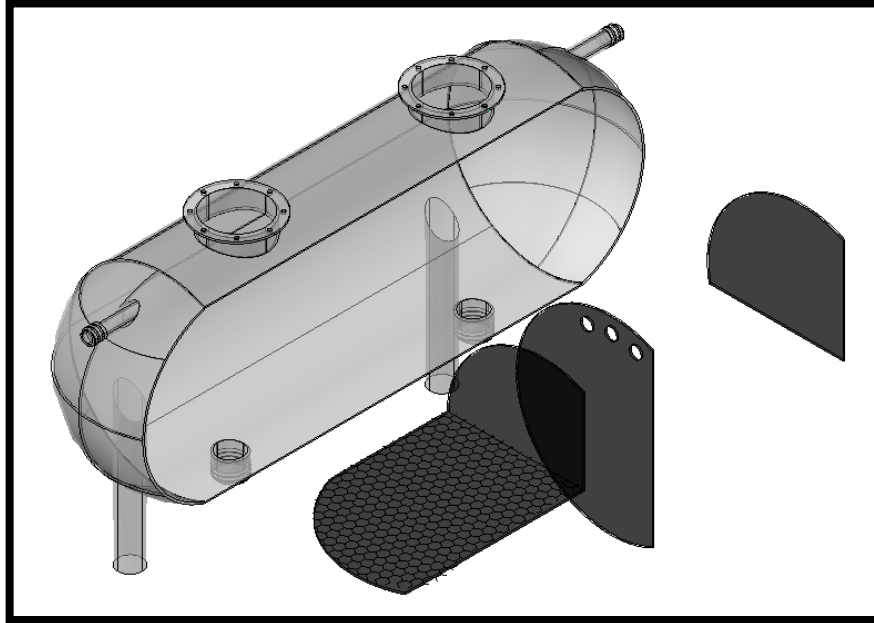
Fuente: Elaboración Propia.

Fig. 29: Corte transversal del prototipo de Equipo Clarificador Horizontal.



Fuente: Elaboración Propia.

Fig. 30: Secciones internas del prototipo de Equipo Clarificador Horizontal.



Fuente: Elaboración Propia.

3.5. Disposición adecuada del equipo en el laboratorio.

El prototipo de equipo que es un clarificador horizontal se encontrará a disposición de la **UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA AMAZONIA PERUANA**, en particular a la **FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA** y a todos los estudiantes para hacer uso en sus prácticas de laboratorio y de ese modo poner en práctica la teoría aprendida en las aulas y enriquecer los conocimientos adquiridos en el proceso de sus aprendizajes.

CAPÍTULO IV: EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS Y CONTROL DEL EQUIPO

4.1. Descripción del funcionamiento de equipo.

El equipo debe ser acondicionado correctamente asegurándose que las conexiones de instalación del equipo estén bien ajustadas y asegurándose de que no exista ningún tipo de fuga que entorpezca las pruebas a realizar.

El equipo deberá estar conectada a una línea de tuberías que conducen el agua a clarificar depositada en un tanque de plástico y que se encuentra ubicada 5 metro arriba del equipo, al iniciar la prueba se abre el pase de agua mediante la válvula a un 25% de su totalidad, para mantener un caudal constante y controlable para que la velocidad de sedimentación no sea sobrepasada, a su vez considerar el tiempo necesario de sedimentación, además que se efectuará la operación mientras el agua pasa por las dos cámaras internas dentro del equipo. Luego de aproximadamente 45 minutos se obtiene el agua clarificada (Ver Anexo); **estos 5 metros de altura será aprovechada ya que la presión aumentará gracias a la fuerza de gravedad; esta altura a su vez nos permitirá que al tener abierta la válvula al 100%, por la misma acción descrita, la presión y el caudal aumenta tres veces más, por lo que nos permitirá la limpieza y enjuague del equipo**

4.1.1. Equipo para el proceso de contacto con los sólidos.

Este procedimiento ha impulsado el desarrollo de una nueva técnica del proceso de Coagulación - Floculación - sedimentación, la cual se conoce comúnmente como **"PROCESO de CONTACTO con SÓLIDOS"**. Las diversas unidades que se usan son

básicamente similares, ya que el mezclado con el coagulante, la coagulación, la floculación y la sedimentación se llevan a cabo en un solo tanque. En todas aquellas la posición de lodos coagulantes se introduce en el fondo o cerca del fondo de la zona de sedimentación, de manera que ocurra un flujo hacia arriba.

