

2ej.
80



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

DETERMINACION Y SELECCION DE LOS PARAMETROS FISICO - QUIMICOS OPTIMOS PARA EL PROCESO DE COAGULACION - FLOCULACION DE LA PLANTA POTABILIZADORA PILOTO 'NECAXA'

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A
MIGUEL ANGEL SANCHEZ CRUZ



CIUDAD UNIVERSITARIA D. F., 1986



EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE GENERAL

CAPITULO	PAGINA
I. INTRODUCCION	1
II. GENERALIDADES	4
III. CARACTERISTICAS GENERALES DE LA PLANTA PILOTO	12
III.1 Descripción del Sistema Piloto	12
III.2 Descripción de los Subsistemas del Proceso	16
IV. CARACTERISTICAS GENERALES DE OPERACION DE LA PLANTA PILOTO	27
IV.1 Intervalos de Operación de los Subsistemas	28
IV.2 Principales Opciones de Operación	31
IV.3 Registro de los Procesos	45
V. ENSAYOS DE PRUEBA DE JARRAS	50
V.1 Obtención de la Ecuación de Dosificación Optima de Coagulante	66
V.2 Determinación del Intervalo de pH Optimo de Coagulación	83
V.3 Importancia de los Polielectrolitos en la Coagulación	92
V.4 Determinación de la Concentración Optima de Coagulante	96
V.5 Determinación y Obtención de la Ecuación de los Parámetros Físicos Optimos "G" y "T" de Flocculación	109

CAPITULO	PAGINA
VI. SELECCION DE LOS PARAMETROS FISICO-QUIMICOS OPTIMOS PARA EL PROCESO DE COAGULACION-FLOCULACION	131
VI.1 Tabulación de los Parámetros Físico-Químicos Óptimos Seleccionados	137
VI.2 Experimentos de Laboratorio Propuestos para Determinación de Parámetros Físico-Químicos del Proceso de Coagulación-Floculación	138
VII. CONCLUSIONES	143
VIII. BIBLIOGRAFIA	146

I. INTRODUCCION

El gran crecimiento demográfico, la intensa urbanización y el desarrollo del proceso de industrialización en la Cd. de México, están agudizando cada vez más el problema de abastecimiento de agua potable, así como la evacuación de las aguas residuales y su tratamiento.

El tratamiento de agua, tiene por finalidad producir los cambios necesarios para condicionarla y satisfacer las necesidades de la población, así como para el desarrollo y supervivencia de la flora y fauna, en función directa de las normas establecidas.

El uso del agua en la Industria Química, Metalúrgica, Alimenticia, etc., es muy variado, en toda una serie de procesos es utilizada como materia prima, sustancia reaccionante y como disolvente de sustancia sólidas, líquidas y gaseosas. En cantidades mayores es usada como agente transmisor de calor en los procesos endotérmicos y exotérmicos.

De ahí la importancia que presenta el tratamiento del agua para producir los cambios físicos, químicos y biológicos, antes y después de ser utilizada.

Es importante mencionar que, dependiendo del tipo de uso y las características de la fuente y de sus derivaciones en el tiempo, se realice un adecuado tratamiento de agua.

La Comisión de Aguas del Valle de México (CAVM), decidió iniciar un Estudio de Alternativas de Tratamiento de las Aguas que se captarán en la Cuenca Alta del Río Tocolutla para el abastecimiento de la Cd. de México, que es una de las poblaciones más afectadas debido precisamente al incremento demográfico, crecimiento urbano y al proceso de industrialización.

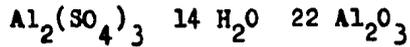
Para tal efecto fue, diseñada y construida una Planta Potabilizadora Piloto, con capacidad para tratar un gasto de, $Q = 2$ litros/segundo (lt/seg) que ofrece las características necesarias para estudiar la potabilización de las aguas superficiales que serán captadas en la presa "Necaxa", (1a. etapa), localizada dentro de la zona propiedad de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en el cauce del río Tocolutla.

Con esta planta piloto, se podrán obtener criterios básicos para el diseño de la Planta Prototipo del Sistema Tocolutla con capacidad para tratar $Q = 15$ metros cúbicos/segundo (m^3/seg). Sistema programado a futuro para el abastecimiento de agua a la Cd. de México.

Para la realización de la Tesis, se especifican tanto las características generales como de operación de la planta piloto, así como el desarrollo y resultados de los Ensayos de "Prueba de Jarras" realizados en el laboratorio de la planta.

Estos resultados nos conducirán a obtener la determinación y

selección de los parámetros físico-químicos óptimos para el proceso de coagulación-floculación de la planta en función directa de las características presentadas por el agua cruda de la presa "Necaxa", y del coagulante metálico (sulfato de aluminio):



Dentro del contenido de la tesis, se plantean como objetivo de aprendizaje e investigación, una serie de experimentos complementarios para determinar a nivel de laboratorio los principales parámetros físico-químicos, para aumentar la eficiencia del proceso coagulación-floculación.

El laboratorio de la planta piloto, cuenta con el equipo, reactivos y cristalería necesarios para la realización de los Ensayos de "Prueba de Jarras" y demás análisis de potabilización.

II. GENERALIDADES

La tecnología del agua dejó de ser un conjunto de reglas empíricas, y es hoy en día una ciencia multidisciplinaria con teorías básicas que explican la complejidad de los procesos analizados en el tratamiento del agua.

Las características o impurezas del agua están sujetas a cambios constantes, que pueden ser debidas a condiciones naturales (lluvias, sequías, calidad mineral de los diferentes terrenos por los cuales circula, etc.), alteraciones producidas por el hombre (descargas de efluentes industriales en los ríos, lagos, mares, etc., así como descargas de desechos domésticos, entre otros), y la proliferación de microorganismos patógenos que traen como consecuencia grandes cambios en las características del agua.

Las plantas de tratamiento de agua, en general pueden considerarse como grandes fábricas que reciben una materia prima cambiante (agua cruda) que tienen que procesar para entregar un producto manufacturado (agua tratada), y que tiene que cumplir con las normas establecidas para sus diferentes usos.

El tratamiento del agua es un conjunto de operaciones unitarias que aseguran su clarificación, eliminando las impurezas que se encuentran en ella, ya sea en estado molecular-disuelto, coloidal o suspendido.

Los procesos básicos de tratamiento de agua, pueden dividirse en cuatro grupos:

1. Proceso de clarificación.
2. Proceso de desinfección.
3. Proceso de acondicionamiento químico, y
4. Proceso de acondicionamiento organoléptico.

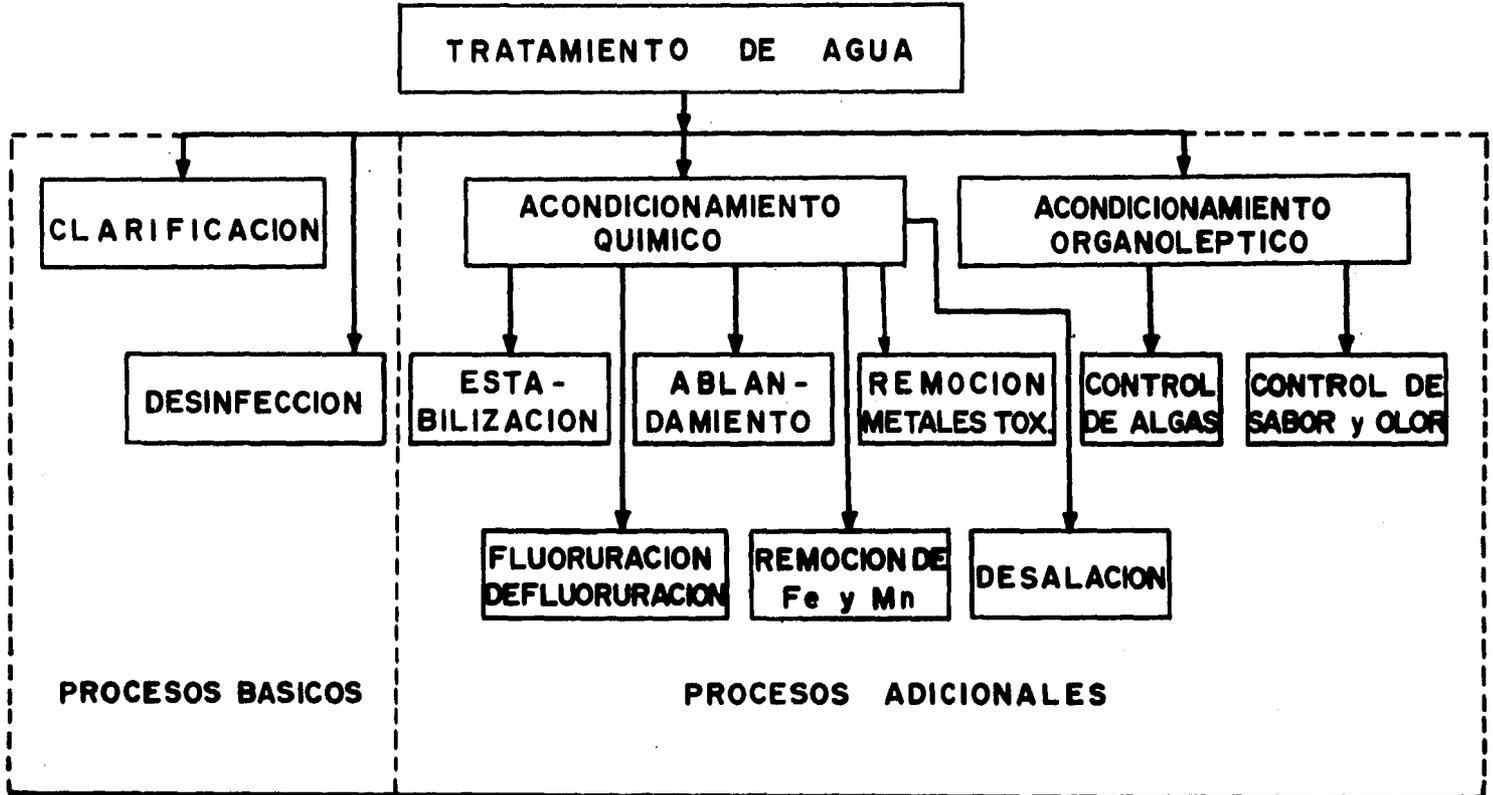
La tabla II-1, presenta una Descripción Esquemática de los Procesos del Tratamiento de Agua.

El proceso de desinfección elimina los organismos infecciosos, como son bacterias patógenas, virus, etc. Se considera la desinfección como único tratamiento en aquellas aguas donde las características físicoquímicas y bacteriológicas están dentro de las normas de calidad o cuando se les quiere prevenir contra las contaminaciones que se pueden originar después de su captación. Se establecerá la desinfección, por lo general, aplicando cloro (hipocloritos), para los casos en que el estudio económico comparativo con cloro líquido le sea más favorable.

El proceso de acondicionamiento químico, elimina las sustancias o iones químicos, ya sea por tres razones; económicas (sales de calcio, hierro y manganeso), de salud (fluor), o de estabilización (pH).

TABLA II - I

DESCRIPCION ESQUEMATICA DE LOS PROCESOS DEL TRATAMIENTO DE AGUA



En el proceso de acondicionamiento organoléptico, se realiza la remoción de olores del agua en la actividad biológica de las algas y otros microorganismos, se puede hacer con efectividad dosificando sulfato de cobre en la fuente de abastecimiento, inhibiendo cualquier desarrollo de algas. Los olores y sabores producidos por los gases disueltos en el agua, se eliminan por aereación. La presencia de sustancias aromáticas y de materia orgánica se elimina con la aplicación de carbón activado (conjuntamente con coagulación, sedimentación y filtración).