El agua puede entrar cerca del nivel superior del tanque, teniendo lugar la coagulación, en este caso en la zona central del tanque que tiene flujo hacia abajo, o puede traer el coagulante agregado al principio, y entonces introducirse directamente en el agua mezclada con los lodos en el fondo. Dado que la velocidad de elevación del agua en la zona de sedimentación es menor que la velocidad de asentamiento del floculo pesado, este permanece en suspensión a una profundidad de un metro a más, y a través de él pasa el agua que se va elevando.

La acción “**RESTREGANTE**” del floculo previamente formado induce la precipitación de compuestos insolubles, así como la eliminación efectiva de las partículas finas (coloides) suspendidas, que no se depositaran de otro modo.

Las unidades de contacto con sólidos pueden usarse en la clasificación de un abastecimiento de agua. En todos los casos, sin embargo, el agua se somete a una filtración como peso final.

4.1.2. Coagulación y floculación.

Estas operaciones se realizan después del mezclado, usualmente en un solo tanque, con un TIEMPO DE RETENCIÓN que varía entre 40 y 45 minutos.

Este lapso depende de las dimensiones de la unidad y de la velocidad a que pasa el agua a través de ella.

4.2. Evaluación y Calculo del Tiempo de retención (Tr) estimado.

Calculo del tiempo de Retención T_r

Se utilizará las siguientes ecuaciones:

$$t_r = \frac{V_r}{Q} \dots \dots \dots (1) \qquad V_r = \frac{Q \cdot t_r}{2} \dots \dots \dots (2)$$

Tomando la segunda ecuación se tiene:

$$V_r = \frac{Q \cdot t_r}{2}$$

Donde:

V_r = Volumen en primera cámara

Q = Caudal de Ingreso al sistema

t_r = Tiempo de Retención experimental

$$V_r = \frac{44 \frac{\text{ml}}{\text{s}} \times 0.75 \text{h} \times \frac{3600 \text{s}}{\text{h}}}{2}$$

$$V_r = 59400 \text{ ml}$$

Reemplazando en la ecuación 1 tenemos:

$$t_r = \frac{59400}{44} = 1350 \text{ s} \approx 22.5 \text{ min}$$

Para conocer el tiempo de retención T_r en todo el sistema incluyendo las dos cámaras se tiene:

$$T_r = 2t_r$$

$$\therefore T_r = 2 \times 22.5 \text{ min} = 45 \text{ min}$$

4.3. Ensayos y pruebas del funcionamiento del equipo.

Se realizaron tres (03) pruebas de funcionamiento del equipo clarificador Horizontal, en el cual se evaluó de manera visual el cambio de turbidez e hicimos un comparativo entre el agua antes y después de pasar la operación por el equipo, con la finalidad de determinar los parámetros óptimos de operación.

4.4. Análisis de los resultados obtenidos.

Durante cada prueba de funcionamiento se evaluó el tiempo necesario en el que toda la operación se desarrollara como se había planificado con las condiciones óptimas de funcionamiento.

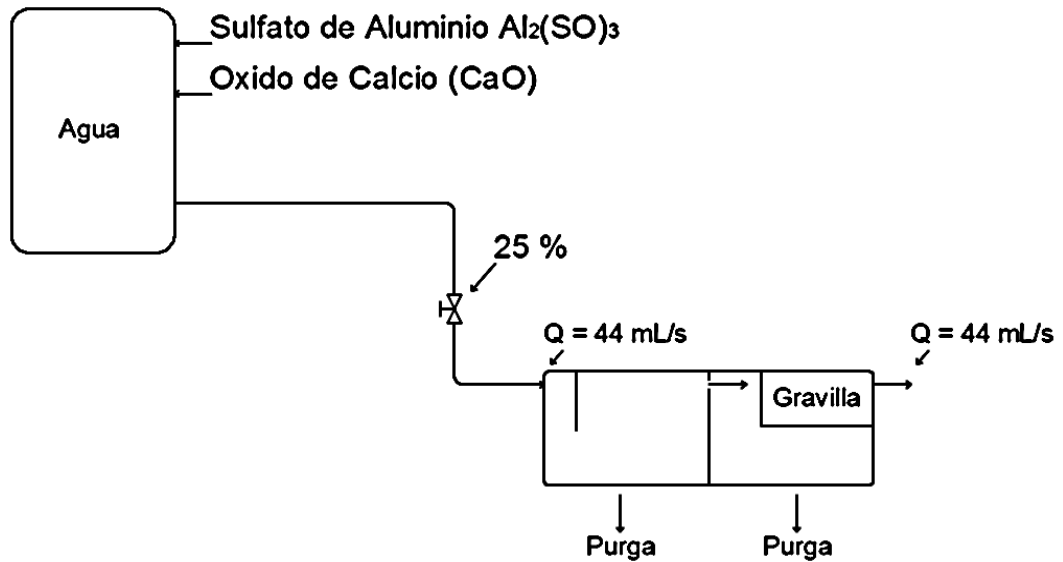
Se tomó dos muestras, una antes de agregar el coagulante al tanque con agua y otra después de pasar por el clarificador, dichas muestras fueron analizadas en un laboratorio para conocer sus condiciones físicas y químicas.

Los resultados de los análisis de ambas muestras se muestran en el cuadro N° 01 (Ver Anexo)

4.5. Determinación de las condiciones óptimas del funcionamiento del equipo.

Presión de Funcionamiento	: 1 atm
Caudal del Agua turbia	: 44 mL/s \approx 2.64 L/min
Flujo en el Equipo	: Continuo.
Tiempo de Operación	: 45 min.

4.6. Diseño Experimental.



4.7. Manual de instrucciones para el funcionamiento y mantenimiento del equipo.

El Prototipo de Equipo que se utilizara es un Clarificador Horizontal, cuya finalidad es obtener agua clarificada de una muestra de agua turbia luego de pasar por las cámaras internas en el equipo, para el funcionamiento del equipo es primordial un tanque elevado con el agua turbia la misma que mediante tuberías lo conduzca hacia el equipo conectado para iniciar la prueba. Antes de cada prueba, consideramos que es de vital importancia verificar en primera instancia el estado del equipo, luego que las conexiones de entrada hacia el equipo estén aseguradas y ajustadas correctamente, que el área de trabajo cuente con orden y limpieza, entre otros, esencial para el buen funcionamiento de este, una vez realizado lo anterior se inicia la prueba.

Recolección de muestra de sedimento

La obtención del sedimento utilizado para las pruebas se recolecto del rio Nanay debido a la temporada de merma o vaciante de los ríos es más fácil conseguir debido a las playas que se forman.

Lavado del lecho filtrante con agua limpia

Es necesario antes de realizar la primera prueba realizar una corrida con agua limpia por todo el sistema, en especial el lecho filtrante para asegurar la limpieza del equipo y los resultados de las pruebas siguientes no se vean afectadas.

Acondicionamiento de Agua Turbia para la Prueba Real

Para ellos se utilizará el sedimento recolectado el cual utilizaremos para mezclar con agua en un tanque de capacidad de 350 litros y homogenizar hasta obtener el agua turbia.

Análisis de las Muestras en el Laboratorio

Luego de realizar el procedimiento anterior se toma una muestra representativa que será analizada en laboratorio para conocer:

- Condiciones físicas : conductividad, Turbiedad y pH.
- Condiciones Químicas : Alcalinidad y Aluminio.

Floculación

Al agua turbia que se tiene en el tanque se añade 30 g de sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) y la tercera parte de Oxido de Calcio (CaO). Todo esto se determina por ensayos y prueba de Jarras.

Mezclamos estos dos reactivos y añadimos al tanque con el agua turbia y agitamos hasta homogenizar todo, y luego dejar reposar por unos minutos para que se lleve a cabo la floculación.

Puesta en Operación

Luego de comprobar que todo el sistema se encuentre en óptimas condiciones para desarrollar la prueba, se inicia abriendo la válvula de pase que alimenta el flujo de agua del tanque hacia el equipo, es importante indicar que la válvula se abre en un 25% de su totalidad con la finalidad de que el agua fluya en menor cantidad y transcurra más tiempo desde el inicio hasta la salida del equipo, el tiempo es muy importante debido a que a mayor tiempo de sedimentación o retención, mejores resultados se obtiene y mejor agua clarificada se tendrá.

Verificar la válvula de drenado, ya que si se encuentre bloqueada puede afectar al sistema perdiendo presión.

Durante la operación se debe revisar que no haya algún otro tipo de fuga en las tuberías que se encuentran instaladas.