El trabajo del Ingeniero Químico, implica la selección de las operaciones unitarias en orden adecuado, para formular un proceso que tienda a llevar a efecto una operación de manufactura química, una separación o una purificación. En vista de que cada una de estas operaciones están sujetas a variaciones el Ingeniero Químico debe de especificar la condición exacta bajo la cual debe llevarse a efecto cada operación unitaria.

Todos los procesos se basan en principios científicos traducidos a realidades y aplicaciones industriales en los diversos campos de la ingeniería.

Los fenómenos que se presentan en tratamiento de agua son de naturaleza física y química, por lo que son susceptibles de ser reproducidos aplicando principios de "similitud", teoría que establece tanto las condiciones bajo las cuales dos sistemas o procesos separados pueden ser considerados como similares, así

como estudia las técnicas de predicción del comportamiento de un sistema basado en las observaciones del otro.

Tanto los reactores (floculadores, sedimentadores, filtros, etc.) utilizados en tratamiento de agua, como las reacciones químicas y/o fenómenos físicos que se producen para obtener los criterios de diseño, para establecer modificaciones a los prototipos y/o determinar las condiciones químicas de operación, son susceptibles de ser reproducidos.

Una de las técnicas más utilizadas y de mayor confiabilidad en el tratamiento de agua, que aplica el principio de "similitud" es el Ensayo de "Prueba de Jarras", técnica mediante la cual es posible obtener los parámetros físicos óptimos de floculación y los parámetros químicos óptimos de coagulación, como sucede en la Planta Potabilizadora Piloto "Necaxa".

En el proceso de coagulación-floculación las partículas se aglutinan en pequeñas masas con peso específico superior al del agua, llamadas flóculos.

El proceso se utiliza para:

- a. Remoción de turbiedad orgánica o inorgánica que no puede ser sedimentada rápidamente.
- b. Remoción de color verdadero y aparente.
- c. Eliminación de bacterias, virus y organismos patógenos susceptibles de ser separados por coagulación.
- d. Destrucción de algas y plancton en general.

e. Eliminación de sustancias productoras de sabor y olor en algunos casos y de precipitados químicos en otros.

Los aspectos fundamentales en la coagulación-floculación son:

1. Desestabilización de las partículas suspendidas, es decir, remoción de las fuerzas que las mantienen separadas.
2. Transporte de las partículas dentro del líquido para que hagan contacto, generalmente estableciendo puentes entre sí y formando una malla tridimensional de coágulos porosos.

Al primer aspecto suele referirse como coagulación y al segundo como floculación.

La coagulación comienza en el mismo instante en que se agregan los coagulantes al agua y perdura solamente fracciones de segundos. Básicamente consiste en una serie de reacciones físicas y químicas, entre los coagulantes, la superficie de las partículas, la alcalinidad del agua, en el mismo seno del líquido.

La floculación es el fenómeno por el cual las partículas ya desestabilizadas chocan unas contra otras para formar coágulos mayores.

Dos modelos explican el primer aspecto: el de la doble capa, basado en las fuerzas electrostáticas de atracción y repulsión; y el del puente químico que establece una relación de dependencia entre las fuerzas químicas y la superficie de los coloides. En el segundo aspecto, debe distinguirse entre

floculación ortocinética y floculación pericínética.

La floculación ortocinética es la inducida por la energía comunicada al líquido por fuerzas externas (paletas giratorias).

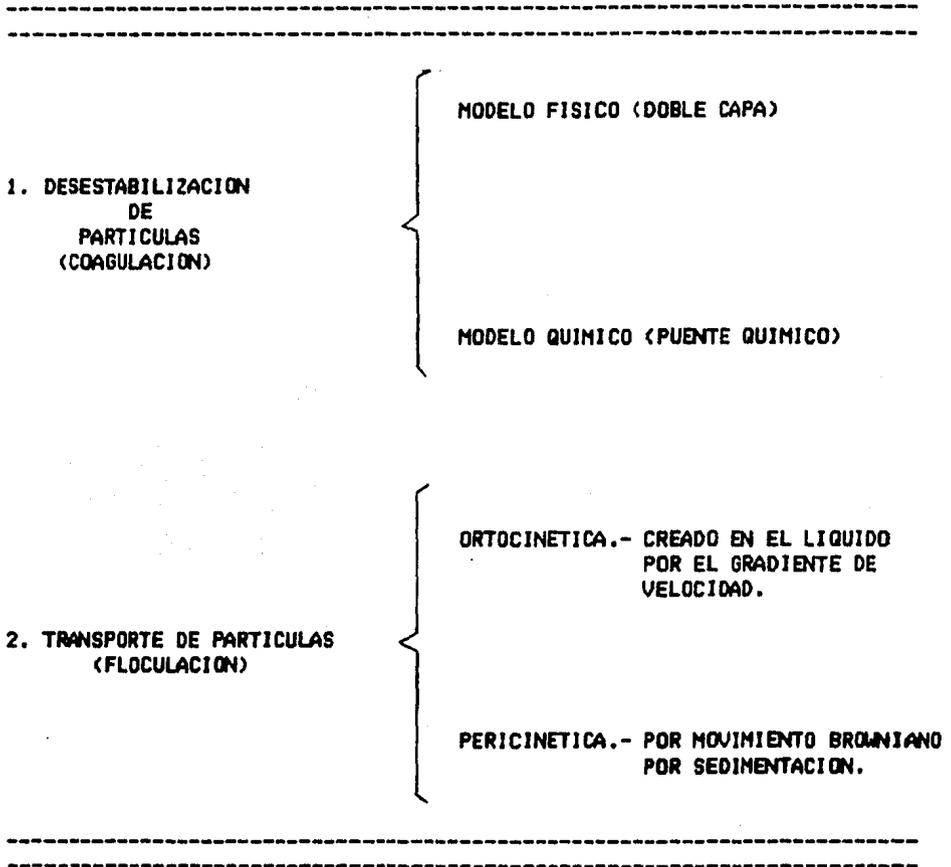
La floculación pericínética es la provocada internamente dentro del líquido, por el movimiento de agitación que las partículas tienen dentro de aquel (movimiento browniano) y por la gravedad o peso de las partículas que al caer tienen que aglomerarse, y se realiza en un tiempo muy corto después de la desestabilización de las partículas.

En las plantas de tratamiento, la floculación es tanto ortocinética como pericínética.

La tabla II-2, muestra el Cuadro Sinóptico del Proceso de Coagulación-Floculación.

TABLA II-2

CUADRO SINOPTICO DEL PROCESO DE COAGULACION-FLOCULACION



COAGULAR VIENE DEL LATIN "COAGULARE", SIGNIFICA AGLUTINAR (DESESTABILIZACION DE MATERIA, PARTICULAS O SOLIDOS QUE PUEDA CONTENER EN SUSPENSION Y/O SOLUCION EL AGUA).

FLOCULAR DE "FLOCULARE", SIGNIFICA HACER UN FLOCULO (FAVORECER LA FORMACION DE PARTICULAS DESESTABILIZADAS POR COAGULACION, CON SUFICIENTE TAMAÑO Y PESO PARA QUE PUEDA SER SEDIMENTADO FACILMENTE).

III. CARACTERISTICAS GENERALES DE LA PLANTA PILOTO

La Planta Potabilizadora Piloto "Necaxa" (Figura III-1), está dividida en dos conjuntos principales, el primero formado por el sistema experimental de potabilización y el segundo por las instalaciones auxiliares: laboratorio, oficina, almacén, vigilancia y sanitarios. La figura III-2, muestra la vista posterior de los dos conjuntos principales.

Todas las instalaciones fueron diseñadas con elementos recuperables que hacen posible su traslado a otros sitios donde se pueda realizar experimentación del agua.

III.1 DESCRIPCION DEL SISTEMA PILOTO.

La potabilización tiene como objetivo principal acondicionar la calidad del agua, para garantizar la salud de la población al consumirla en sus diferentes usos. Las fuentes comunes de abastecimiento son: manantiales, agua subterránea, agua de lluvia y superficiales (lagos, ríos, embalses, etc.). A los dos primeros se les puede tratar solamente mediante un proceso de desinfección para lograr las características que norman el "agua potable"; en cambio al agua superficial se debe aplicar uno ó más de las operaciones unitarias de tratamiento para alcanzar la calidad requerida.

Estos procesos son los que conforman la mayoría de los sistemas denominados convencionales de potabilización.

FIGURA III-1

PLANTA POTABILIZADORA PILOTO "NECAXA"

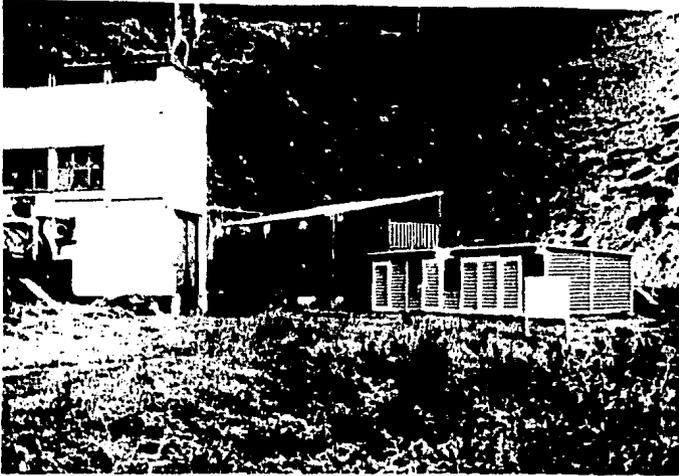
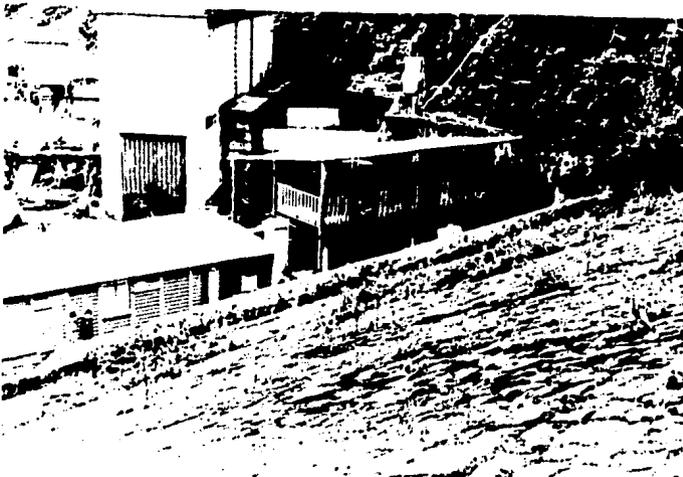


FIGURA III-2

CONJUNTOS PRINCIPALES

SISTEMA EXPERIMENTAL DE POTABILIZACION

INSTALACIONES AUXILIARES



La Planta Potabilizadora Piloto "Necaxa", está diseñada para experimentar con caudales variables entre 1 - 2 lt/seg, y operar los procesos convencionales con flexibilidad.

Los elementos del sistema y su interconexión permiten estudiar una amplia gama de alternativas de tratamiento, con el objetivo básico de que en un corto plazo se puedan definir criterios para el diseño de la planta prototipo. Posteriormente, el sistema piloto podrá utilizarse para el monitoreo de la operación de la potabilizadora.

El sistema de tratamiento de la planta piloto, se divide en tres subsistemas los cuales se representan en el Diagrama Funcional de la figura III-3.

III.1.1 Subsistema de Alimentación.