El tiempo de transición que registramos es de 40 – 45 minutos el cual fue necesario para obtener los resultados que obtuvimos. Luego de ello se recoge el producto en un matraz para la

comparación del agua clarificada con la muestra inicial (agua turbia). Para parar el funcionamiento del sistema simplemente se cierra la válvula de pase al equipo, culminando así la prueba.

Para realizar la limpieza correspondiente al equipo, esta cuenta con dos purgas en ambas cámaras ubicadas en la parte inferior del equipo, el cual nos ayuda a depurar los residuos que se ubicaron en la base interna del mismo, y con agua limpia se inicia la limpieza para una prueba posterior.

4.8. Aspecto de seguridad e higiene industrial.

- Antes de iniciar con las pruebas para con el equipo asegurarse de utilizar los EPP adecuado.
- Antes del manipuleo del reactivo (sulfato de Aluminio), consultar la hoja de seguridad del reactivo para evitar cualquier incidente.
- Realizar limpieza periódica del equipo para mantener la eficiencia inicial.

CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE COSTOS

5.1. Costo de diseño.

Para determinar los costos de diseño, se considera el 15% del costo de los materiales de construcción (Díaz et. al. 1992).

$$\text{Costo de diseño} = \text{S/}. 2944,00 (0,15) = \text{S/}. 441,60$$

5.2. Costo de materiales.

Cuadro 02: Cantidad y costo de materiales

MATERIALES	COSTO UNIDAD S/.	COSTO TOTAL S/.
02 planchas de acero inoxidable de 5/64" espesor (2 mm)	900	1 800
02 docenas de pernos de 5/16 x 1"	28	56
01 metro cuadrado de empaquetadura	100	100
01 tubo de 2" de acero inoxidable	400	400
01 Tubo T de 3/4" PVC	8	8
05 Kg de soldadura inoxidable de 3/32	30	150
05 Kg de soldadura inoxidable de 1/8	25	125
02 válvulas de paso de 2"	50	100
02 válvulas de paso de 3/4"	45	90
01 Teflón, pegamento, entre otros	15	15
01 mallas de acero inoxidable 2 mm (espesor)	100	100
TOTAL		2 944

Fuente: Elaboración propia

5.3. Costo de construcción e instalación.

El costo de la construcción del equipo fue de S/. 900,00

Los costos de instalación representan un 10% de los costos totales de los materiales empleados en la construcción (Díaz, Juan et. al. 1992)

Cotos de instalación = S/. (2944,00 x 0,10) = S/. 294,40

Total, de los costos de construcción e instalación = S/. 1194,40

5.4. Costo de ensayos y pruebas de funcionamientos

El costo estimado para los ensayos y las pruebas de funcionamiento del prototipo es nulo por tratarse de una materia prima abundante en la naturaleza.

5.5. Costos Varios.

Cuadro 03: Costos varios,

MATERIALES	CANTIDAD	COSTO TOTAL S/.
Transporte		50,00
Agua	5,95 m ³	6,00
TOTAL		56,00

Fuente: Elaboración propia

5.6. Costo total.

El costo total presupuestada para este prototipo de equipo es la suma total de todos los costos anteriormente mencionados.

COSTO TOTAL = costo de diseño + costo material + costo de construcción e instalación + costo operación + costos varios.

Costo total = S/. (441,60+ 2 944,00 + 1 194,40 + 56,00)

Costo total = S/. 4 635,60

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Diseño

Construido de Acero inoxidable AISI 304, tiene un sello hermético que cuenta con 16 pernos de 5/16" x 1" en la parte superior, cuenta con entrada y salida de agua de 1" de diámetro. Se empleó de un tanque elevado que permite la circulación de agua en todo el sistema.

Construcción

El equipo consta de dos cámaras, en la primera cámara el agua cruda recibe operaciones de coagulación, floculación y sedimentación, con la finalidad de reducir de los sólidos suspendidos y regulación del pH, y una segunda cámara donde se realiza la operación de filtración donde son retenidas las partículas en suspensión; este equipo tiene 1,10 m de largo, un diámetro de 0,40 m, con una capacidad aproximada de 100 L.