Se compone de:

- Línea de conducción para alimentar la planta
- Tanque de carga constante
- Tanque de homogenización y acondicionamiento
- Serie de dosificadores de reactivos químicos

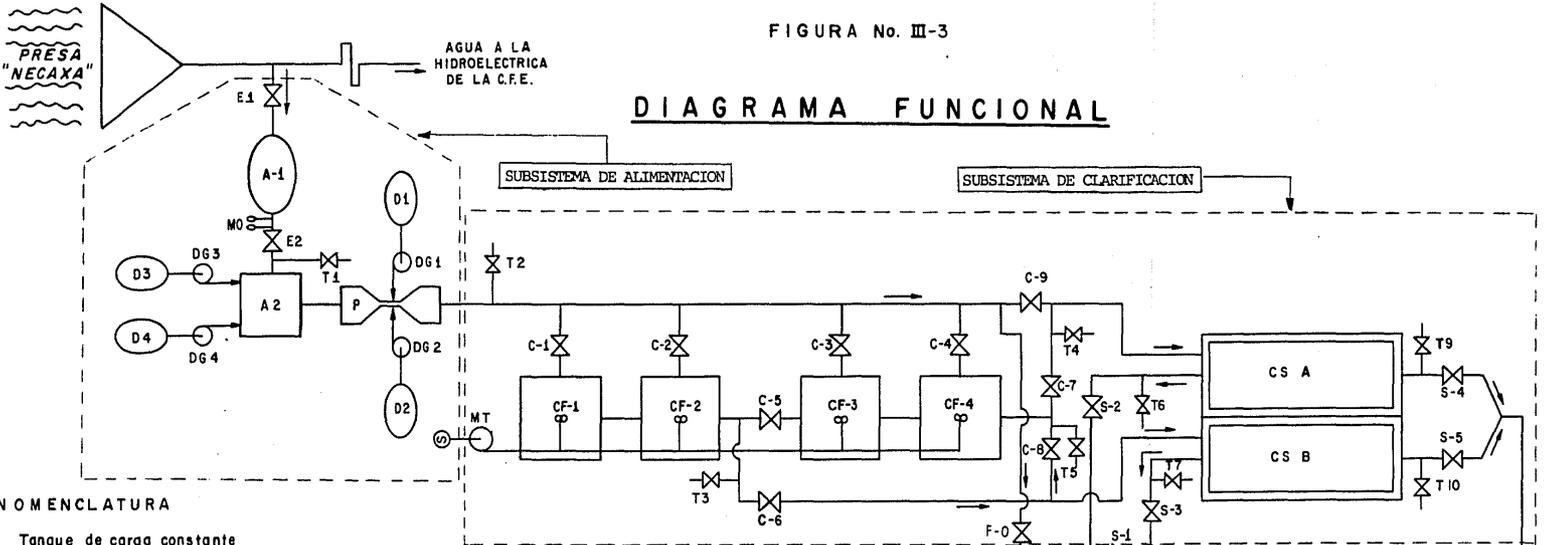
III.1.2 Subsistema de Clarificación.

Está formado por:

- Serie de cuatro floculadores interconectados de tal manera que pueden operarse de uno en uno, en serie y/o paralelo
- Dos sedimentadores de alta velocidad (tasa) diseñados para operar con placas paralelas

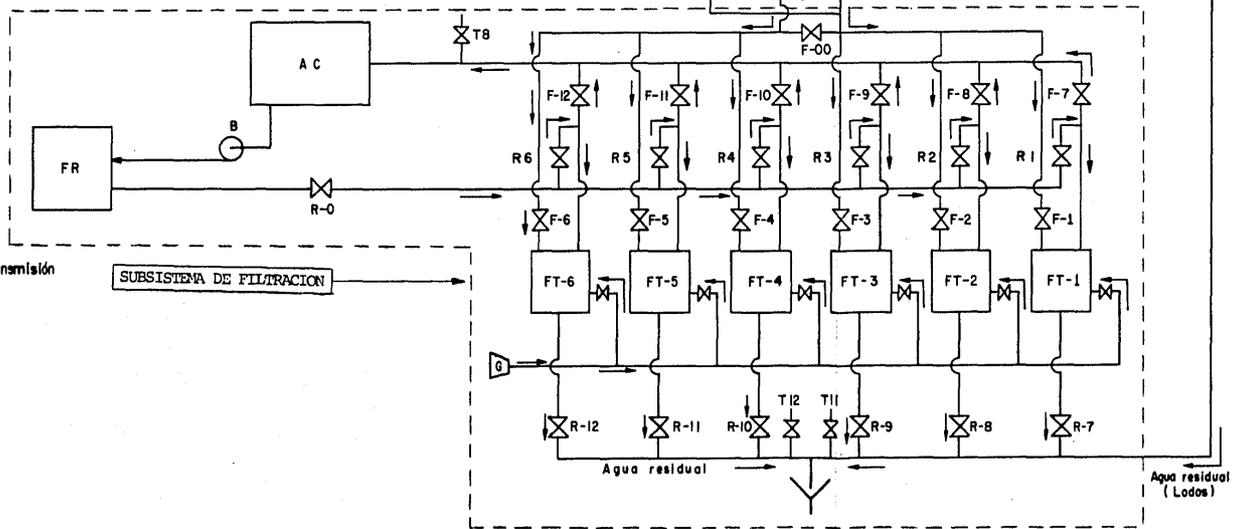
FIGURA No. III-3

DIAGRAMA FUNCIONAL



NOMENCLATURA

- A1 Tanque de carga constante
- A2 Tanque de homogenización y acond.
- AC Tanque de aguas claras
- B Bomba
- CF Flocculador
- CS Sedimentador
- D1 Dosificador de sulfato de aluminio
- D2 Dosificador de polielectrolito
- D3 Dosificador de cal
- D4 Dosificador de hipoclorito de sodio
- DG Bomba dosificadora graduable
- FR Tanque de retr lavado
- FT Filtros
- G Compresora
- MT Motoreductor acoplado a flecha de transmisión
- MO Medidor de orificio calibrado
- P Medidor parshall
- T Hidrotomas (Toma de muestras)
- ∩ Vddivulas



La figura III-4, presenta una vista posterior de los Subsistemas de Alimentación y Clarificación.

III.1.3 Subsistema de Filtración.

Se integra por:

- Seis filtros dispuestos en dos baterías de tres, que pueden ser empacados con diferentes medios filtrantes
- Tanque de aguas claras (tratadas)
- Tanque para agua de retrolavado

III.2 DESCRIPCIÓN DE LOS SUBSISTEMAS DEL PROCESO.

III.2.1 Subsistema de Alimentación.

III.2.1.1 Obra de Toma (válvula E-1)

El agua se capta de una tubería que proviene directamente de la presa "Necaxa", se toma de la tubería de baja presión que conduce agua para la hidroeléctrica de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), la conexión se realiza mediante una "tee" de tubería y una válvula de paso que alimentan a través de una tubería de 70 m de longitud (diámetro 1" - 1 1/2") al tanque de carga constante.

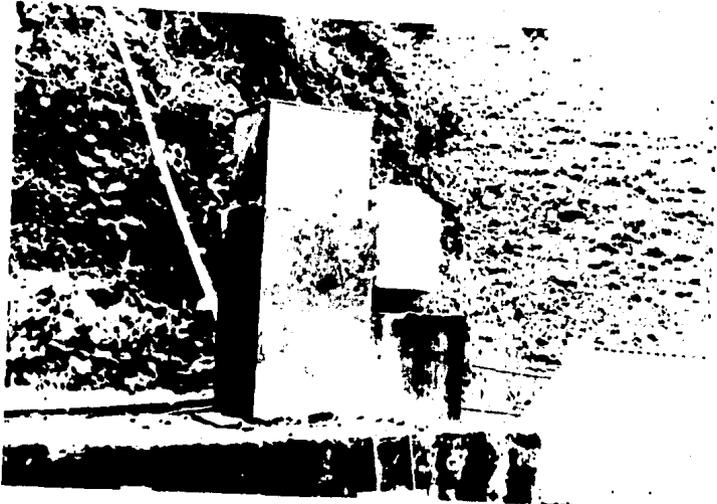
III.2.1.2 Tanque de Carga Constante (tanque A-1)

Es un tanque de asbesto-cemento de 600 lt de capacidad, con flotador mecánico de aguja, que sirve de control para mantener una carga constante de alimentación del sistema. Figura III-5.

FIGURA III-4
VISTA POSTERIOR DE LOS SUBSISTEMAS DE
ALIMENTACION Y CLARIFICACION



FIGURA III-5
TANQUE DE CARGA CONSTANTE Y RETROLAVADO



III.2.1.3 Tanque de Homogenización y Acondicionamiento

(válvula E-2, tanque A-3).

Es un recipiente de fibra de vidrio de sección cuadrada de 0.5 x 0.5 m y 0.6 m de altura. La entrada de agua que proviene del tanque de carga constante, está constituida por dos boquillas que descargan con una velocidad de 5 m/seg, suficiente para una primera mezcla y homogenización del agua con algún reactivo. El caudal de entrada se controla con la válvula de alimentación (E-2), y se afora con el medidor de orificio calibrado (MO), colocado antes de la válvula (E-2).

III.2.1.4 Medidor Parshall (P).

Esta unidad cumple con el propósito principal de efectuar la mezcla hidráulica de los reactivos sobre el agua y permite probar a escala un elemento del prototipo que podrá ser utilizado para aforar el caudal de alimentación. La figura III-6, muestra este dispositivo hidráulico.

III.2.1.5 Dosificadores (D-1 a D-4 y DG-1 a DG-4).

El sistema cuenta con una serie de dosificadores graduables DG-1 a DG-4 (ver figura III-7), que proporcionan el gasto necesario de cada uno de los reactivos químicos que han de inyectarse. Funcionan mediante bombas dosificadoras de émbolo con motor eléctrico de velocidad variable que se alimentan desde los tanques dosificadores D-1 a D-4 que contienen la solución del reactivo previamente preparada. En el diagrama funcional de la figura III-3, se representan los puntos de aplicación de los reactivos en la planta de tratamiento.

FIGURA III-6
MEDIDOR PARSHALL



FIGURA III-7
SERIE DE DOSIFICADORES GRADUABLES



III.2.2 Subsistema de Clarificación.

III.2.2.1 Floculadores

(tanques CF-1 a CF-4; válvulas C-1 a C-8).

La floculación está compuesta de cuatro tanques de fibra de vidrio rectangulares (figura III-8), con deflectores para evitar el vórtice (remolino formado), y un agitador mecánico que permite obtener gradientes de 20 a 70 $1/\text{segundo}$ (seg^{-1}) para cada floculador (figura III-9). Tienen una sección de 0.85 x 0.85 m de base por 1.35 m de altura. Esto permitirá operar con tiempos totales de retención de 4 a 6 minutos en cada floculador, para obtener tiempos totales entre 16 y 24 minutos, trabajando el tren completo de floculadores. La agitación es mecánica a través de un moto-reductor acoplado y una flecha con cuatro transmisiones de banda-polea a una flecha vertical para cada floculador. Este sistema de agitación permite obtener velocidades variables, mediante el ajuste de las poleas. La altura del rotor-agitador se puede variar para lograr la variación de los gradientes con distintos tiempos de retención.

La alimentación del agua proviene del medidor Parshall, se distribuye individualmente a cada uno de los floculadores, y se controla mediante válvulas C-1 a C-4. Los reactores floculadores se encuentran interconectados entre sí y tienen dos salidas para trabajar el gasto por medio de uno o más tanques en forma independiente. El sistema de tuberías cuenta con un "by-pass" (recirculación) para repartir el caudal del agua en forma directa al sistema de filtros rápidos para experimentar el proceso de filtración directa (válvula C-9).

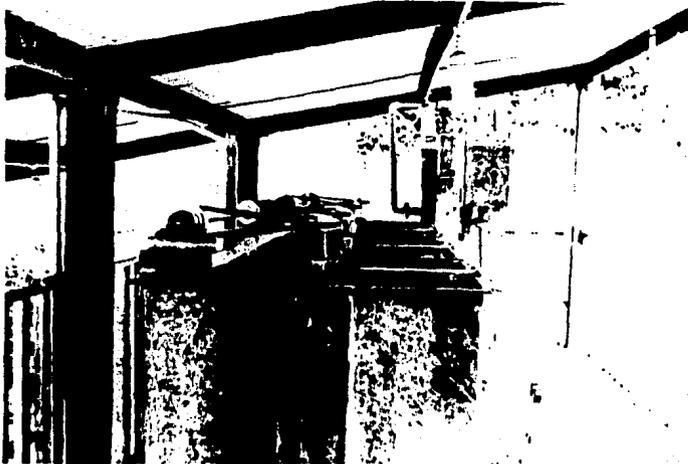
FIGURA III-8

TREN COMPLETO DE FLOCULADORES



FIGURA III-9

SISTEMA DE AGITACION DE FLOCULADORES



III.2.2.2 Sedimentadores

(tanques CS-A y CS-B; válvulas S-1 a S-5).

La sedimentación se realiza en dos unidades simétricas de sección superior rectangular y sección inferior cónica unidas entre sí de flujo ascendente con capacidad conjunta de 3,600 lt, operan con tiempo de retención de 13 a 26 minutos con el caudal de 2 lt/seg. Tienen una tolva cónica para extracción de lodos, y están diseñados para trabajar como sedimentadores de alta tasa mediante placas paralelas a diferentes inclinaciones. El material de construcción de los sedimentadores es de fibra de vidrio. Las figuras III-10 presenta una Vista Parcial de los Sedimentadores, y la figura III-11 presenta la Vista Inferior (Sección Cónica) de los Sedimentadores.

III.2.3 Subsistema de Filtración.

III.2.3.1 Filtros Rápidos

(tanques FT-1 a FT-6; válvulas F-0 a F-12).

Se tienen seis unidades filtrantes de sección rectangular de 0.36 x 0.36 m y 2.80 m de altura construidos de fibra de vidrio, formando dos baterías de tres filtros. Disponen de un sistema de retrolavado, piezómetros y salidas para obtener muestras a lo largo de cada filtro. El sistema de filtración está diseñado para operar como filtros de tasa variable, con carga inicial de 2.26 m y con longitud de carrera de 0.5 m. La figura III-12 presenta el Subsistema de Filtración.

En principio, las baterías cuentan con empaques de arena y arena-antracita. El subsistema de filtración permite

FIGURA III-10

VISTA PARCIAL DE LOS SEDIMENTADORES

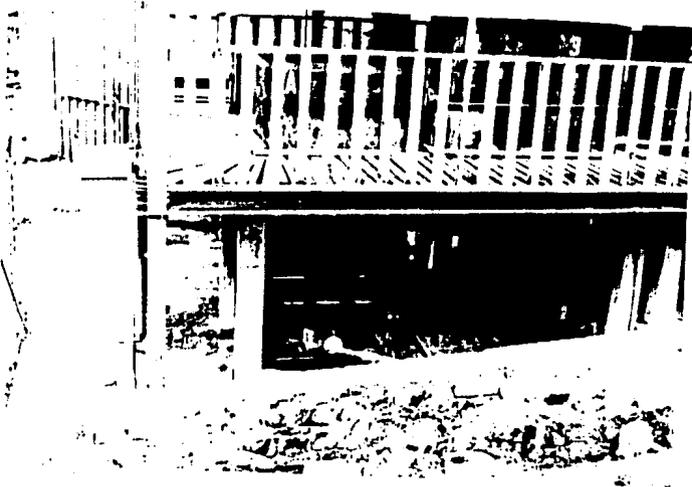


FIGURA III-11

VISTA INFERIOR DE SEDIMENTADORES

(SECCION CONICA)



experimentar con un intervalo de carga superficial (índice de eficiencia en función de la velocidad de asentamiento del área superficial del filtro y del gasto por tratar) que va de 2.5 a 15.0 lt/m², con un gasto de 2 lt/seg. La figura III-13 presenta el Sistema de Alimentación a los Filtros.

III.2.3.2 Tanque de Aguas Claras (tanque AC).

Es un tanque construido en forma de cisterna, que se utiliza para almacenar el agua tratada después de que se ha realizado la filtración. Desde este dispositivo se bombea agua para alimentar el tanque de retrolavado mediante una bomba de 1/2 H.P.

III.2.3.3 Tanque de Retrolavado

(tanque FR; válvulas R-0 a R-6).

Se tiene un tanque de retrolavado de sección rectangular con base cónica y capacidad de 1,200 lt (figura III-5), permite retrolavar un filtro a la vez, mediante una carga superficial media de 10 a 30 lt/seg/m², y controlando la válvula de entrada y drenaje. La figura III-13, presenta el Sistema de Retrolavado de los Filtros (el sistema se localiza en la parte media de los filtros). Se dispone de una válvula de alimentación general del tanque de retrolavado (R-0), mediante la cual se controla el flujo de entrada a cada filtro, a su vez éstos filtros tienen una válvula de bola de PVC tanto a la entrada como a la salida del drenaje para este sistema de retrolavado.

FIGURA III-12
SUBSISTEMA DE FILTRACION

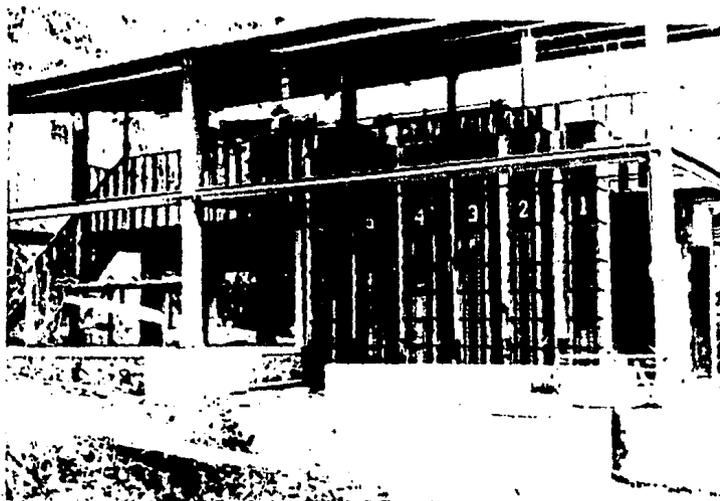


FIGURA III-13
SISTEMA DE ALIMENTACION Y RETROLAVADO
DEL SUBSISTEMA DE FILTRACION



El tanque de retrolavado, dispone de un indicador de nivel que controla automáticamente la bomba de 1/2 H.P. que le suministra agua filtrada desde el tanque de aguas claras. Cuando se alcanza el nivel en el tanque de retrolavado, el indicador manda una señal que detiene inmediatamente la bomba, y cuando el agua ha bajado 0.5 m del nivel del tanque de retrolavado, el indicador acciona automáticamente el motor eléctrico de la bomba y le vuelve a suministrar agua filtrada. El material del tanque de retrolavado es de fibra de vidrio.

IV. CARACTERISTICAS GENERALES DE OPERACION DE LA PLANTA PILOTO

La planta piloto tiene una versatilidad que hace posible combinar los subsistemas de alimentación, clarificación y filtración en un sinnúmero de alternativas, debido precisamente a las variaciones independientes de los siguientes parámetros:

- Gasto
- Dosificación de reactivos
- Tiempos de retención de floculadores
- Gradientes en floculadores
- Carga superficial en sedimentadores
- Carga superficial en filtros
- Medios filtrantes

En las tablas IV-1, IV-2 y IV-3, se reportan los intervalos de operación de cada subsistema.

El diagrama funcional de la figura III-3, muestra los elementos del sistema de tratamiento con las claves correspondientes a:

- Tanques
- Equipos
- Válvulas
- Llaves muestreadoras
- Dosificadores
- Subsistemas de tratamiento, etc.

IV.1 INTERVALOS DE OPERACION DE LOS SUBSISTEMAS

TABLA IV-1

SUBSISTEMA DE ALIMENTACION

ELEMENTOS:

- . Tanque de carga constante de 600 litros
- . Medidor de orificio de 1 1/4" sobre tuberfa de 2"
- . Tanque de homogenización de 150 l/s, alimentado por dos chiflones de 0.019 m de diámetro
- . Medidor Parshall con garganta de 1"
- . 4 dosificadores automáticos de diafragma con tanques de alimentación de reactivos

INTERVALOS DE OPERACION:

CONCEPTO	MINIMO	MAXIMO
Caudal	0.5 lps	2 lps
Tiempo de retención en el tanque	1 min	
Gradiente en Parshall	800 seg-1	1000 seg-1

Nota: lps = litros/segundo; seg-1 = 1 / segundo

IV.1 INTERVALOS DE OPERACION DE LOS SUBSISTEMAS

TABLA IV-2

SUBSISTEMA DE CLARIFICACION

ELEMENTOS:

- . 4 tanques floculadores de 975 lts, con posibilidad de trabajar en serie o en paralelo, con compuertas para controlar tiempo de retención
- . Agitadores mecánicos accionados por un motor de 1/4 HP y un sistema de transmisión de velocidad variable
- . Sedimentador de alta velocidad con placas paralelas de 60 cm y 3,600 lt de capacidad

INTERVALOS DE OPERACION:

CONCEPTO	MINIMO	MAXIMO
Tiempo de retención en floculadores	4 min	24 min
Velocidad en agitadores	60 rpm	120 rpm
Gradiente en floculadores	20 seg ⁻¹	70 seg ⁻¹
Carga superficial en sedimentador	1.25 lps/m ²	2.5 lps/m ²
Inclinación placas	45 grados	60 grados
Carga superficial equivalente	15. m ³ /m ² /día	30 m ³ /m ² /día

Nota: rpm = revoluciones por minuto

IV.1 INTERVALOS DE OPERACION DE LOS SUBSISTEMAS

TABLA IV-3

SUBSISTEMA DE FILTRACION

ELEMENTOS:

- . 6 filtros rápidos con sección de 0.36 x 0.36 m y 2.80 m de altura
- . Empaques:
 - arena (3)
 - arena-antracita (3)
- . Sistema de retrolavado agua-aire, alimentado por bomba de 1/2 HP y compresora de 175 psi
- . Tanque de aguas claras (cisterna) de 1,800 lt de capacidad
- . Tanque de retrolavado de 1,200 lt de capacidad

INTERVALOS DE OPERACION:

CONCEPTO	MINIMO	MAXIMO
Carga superficial	2.57 lps/m ²	15.43 lps/m ² (para 2 lps)
Carga de retrolavado	0	25 lps/m ² (por filtro)

Nota: lps = litros/segundo; m² = metros elevados a) cuadrado

IV-2 PRINCIPALES OPCIONES DE OPERACION.

Como principio se tienen dos principales opciones de operación que iniciarán la puesta en marcha la planta piloto, las opciones son:

- filtración directa
- filtración con clarificación

Para la filtración directa se establece un circuito Marshall-Filtros, con el "by-pass" (recirculación) del subsistema de clarificación (ver figura IV-1).

Para la filtración con clarificación, se realiza el acceso al sistema de floculadores mediante cualquiera de los arreglos que aparecen en las figuras IV-2 y IV-3.