Instalación

El equipo será instalado en el laboratorio de procesos de la Facultad de Ingeniería Química de la U.N.A.P., cuya línea de entrada se conecta a un tanque elevado, al cual proporcionará la muestra a tratar por acción de la gravedad. La versatilidad en este equipo, se cimienta en que el equipo principal que es el clarificador, esta hechas de una sola base desmontable que facilita su acondicionamiento en cualquier lugar que tenga una fluida toma de agua. Y de fácil lavado de los residuos sólidos.

Eficiencia

En nuestro equipo, la turbiedad en el inicio de la prueba es de 11.48 NTU, el agua decantada bajo a 7.58 NTU; el cual comparando con la muestra después de pasar por el equipo registró 4,58 NTU de turbiedad el cual nos indica el mejoramiento significativo en la clarificación.

CONCLUSIONES

- Se diseñó un equipo para la implementación del laboratorio de procesos de la Facultad de Ingeniería Química (F.I.Q.).
- Se efectuaron los cálculos de diseño para la construcción del equipo clarificador horizontal para aguas superficiales en la Amazonia Peruana como se muestra en el capítulo 2, obteniendo especificaciones de 0,40 m de diámetro, 0,80 m de Largo, tubos de 1" para la entrada y salida del agua al clarificador, 2 purgas de 2" de diámetro cada uno.
- Se seleccionó el Acero Inoxidable AISI 304, debido a su elevado nivel de resistencia a la corrosión y a altas temperaturas (hasta 925 °C) en uso continuo, y demás características especificadas en el capítulo 3.1.
- Se construyó en base a los cálculos de diseño realizados en el capítulo 3 y emplearon los materiales seleccionados en el capítulo 3, con especificaciones técnicas de seguridad, para garantizar un óptimo funcionamiento del equipo durante su operación.
- Se determinó los parámetros adecuados de operación y funcionamiento del equipo, como se muestran en el capítulo 4.4.
- Se elaboró el manual de instrucción de funcionamiento del equipo como se muestra en el capítulo 4.5.

RECOMENDACIONES

Durante la operación:

- Verifique que no existan fugas de agua en el sistema para evitar mayores pérdidas de presión y garantizar un óptimo funcionamiento del clarificador.
- Utilizar siempre los equipos de protección adecuados para la operación, ya que se trabaja con superficies y fluidos a elevadas temperaturas.
- Accionar la válvula de alimentación al equipo en un 20% de su totalidad para obtener resultados óptimos.

Para el Equipo:

- Instalar equipos de medición digitales, tales como manómetros, termocuplas, etc.
- El Equipo es un clarificador, por ello es sujeto a optimización y automatización, para los distintos usos a los que se puede aplicar, y su posible utilización y buen desempeño con agua residual.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. APHA - AWWA - WPCF- "Métodos Normalizados para el análisis de aguas Potables y residuales". Ediciones de santos, S.A.180-200pp.
2. Curso: "Control de calidad del agua, efluentes y tecnologías de potabilización". OMEGA PERÚ S.A. y el Instituto del agua y Medio Ambiente 2002.
3. Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York "Manual de tratamiento de aguas negras". Editorial Linuesa Wiley S.A. México, 1965.
4. GARCÍA BROGE, Antonio. "Calidad y tratamiento del agua" Editorial McGraw - Hill Interamericana de España S.A.U. Pag. 159 - 200.
5. NORDEL ESKEL. "Tratamiento de agua para industria y otros usos". Editorial CECSA. México, 1965.
6. MATTHEWS B.F.J. "Tratamiento de aguas". Editorial Dossat S.A. Madrid, 1958.
7. ROMERO ROJAS, Jairo Alberto "Potabilización del agua". Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Pag. 283 — 300.
8. PISANGO F.; TUNJAR G.; VASQUEZ G.; "Diseño, construcción e instalación de un equipo para tratamiento de agua potable (unidad de flujo ascendente) en la facultad de Ingeniería Química (Tesis ingeniero químico), Iquitos, Perú: UNAP, 2010. 146 pp.
9. ASCE, AWWA, CSSE, "Water Treatment Plant Design", 1940 y 1969.
10. Sánchez M.H., "Ingeniería de acueductos y tratamiento de aguas", U.N., 1970.
11. AWWA, "Tratamiento y Calidad del Agua", McGraw Hill Co., 1971.
12. Rich L.G., "Unit Operations of Sanitary Engineering", Wiley, 1969.
13. U.S.E.P.A., "Process Design Manual for Suspended Solids Removal", Office of Technology Transfer, Washington D.C., 1975.