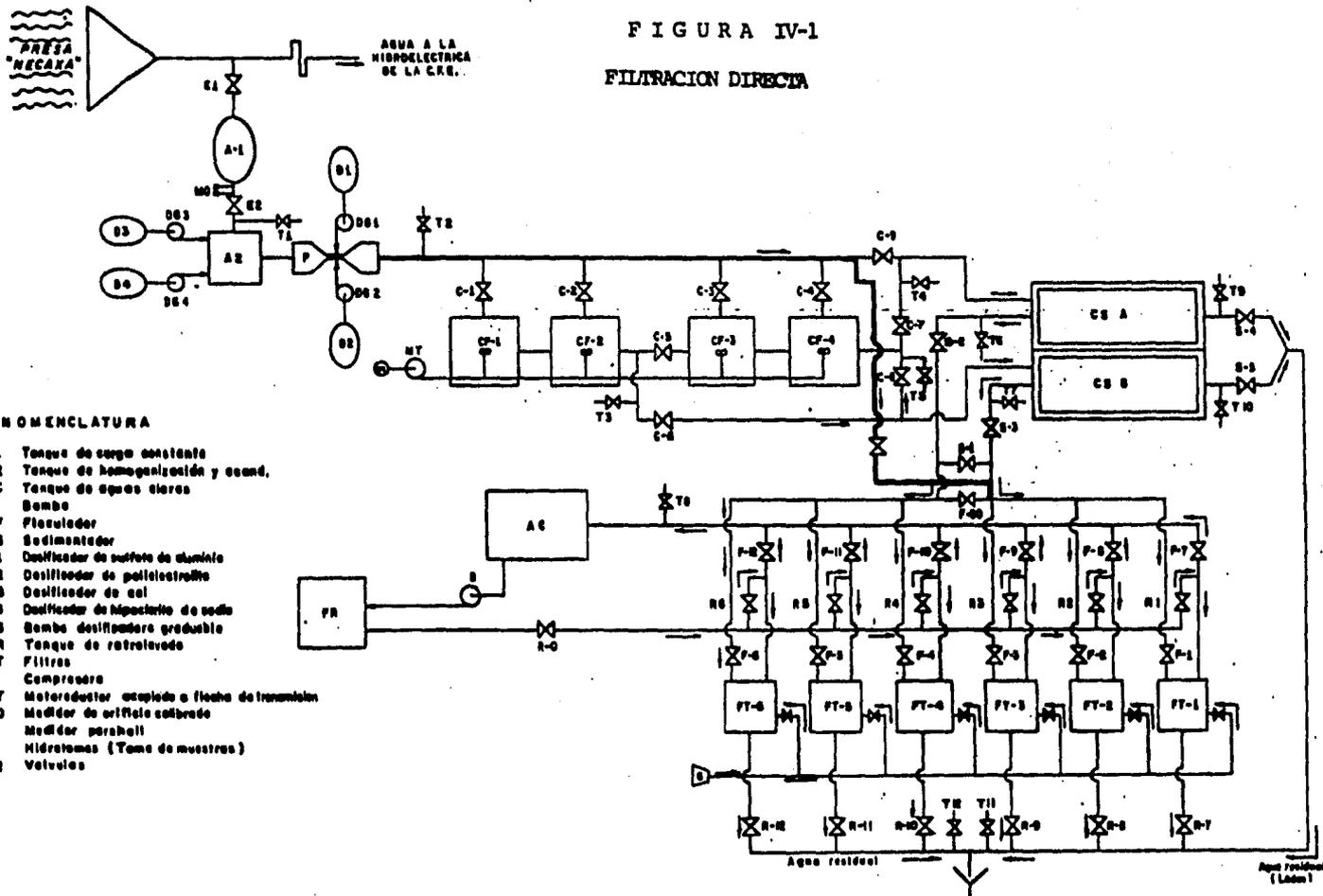
A continuación se describe la operación ejecutiva de cada subsistema:

IV.2.1 Subsistema de Alimentación

Precauciones:

1. La válvula de la toma directa de la tubería de baja presión (E-1) debe graduarse a un caudal ligeramente superior al previsto para el diseño de la planta ($Q = 2 \text{ lt/seg}$), con el propósito de evitar una presión excesiva sobre la válvula del flotador del tanque de carga constante.
2. Deben seguirse cuidadosamente las especificaciones de operación de las bombas dosificadoras señaladas por el fabricante.

FIGURA IV-1
FILTRACION DIRECTA

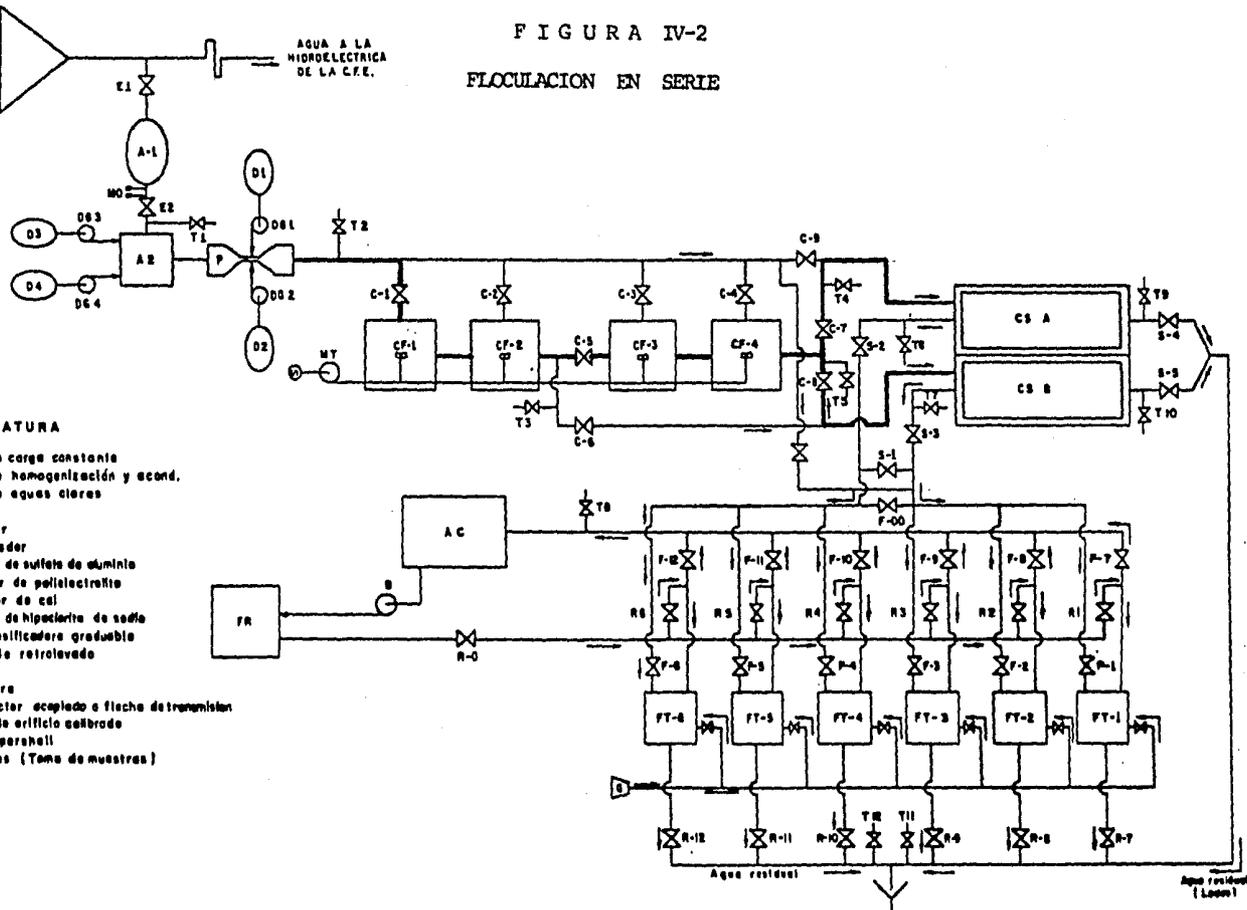


NOMENCLATURA

- A1 Tanque de carga constante
- A2 Tanque de homogenización y aeread.
- AC Tanque de aguas claras
- S Bomba
- CF Floculador
- CS Sedimentador
- D1 Desulfador de sulfato de aluminio
- D2 Desulfador de polielectrolito
- D3 Desulfador de sal
- D4 Desulfador de hipoclorito de sodio
- D5 Bomba desulfadora regulable
- FR Tanque de retroalvado
- FT Filtros
- F Compuerta
- MT Motorreductor acoplado a flecha de transmisión
- MO Medidor de orificio calibrado
- P Medidor parshall
- T Hidrantes (Toma de muestras)
- DE Válvulas



FIGURA IV-2
FLOCULACION EN SERIE

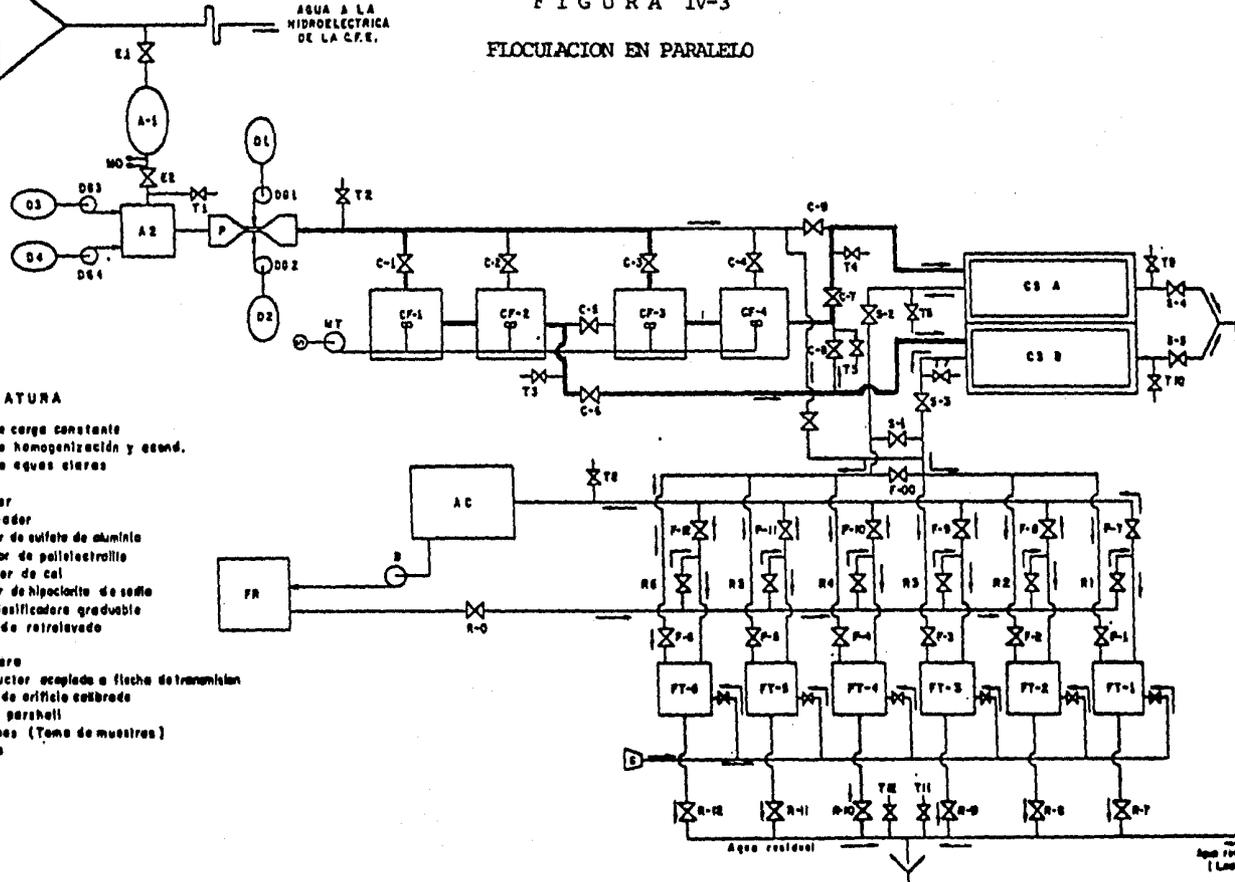


NOMENCLATURA

- A1 Tanque de carga constante
- A2 Tanque de homogenización y acond.
- AC Tanque de aguas claras
- B Bomba
- CF Floculador
- CS Sedimentador
- D1 Dosificador de sulfato de aluminio
- D2 Dosificador de polielectrolito
- D3 Dosificador de cal
- D4 Dosificador de hipoclorito de sodio
- OG Bomba dosificadora graduable
- FR Tanque de retrolavado
- FT Filtros
- G Compresora
- MT Motorreductor acoplado a flecha de transmisión
- MO Medidor de orificio sellado
- P Medidor parshall
- T Hidrómetros (Toma de muestras)
- V Valvulas