14. Kawamura S., "Hydraulic scale - model simulation of the sedimentation process", J. AWWA, vol. 73, p. 372, julio 1981.
15. CEPIS, "Tecnología de tratamiento de agua para países en desarrollo", 1977.
16. Culp G., Hansen S., Richardson G., "High - Rate Sedimentation in Water Treatment Works", J. AWWA, vol. 60, No. 6, junio 1968.
17. Committee Report, "Viruses in Water", J. AWWA, vol. 61, No. 10, octubre 1969.
18. Culp G.L. Culp R.L., "New Concepts in Water Purification", Van Nostrand Reinhold Co., 1974.
19. McCormick, R.F., King P.H., "Factors that affect use of direct filtration in treating surface waters", J. AWWA, vol. 74, p. 234, mayo 1982.
20. INSFOPAL, "Especificaciones para el diseño de plantas potabilizadoras de agua", agosto 1970.
21. Committee of the Great lakes, Upper Mississippi River Board of State Sanitary Engineers, "Recommended Standards for Water Works H.E.S.", Albany, N. Y., 1976.
22. Arboleda J., "Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua". Serie Técnica No. 13, CEPIS, 1981.
23. Camp T.R., "Sedimentation and the Design of Settling Tanks", ASCE Transaction, vol. 111, 1946.
24. Steel E.W., "Water Supply and Sewerage", McGraw Hill, 4a. ed. 1960.
25. Metcalf y Eddy, Inc., "Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse", McGraw Hill, 1979.
26. Fair G.M., Geyer J.C., "Water Supply and Waste Water Disposal", Wiley, 1954.
27. Hudson H.E., "Water Clarification Processes, Practical Design and Evaluation", Van Nostrand Reinhold Co., 1981.

28. Montgomery J.M., Consulting Engineers, Inc., "Water Treatment Principles and Design", Wilcy, 1985.
29. Hardenbergh W. A. y Rodie E.R., "Water Supply and Waste Disposal", International Textbook Co., 1961.
30. Arboleda V.J., "Teoría y práctica de la purificación del agua", Acodal, 1992.
31. Barret, M. J., Gameson, A. I. H. y Ogden, C. G., Aeration Studies at Four Wair Systems, Water and Water Engineering, sept. 1960.
32. Sanks R. L., "Water Treatment Plant Design", Ann Arbor Science, 1980.
33. Smethurst G., "Basic Water Treatment", Thomas Telford Ltda., 1979.
34. AWWA, Water treatment, 1984.
35. Cleasby J.L., Baumann E.R., Wastewater Filtration, E.P.A., 1977.
36. Hernando Bernal Zamudio, El agua de la amazonia: recurso estratégico para la comunidad sudamericana de naciones (casa) en el siglo XXI. Investigación de Doctorado del programa: Globalización, Desarrollo y Cooperación Internacional. Universidad del País Vasco.

ANEXOS

Cuadro 04: Resultados de las muestras.

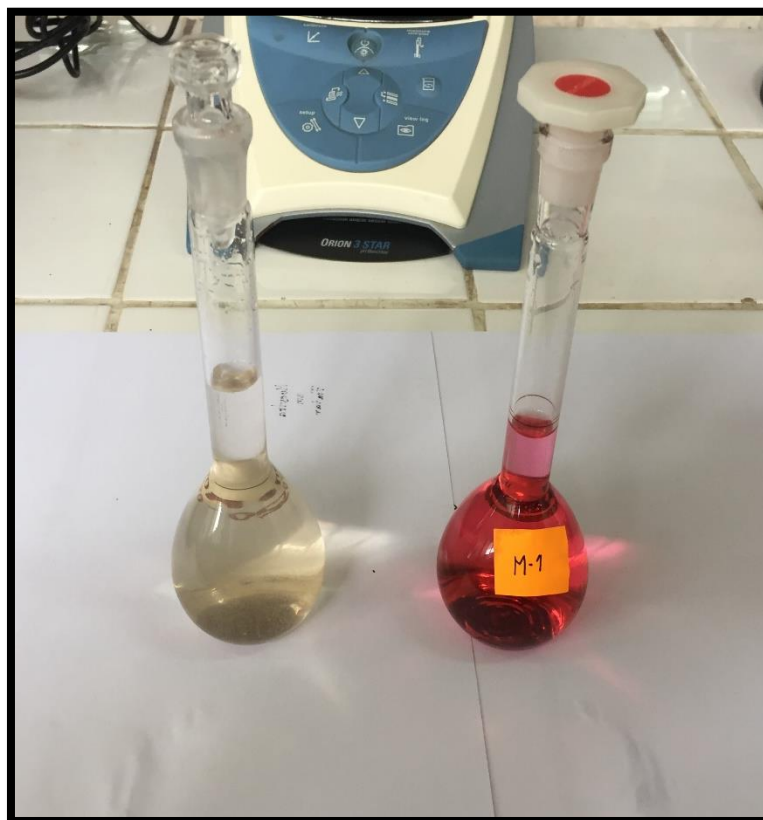
	Muestra 1	Muestra 2
pH	6.64	6.51
Turbiedad (NTU)	7.58	4.58
Alcalinidad (ppm)	2	1
Conductividad (μ S)	37,2	57.5
Aluminio (Al)	0.325	0.198

Fuente: Elaboración propia.

Muestra 1: Muestra antes de agregar el coagulante.

Muestra 2: Muestra luego de pasar por el equipo.

Fig. 31: Imagen de la muestra 1



Fuente: Elaboración propia.

Fig. 32: Imagen de la muestra 2



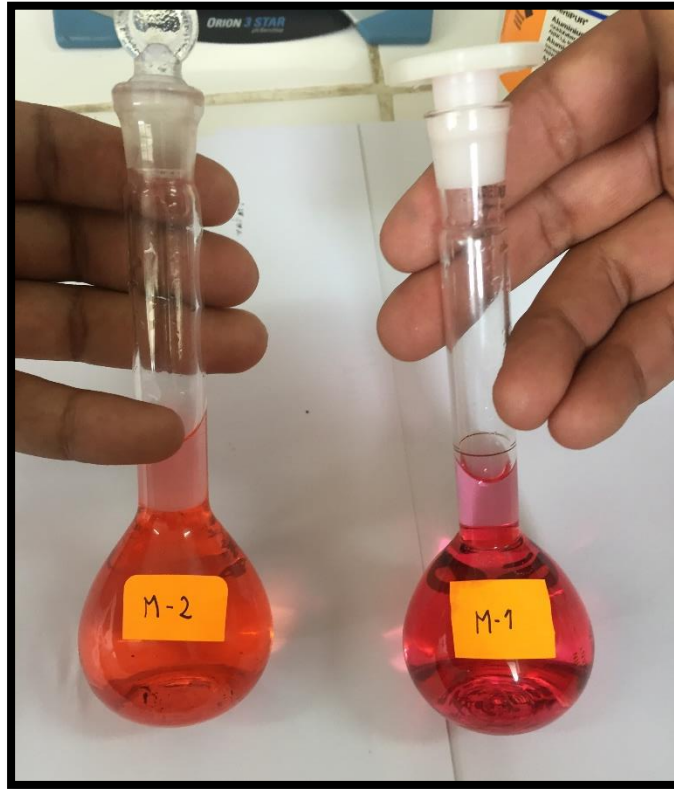
Fuente: Elaboración propia.

Fig. 33: Imagen comparativa de las muestras 1 y 2



Fuente: Elaboración propia.

Fig. 34: coloración final en las muestras 1 y 2



Fuente: Elaboración propia.

Fig. 35: Medición de conductividad de las muestras.



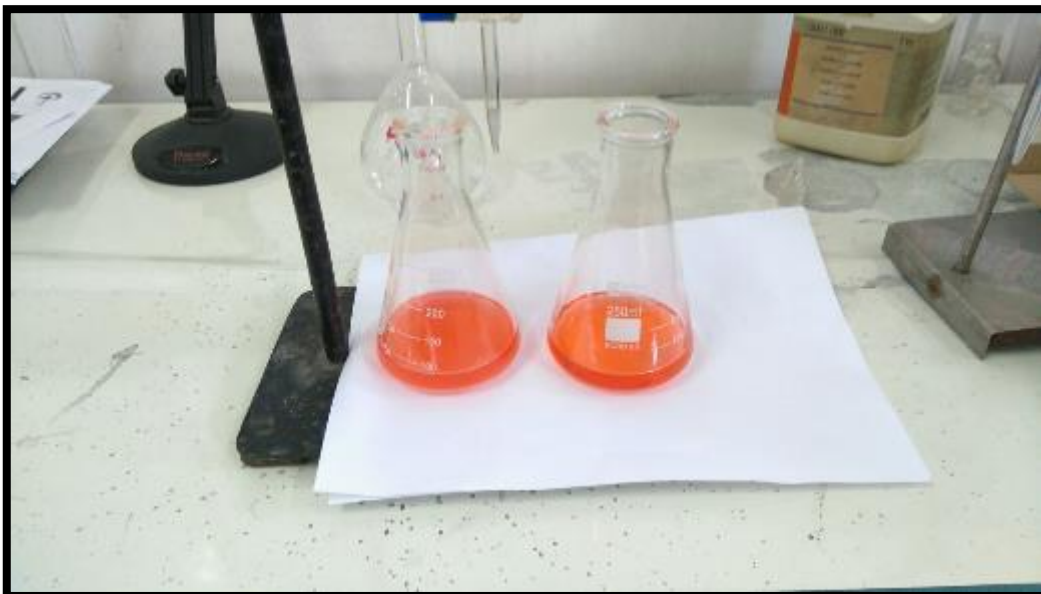
Fuente: Elaboración propia.