FIGURA IV-3
FLOCULACION EN PARALELO



NOMENCLATURA

- A1 Tanque de carga constante
- A2 Tanque de homogenización y esand.
- AC Tanque de aguas claras
- B Bomba
- CF Floculador
- CS Sedimentador
- D1 Dosificador de sulfato de aluminio
- D2 Dosificador de polielectrolito
- D3 Dosificador de cal
- D4 Dosificador de hipoclorito de sodio
- DG Bomba dosificadora graduable
- FR Tanque de retrolavado
- FT Filtros
- G Compressor
- MT Motorreductor acoplado a flecha de transmision
- MO Medidor de orificio estrobado
- P Medidor parshall
- T Hidrotomos (Toma de muestras)
- X Valvulas

Agua residual
(Llave)

Control del caudal:

El control del gasto de entrada ($Q = 2 \text{ lt/seg}$), se controla con la válvula E-2 y la curva de calibración del medidor de orificio (MO) de la figura IV-4. Es decir, mediante la variación de la velocidad de la velocidad del agua a través de la tubería, con la válvula E-2 y mediante la placa perforada que se instaló en dirección perpendicular a la dirección del flujo, se obtiene una diferencia de presión producida por el mecanismo reductor de la sección (medidor de orificio), cuya lectura se obtiene por los manómetros colocados antes y después de la placa perforada (medidor de orificio). La teoría y comportamiento de los medidores de flujo, tipo orificio se pueden estudiar a partir de la Ecuación General de los Medidores, la cual puede expresarse en función del gasto de la siguiente manera:

$$Q = \underbrace{\left(\frac{\pi}{4} \right) C_d D_2^2}_{K} \sqrt{\left(1 - \frac{D_2}{D_1} \right)^4 \cdot 2g_2 \sqrt{(p_1 - p_2) / \gamma}}$$

$$K = \text{constante} \cdot \sqrt{(p_1 - p_2) / \gamma} = \Delta h$$

$$Q = k (\Delta h)^{1/2}$$

Si $D_1 = 2'' = 5.08 \text{ cm}$ y $D_2 = 1 \frac{1}{4}'' = 3.175 \text{ cm}$

Y substituyendo datos en la Ecuación General, tenemos:

$$Q = 0.380960115 (\Delta h)^{1/2} \text{ Curva Teórica del Medidor de Orificio}$$

(MO)

donde:

$$Q = (\text{lt/seg}), \text{ y } \Delta h = (\text{cm})$$

La obtención de la curva de calibración se realiza mediante mediciones de volumen (V) vs tiempo (t) del fluido a diferentes aberturas de la válvula E-2 y la lectura de los manómetros colocados entre el medidor de orificio (h) expresado en (cm de H₂O).

La técnica consiste en fijar en el piezómetro del tanque de homogenización (A2), un volumen de 50 lt y medir el tiempo que tarda el fluido en alcanzar la marca de los 50 lt en función de diferentes aberturas de la válvula E-2 y la lectura de los manómetros. Los resultados se presentan en la tabla IV-4, denominada Calibración de Medidores de Orificio (MO).

Los resultados se analizan aplicando la teoría de los mínimos cuadrados, a la ecuación general del medidor de orificio expresada en función del gasto.

$$Q = k (\Delta h)^n, \text{ reordenando tenemos:}$$

$$\log Q = \log k + n \log (\Delta h)$$

$$Y = a + b X$$

donde:

$$\log Q = Y; \log (\Delta h) = X$$

$$\log k = a \text{ (ordenada al origen), y}$$

$$n = b \text{ (pendiente de la recta)}$$

De esta manera se obtiene la figura IV-4, denominada curva de calibración de medidor de orificio (MO), donde se representa el comportamiento de la curva de calibración y curva teórica de la placa de orificio. Mediante la utilización de esta figura IV-4 y la curva de calibración se puede aforar el caudal de alimentación de agua cruda al sistema de tratamiento. Por lo tanto, para aforar la alimentación a 2 lt/seg, la diferencia manométrica registrada en los manómetros debe indicar 28 cm de H₂O.

2

Dosificación.

La dosificación de los reactivos en el proceso, se realiza en función del mejor resultado en los Ensayos de "Prueba de Jarras", es decir, mediante pruebas previas de diferente dosificación de reactivos en el laboratorio se obtiene la dosificación óptima que se utilizará en el proceso.

Se preparan los tanques dosificadores con la solución del reactivo y se gradúan las bombas dosificadoras (DG) modelo 200 mediante la curva de calibración de gastos dosificadores proporcionada por el fabricante, representada en la figura IV-5.

Cada bomba dosificadora (DG) tiene un obturador, el cual se puede relacionar con el gasto de inyección de la solución del reactivo, utilizando la figura IV-5.

TABLA IV-4

CALIBRACION DEL MEDIDOR DE ORIFICIO (MO)

PLANTA POTABILIZADORA PILOTO "NECAXA"

h1 (cm H O)	h2 (cm H O)	ΔH (h1 - h2)	U (lt)	t (seg)	Q (lt/seg)	log ΔH	log Q
220	219	1	50	157.3	0.318	0.0000	-0.4976
187	167	20	50	31.7	1.577	1.3010	0.1978
186	167	19	50	32.8	1.524	1.2788	0.1830
147	112	35	50	18.8	2.660	1.5441	0.4249
110	44	66	50	24.6	3.252	1.8195	0.5122
162	127	35	50	22.0	2.273	1.5441	0.3566
215	214	1	50	85.2	0.587	0.0000	-0.2314
194	174	20	50	34.6	1.445	1.3010	0.1599
215	213	2	50	87.8	0.569	0.3010	-0.2449
195	183	12	50	38.1	1.312	1.0792	0.1179
203	195	8	50	44.7	1.119	0.9031	0.0488
182	161	21	50	28.1	1.779	1.3222	0.2502
175	148	27	50	26.3	1.901	1.4314	0.2790
214	213	1	50	89.7	0.557	0.0000	-0.2541
150	107	43	50	20.5	2.435	1.6335	0.3865
146	106	40	50	18.8	2.660	1.6021	0.4249
143	96	47	50	19.3	2.591	1.6721	0.4135
116	60	56	50	17.4	2.874	1.7482	0.4585
88	6	82	50	13.9	3.597	1.9138	0.5559
98	30	68	100	28.9	3.460	1.8325	0.5391

RESULTADOS:

$$Q = K (\Delta H)^n ; \log Q = \log K + n \log (\Delta H)$$

$$Y = a + b X$$

a = log K = -0.3567890 K = 10 EXP a = 0.4397552
n = pend. = 0.4626731

POR LO TANTO SE OBTIENE LA SIGUIENTE RELACION:

ECUACION DE CALIBRACION: Q = 0.4397552 (ΔH) EXP 0.4626731

FIGURA IV-4

MEDIDOR DE ORIFICIO DE ENTRADA (MO)

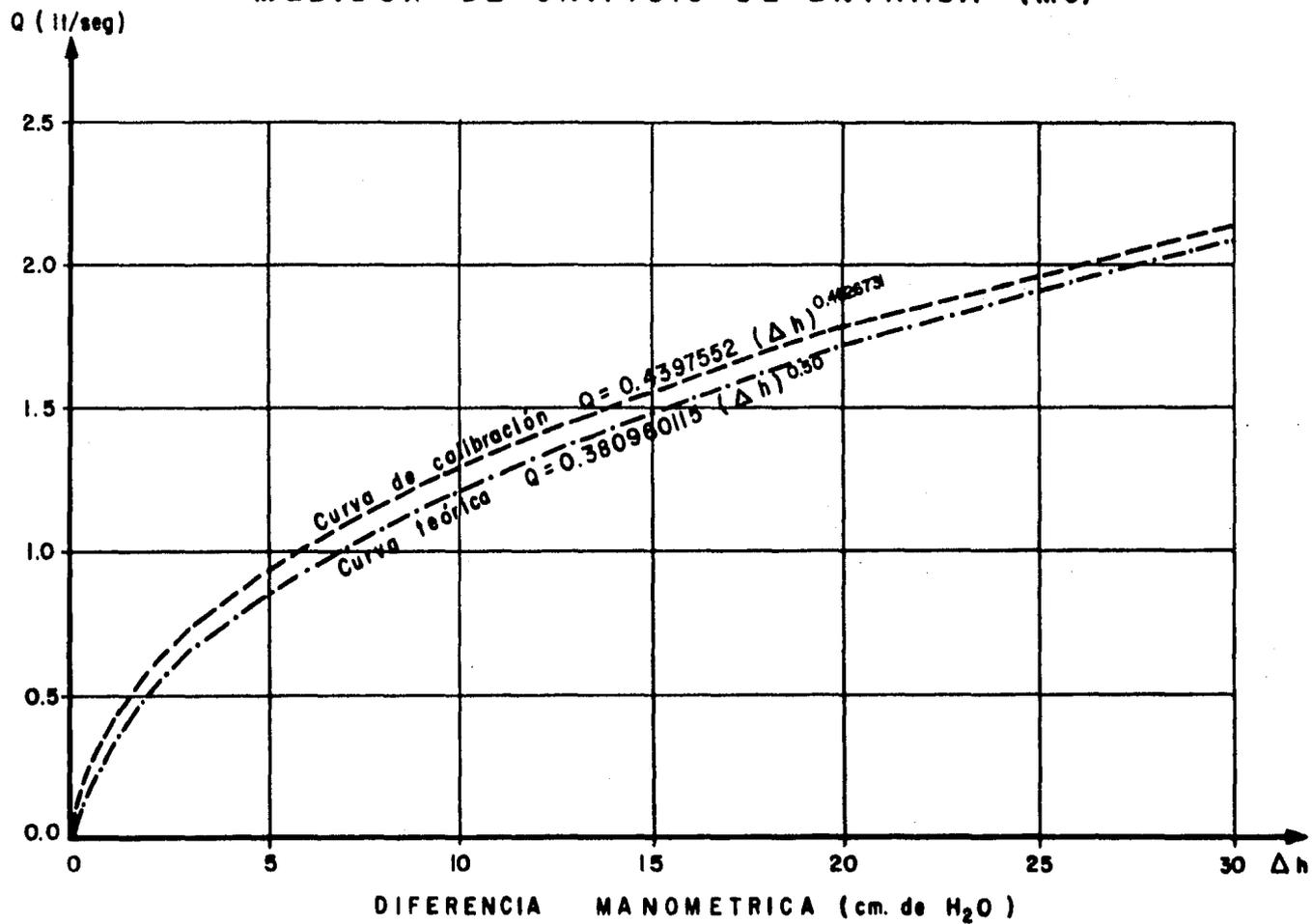
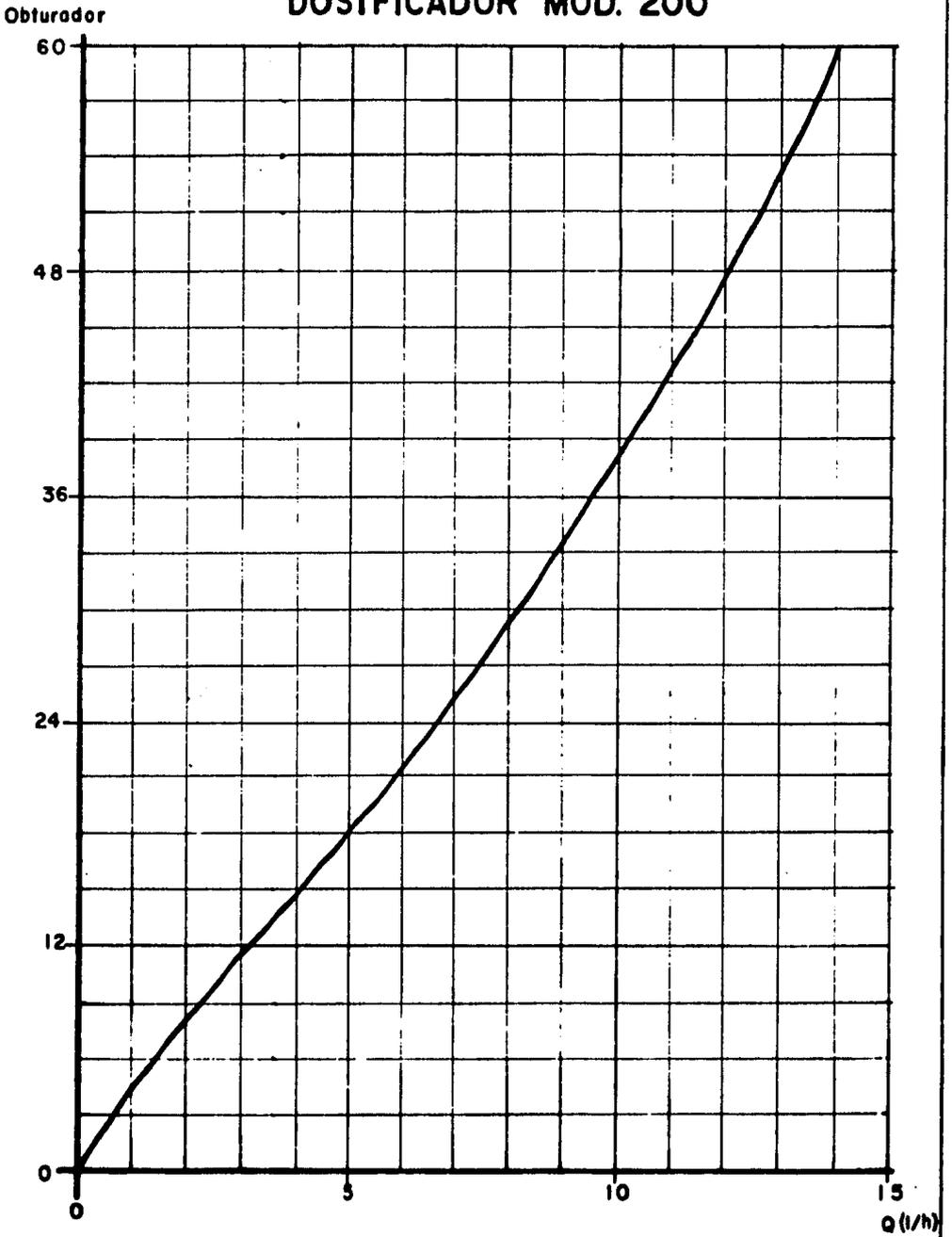