Fig. 36: Medición de pH de las muestras.



Fuente: Elaboración propia.

Fig. 37: Determinación de alcalinidad de las muestras.



Fuente: Elaboración propia.

Fig. 38n: Medición de turbiedad de las muestras.



Fuente: Elaboración propia.

CONSTANCIA DE ANÁLISIS N° 01



E.P.S. SEDALORETO S.A.
OFICINA DE CONTROL DE CALIDAD

CONSTANCIA DE ANÁLISIS N° 081-2016


A: Sandro Humberto Mendoza Ruiz
Tipo de Muestra: Agua Decantada.
Procedencia de la Muestra: Equipo Clarificador de tubo horizontal.
Solicitud de Análisis: PROVEIDO N° 2544-2016- EPS SEDALORETO S.A-GO
Fecha de Recepción: 28/09/2016
Referencia: Muestra tomada por el encargado.

Fecha de muestreo: 28/09/16 Hora: 09:00 hrs.

Parámetros	Método Utilizado	Resultado	Unidad	Fecha de Análisis
Turbiedad	Nefelométrico	7.58	U.N.T.	28-sep-16
pH	Potenciométrico	6.64	Unidad de pH	28-sep-16
Aluminio	Espectrofotométrico	0.325	mg/L Al	28-sep-16

Determinación	Equipo Utilizado	Referencia del método
Turbiedad	Turbidímetro 2100 AN HACH	Nefelométrico
pH	ORION 3 STAR - THERMO SCIENTIFIC	Potenciométrico
Aluminio	Espectrofotómetro PHARO 300 MERCK	Espectrofotométrico

Iquitos, 28 de setiembre del 2016.


Ing. Ray C. Flores Garcia
CIP N° 179248
Jefe Oficina Control de Calidad
EPS SEDALORETO S.A.

CONSTANCIA DE ANÁLISIS N° 02



E.P.S. SEDALORETO S.A.
OFICINA DE CONTROL DE CALIDAD

CONSTANCIA DE ANÁLISIS N° 082-2016


A: Sandro Humberto Mendoza Ruiz
Tipo de Muestra: Agua Filtrada
Procedencia de la Muestra: Equipo Clarificador de tubo horizontal.
Solicitud de Análisis: PROVEIDO N° 2544-2016- EPS SEDALORETO S.A.-GO
Fecha de Recepción: 28/09/2016
Referencia: Muestra tomada por el encargado.

Fecha de muestreo: 28/09/16 Hora: 09:00 hrs.

Parámetros	Método Utilizado	Resultado	Unidad	Fecha de Análisis
Turbiedad	Nefelométrico	4.58	U.N.T.	28-sep-16
pH	Potenciométrico	6.51	Unidad de pH	28-sep-16
Aluminio	Espectrofotométrico	0.198	mg/L Al	28-sep-16

Determinación	Equipo Utilizado	Referencia del método
Turbiedad	Turbidímetro 2100 AN HACH	Nefelométrico
pH	ORION 3 STAR - THERMO SCIENTIFIC	Potenciométrico
Aluminio	Espectrofotómetro PHARO 300 MERCK	Espectrofotométrico

Iquitos, 28 de setiembre del 2016.


Ing. Ray C. Fierres García
CIP N° 479248
Jefe Oficina de Control de Calidad
EPS SEDALORETO S.A.