FIGURA II-5

CURVA DE CALIBRACION DE GASTOS
DOSIFICADOR MOD. 200



IV.2.2 Subsistema de Clarificación.

Precauciones:

1. Al graduarse las velocidades de los rotores, debe revisarse que las bandas de transmisión tengan la tensión adecuada.
2. El régimen en floculadores se establece hasta que el caudal de descarga de los vertedores alcanza el nivel del tanque.
3. En el caso de operarse el sedimentador con una sólo unidad, debe conservarse llena de agua la otra unidad, para evitar el colapso de la mampara divisoria.

Floculación:

De acuerdo al proceso en turno y al tiempo de retención fijado, es el arreglo de operación de los floculadores, las figuras IV-2 y IV-3 muestran la secuencia del proceso de clarificación en serie y paralelo, respectivamente. El tiempo de retención en el floculador se gradúa mediante el deslizamiento de las compuertas a diferentes alturas de acuerdo al tirante establecido. La velocidad de rotación de los agitadores se ajusta mediante una graduación del juego de poleas de transmisión. El gradiente deseado para cada floculador se obtiene mediante combinaciones de:

- Tamaño de propela (diámetro y tipo)
- Tiempo de retención (volumen fijado en cada floculador)
- Velocidad de agitación (rpm)

Sedimentación:

Es posible variar la carga del sedimentador, mediante la utilización de una o de las dos unidades. Esto se puede

controlar a través de las válvulas C-6, C-7 y C-8. Otra variable en la sedimentación es la inclinación de las placas, mediante el riel superior de alineación, que las sostiene. Lo todos se depositan en la tolva del sedimentador tipo cónico, y se eliminan abriendo las válvulas S-4 y S-5 hacia drenaje.

IV.2.3 Subsistema de Filtración.

Precauciones:

1. Debe fijarse previamente la graduación de las válvulas de alimentación a cada filtro, para evitar distribuciones desiguales que repercutirían finalmente en el agotamiento más rápido del filtro que esté recibiendo más caudal.
2. Cuando se esté realizando retrolavado es necesario graduar lentamente las válvulas R-1 a R-6 para controlar el caudal de entrada y lograr la expansión máxima y con el fin de evitar la pérdida y mezcla excesiva de material en los lechos filtrantes. Únicamente se retrolava un filtro a la vez.
3. Las boquillas de los piezómetros deben de estar exentas de arena para evitar obstrucciones y se puedan determinar las lecturas piezométricas.
4. Las mirillas transparentes que se encuentran colocadas al frente de cada filtro, son únicamente para observar el comportamiento de cada filtro, así como la distribución en las alturas de los diferentes lechos filtrantes y fijar cuando es necesario colocar nuevo lecho filtrante.

Filtros:

La planta piloto tiene seis filtros que pueden ser operados en forma individual, en conjunto, en paralelo o grupos de tres. La válvula F-00 permite mantener una alimentación separada a grupos de tres filtros desde cada unidad del sedimentador. El caudal de alimentación se regula con las válvulas F-1 a F-6, para los filtros FT-1 a FT-6, respectivamente. La carga que indican los piezómetros al inicio de la carrera debe corresponder al nivel inferior de carrera del filtro (225 m).

Retrolavado:

Cada filtro termina su carrera (manteniendo la alimentación constante) al alcanzar la cota piezométrica 275 cm. En este momento se cierran las válvulas de entrada y salida del filtro agotado, se abre la válvula correspondiente de drenaje (válvula R-7 a R-12) para los filtros (FT-1 a FT-6), respectivamente, y se abren lentamente las válvulas de retrolavado (R-1 a R-6) hasta alcanzar el nivel de expansión máximo del medio filtrante (25 % del espesor del empaque en filtros de arena-antracita y de preferencia 5 % en los filtros de arena).

Durante el retrolavado debe desconectarse la bomba que alimenta al tanque de retrolavado y al terminar, accionarse hasta llenarlo de nuevo para preparar una nueva operación.

Los empaques originales de los filtros (arena y arena-antracita), pueden cambiarse en composición y espesor (de 0.60 m a 1.10 m).

Para cambiar el empaque o lechos filtrantes, se descarga el filtro a través de las tapas posteriores de cada filtro, se puede cargar el filtro nuevamente utilizando ya sea el mismo arreglo u otro nuevo en cuanto al espesor de los lechos, de igual manera se puede utilizar otro material filtrante para estudiar sus propiedades de retención y efectividad.

IV-3 REGISTRO DE LOS PROCESOS.

Para cada proceso experimental, una vez definidos los parámetros del experimento, éstos deberán indicarse en la Orden de Trabajo denominada Forma X-1, de la figura IV-6.

En la Forma X-1 se deberá anotar la siguiente información:

- El caudal de entrada al tanque de homogenización y acondicionamiento (alimentación)
- El caudal de trabajo de cada floculador y sedimentador
- Los reactivos químicos a utilizar
- La dosificación de los reactivos
- Los tiempos de retención de cada floculador
- Las velocidades de agitación de cada floculador
- La inclinación de placas en los sedimentadores
- Las instrucciones generales de operación
- Las observaciones presentes durante el proceso analizado
- Señalar gráficamente con lápiz rojo, en el diagrama del proceso la corrida analizada
- El número de unidades de floculadores, sedimentadores y filtros utilizados (especificando empaque)
- Las válvulas que permanecerán abiertas en operación normal
- Las llaves muestreadoras y piezómetros que serán empleados para toma de muestras
- Frecuencia de muestreo
- Se realizará la preparación de los recipientes para toma de muestras con las etiquetas correspondientes para cada muestreo
- Fecha y horario de cada uno de los acontecimientos durante la

operación del proceso

Se llenará la información general de la corrida analizada en la Orden de Trabajo Forma X-1, señalando fecha y hora del inicio y término de la corrida.

Se tomarán las muestras del agua cruda para ser analizadas en el laboratorio.

Antes de abrir la válvula de entrada al sistema de tratamiento, deberán realizarse las siguientes actividades:

- Preparar dosificación de reactivos
- Graduar el flujo en los dosificadores
- Abrir y cerrar válvulas en función directa del diagrama del proceso
- Lavar previamente el lecho de los filtros
- Colocar placas de los sedimentadores e inclinación fijada
- Colocar vertedores de flocladores a la altura señalada en el proceso

Al abrir la válvula de entrada al sistema de alimentación, antes de arrancar dosificadores y agitadores, se deberá:

- Regular el gasto de entrada con la válvula (E-2)
- Regular la división de caudales en flocladores
- Ajustar altura (tirante) en Parshall
- Fijar válvulas de entrada a los sedimentadores
- Regular válvulas de admisión a filtros

Una vez estabilizado el flujo hidráulico de la corrida, se

procederá a iniciar la puesta en marcha de dosificadores y agitadores del Subsistema de Clarificación.

Es entonces cuando se inicia la corrida. Deberá mantenerse una vigilancia continua del proceso, principalmente con relación a:

- Funcionamiento de los dosificadores
- Inyección continua de los reactivos
- Estabilización de la altura (tirante) en floculadores
- Funcionamiento de los sedimentadores
- Operación de los filtros
- Verificación de la hora de retrolavado de los filtros, cuando alguno de ellos se esté agotando durante la operación del sistema

Cualquier discontinuidad en el proceso, deberá señalarse en la Forma X-1, indicando hora de interrupción y reanudación del dispositivo suspendido (dosificador, floculador, sedimentador, filtro, reactivo, etc.).

De la misma manera deberán indicarse los tiempos de retrolavado, que constituyen una interrupción en el proceso.

Al término de la corrida deberá indicarse la hora de finalización del proceso.

El formato de registro (Forma X-1), será posteriormente completado con los resultados del laboratorio del agua tratada, y deberá archivararse conjuntamente con los registros de cada determinación de parámetros experimentados, para posteriormente

ser analizados e interpretados, e iniciar la obtención de los parámetros básicos para el diseño de la Planta Prototipo del Sistema Tecolutla.

V. ENSAYOS DE PRUEBA DE JARRAS

El proceso de coagulación-floculación es una operación unitaria básica en las plantas de tratamiento de agua potable. Es una parte inicial de una serie de procesos que incluyen, además de la coagulación y floculación, la sedimentación y filtración, para la remoción de turbiedad, color, bacterias, virus, algas y otros compuestos en estado coloidal.

A nivel de laboratorio, uno de los modelos más utilizados es el aparato de "Prueba de Jarras", como elemento de control y técnica confiable en el tratamiento de agua.

Mediante esta prueba es posible encontrar los parámetros físico-químicos óptimos del proceso de coagulación-floculación de la Planta Potabilizadora Piloto "Necaxa".

La tabla U-1, representa en forma general y práctica la utilización de la "Prueba de Jarras".

V.A Consideraciones Generales para la realización de la "Prueba de Jarras".

Los ensayos de las pruebas de jarras que se aplicarán para la obtención de los parámetros físico-químicos óptimos del proceso de clarificación, presenta ciertas variaciones en cuanto a su realización, estas variaciones se especifican en cada uno de

TABLA V.1

APLICACION DE LA "PRUEBA DE JARRAS"

PARAMETROS QUIMICOS DE COAGULACION	}	- DOSIFICACION OPTIMA DE COAGULANTE - pH OPTIMO DE COAGULACION (INTERVALO) - CONCENTRACION OPTIMA DEL COAGULANTE
PARAMETROS FISICOS DE FLOCULACION	}	- GRADIENTE OPTIMO (G*) DE VELOCIDAD - TIEMPO OPTIMO (T*) DE FLOCULACION

los ensayos aplicados, sin embargo, conviene tener presente como criterios generales de control, los siguientes aspectos:

1. Equipo utilizado para la prueba.
2. Análisis de laboratorio requeridos.
3. Reactivos a utilizar en cada ensayo.
4. Dosis de coagulante.
5. Concentración de coagulante.
6. Sistema de adición del reactivo.
7. Dosificación del ayudante de coagulación (polielectrolito).
8. Sistema de adición del polielectrolito.
9. Tiempo de duración y gradiente de velocidad de la mezcla lenta (coagulación).
10. Tiempo de duración y gradiente de velocidad de la mezcla rápida (floculación).
11. Sistema de la toma de muestras para realizar los análisis.

En todos los ensayos de prueba de Jarras, durante el período de floculación y el tiempo de sedimentación, se debe considerar el tamaño del flóculo producido.

Para la determinación del flóculo producido, se observa su tamaño y se le evalúa cualitativamente según sus características.

Generalmente se elige como dosis óptima el ensayo donde la jarra produce una partícula de mayor tamaño, aunque no siempre la partícula más grande produce la mayor velocidad de asentamiento aparente y deja ver el agua cristalina entre los flóculos, debido principalmente a la formación de los espacios

vacios de las partículas, lo cual repercute en la obtención de una partícula no compacta que con el movimiento en el seno del líquido fácilmente se rompe.

Para tal determinación se utiliza la técnica denominada Índice de Willcomb, esta técnica es demasiado subjetiva y depende del criterio del observador, sin embargo, es una evaluación cualitativa que se utilizará en cada uno de los ensayos de prueba de jarras seleccionados.

La tabla V-2 denominada Índice de Willcomb, asocia un número par del 0 al 10 a las características de formación físicas del flóculo producido durante el ensayo, dicho número es denominado Índice de Willcomb.

V.B Descripción del Equipo de "Prueba de Jarras".

Para efectuar esta prueba existen algunas variaciones, las cuales son descritas en la literatura. Aunque no es indispensable, estas pruebas en la mayoría de los casos son conducidas en equipos comerciales, uno de los más conocidos y que se utilizó para la realización de esta tesis, es el Aparato de "Prueba de Jarras" de velocidad variable, Modelo 7790-300 de la Phipps and Bird (ver figura V-1).

FIGURA V-1

APARATO DE "PRUEBA DE JARRAS"

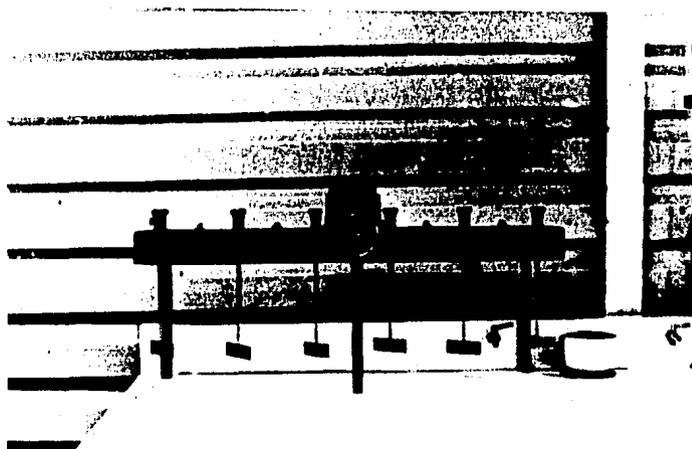


TABLA V-2

INDICE DE FLOCULACION DE WILLCOB

NUMERO DEL INDICE	DESCRIPCION DEL FLOCULO PRODUCIDO
0	FLOCULO COLOIDAL, NINGUN SIGNO DE AGLUTAMIENTO
2	VISIBLE, FLOCULO MUY PEQUENO, CASI IMPERCIPITBLE PARA UN OBSERVADOR NO ENTRENADO
4	DISPERSO, FLOCULO BIEN FORMADO PERO UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDO. (SEDIMENTA MUY LENTAMENTE O NO SEDI- MENTA).
6	CLARO, FLOCULO DE TAMAÑO RELATIVAMENTE GRANDE PE- RO QUE PRECIPITA CON LENTITUD.
8	BUENO, FLOCULO QUE SE DEPOSITA FACIL PERO COMPLE- TAMENTE.
10	EXCELENTE, FLOCULO QUE SE DEPOSITA TODO DEJANDO EL AGUA CRISTALINA.

Normalmente estos equipos constan de:

- Un agitador mecánico provisto de seis paletas, capaz de operar a velocidades variables de 0 a 100 rpm.
- Un iluminador de flóculos, localizado en la base del agitador de laboratorio.
- Vasos de precipitados (jarras), de 1500 a 2000 ml, forma baja, de cristal refractario.

En los capítulos siguientes se analizarán los componentes o variables más importantes para la realización de las pruebas de jarras.

V.C Sistema de Dosificación.

Las unidades de agitación múltiple deben ser equipadas con las facilidades necesarias para la adición de coagulantes químicos en forma rápida y simultánea a cada vaso o jarra. La mayoría de los equipos comerciales olvidan este detalle que es la causa de muchos resultados erróneos. Los estudios muestran que las diferencias que existen en el tiempo de adición de los reactivos químicos de las soluciones a los diferentes vasos, pueden afectar significativamente los resultados, particularmente cuando se utilizan ayudantes de coagulación.

Otro factor que altera los resultados, es la velocidad de adición la cual debe ser lo más rápida posible. La práctica común de adicionar coagulantes a cada vaso mediante el uso de pipetas graduadas, práctica que no puede ser desechada en forma radical, pero la velocidad de adición del reactivo químico es

muy lenta y pueden presentarse diferencias considerables en el tiempo de adición y en la rapidéz requerida para avanzar con la dosificación.

Una manera sencilla de evitar estas dificultades, es medir el coagulante dentro de tubos de prueba o vasos unidos en un soporte de un diseño adecuado. El soporte, que puede estar montado en la unidad de agitación, ayuda a la adición del coagulante en forma simultánea a todos los vasos. Después de esta operación los recipientes deben ser rápidamente enjuagados con agua destilada y éstos enjuages deben ser adicionados a los vasos de coagulación.

Esta práctica es particularmente útil cuando se van a adicionar más de un reactivo químico (coagulantes y polielectrolitos), para lo cual se deben tener soportes separados para cada reactivo antes de la prueba de coagulación, de esta manera se podrá controlar la adición con mayor precisión.

La técnica usada en el laboratorio del CEPIS, consiste en colocar en seis vasos de precipitados pequeños (10 ml) por medio de una pipeta o bureta las dosis de reactivo que se van a agregar. El contenido de cada vaso se succiona con una jeringa hipodérmica provista de su aguja. Se retira la aguja de la jeringa y ésta última, con la dosis completa, se pone junto a la jarra correspondiente en un soporte de madera especialmente acondicionado, que va colocado en el puente superior del aparato en el cual se han horadado seis o doce agujeros en los que se colocan las jeringas hipodérmicas.

Cuando se quiere inyectar los reactivos, todos los émbolos de las jeringas se presionan (bajan) manualmente y en forma simultánea, lo más rápido posible (máximo cinco segundos). Cuando se pone a funcionar el equipo haciendo girar las paletas a alta velocidad, se inyecta el contenido de cada jeringa en la jarra que le corresponde, cuidando que la solución penetre profundamente (10 cm aprox.) y de preferencia en dirección paralela a la flecha de las paletas, para que la dispersión sea más rápida.

Esta técnica es la que se utilizará para cada ensayo de prueba de Jarras de esta tesis, seleccionándose principalmente por el corto tiempo de adición y facilidad de operación que presenta.

Otra posibilidad de efectuar la dosificación de reactivos, es poner en cada jarra la dosis de reactivo requerida y vertir rápidamente el agua de la muestra mientras se hace girar las paletas a alta velocidad. Esto produce una mezcla completa semejante a la que se obtiene en un salto hidráulico. Una vez realizada la mezcla rápida se disminuye la velocidad de agitación de las paletas y se deja flocular la muestra.

En general se recomienda aplicar las dosis de reactivos en un punto fijo localizado cerca del eje impulsor durante la mezcla rápida a alta velocidad.

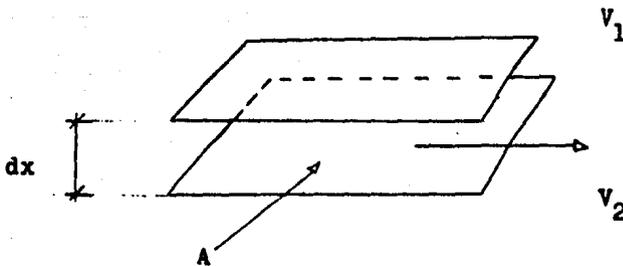
V-D Sistema de Agitación

Una de las variables más importantes en la "Prueba de Jarras", es la intensidad de agitación expresada como gradiente de velocidad. En el equipo de prueba de jarras para lograr el movimiento ó agitación del agua, se utilizan paletas o rotores, accionados en forma mecánica o magnética.

Condiciones Teóricas de la Agitación.

Para definir el esfuerzo cortante que se produce entre dos láminas de agua que se deslizan con diferente velocidad, utilizaremos el modelo de los dos planos paralelos de fluido de área A separados por una distancia dx que se mueven en la misma dirección a velocidades diferentes V_1 y V_2 . La figura V-2 representa este comportamiento:

Figura V-2



La fuerza requerida para mantener estas diferencias de velocidad es proporcional a la diferencia de velocidades a través del líquido o gradiente de velocidad:

$$F_{gc} \propto dV / dX \quad (1)$$

Esta fuerza que actúa sobre las dos láminas, se denomina fuerza de esfuerzo cortante (F_{gc}), que dividida por unidad de área cortante, se llama tensión de esfuerzo cortante (T_{gc}), y se designa por:

$$F_{gc} / A = T_{gc} \quad (2)$$

La difusividad de cantidad de movimiento (ν), para líquidos, está dado por:

$$T_{gc} = - \nu (d(\rho v) / dX) \quad (3)$$

La difusividad de cantidad de movimiento se llama más comúnmente viscosidad cinemática. La viscosidad absoluta se encuentra definida por:

$$T_{gc} = - u (dV / dX) \quad (4)$$

en donde:

u = viscosidad absoluta

$u = \nu \rho$ (Kg / m seg)

El gradiente de velocidad (G):

$$G = dV / dX \quad (5)$$

es una medida de la velocidad con la que se mueven unas capas de fluido con respecto a otras.

La Potencia (P) necesaria para mover las láminas de agua está dado por:

$$P = Tgc (dV / ds) \quad (6)$$

sustituyendo el valor de Tgc de la fórmula (4) en (6), obtenemos:

$$P = u (dV / ds) \text{ Exp } 2 \quad \text{ó} \quad P = u G \text{ Exp } 2 \quad (7)$$

Por lo tanto, la ecuación (6), permite calcular el valor de "G" en función de "P", mediante los siguientes arreglos:

$$G = (P / u) \text{ Exp } 1/2 \quad \text{ó} \quad G = (P / u V) \text{ Exp } 1/2 \quad (8)$$

donde:

P = potencia total necesaria (kgf - m / seg)

V = volumen del floculador (m³)

u = viscosidad absoluta (kgf - seg / m²), y

G = gradiente de velocidad (1 / seg).

Potencia Necesaria para diferentes Tipos de Agitadores.

El análisis dimensional predice la correlación de la potencia necesaria a un agitador sumergido en un fluido, por medio de varios grupos adimensionales:

- una función de potencia $\theta = g_c P / L \text{ Exp } 5 \rho \text{ Exp } 3$
- un número de Reynolds modificado $NRe = L \text{ Exp } 2 n \rho / u$, y
- una serie de factores de forma (W / L) , (D / L) , (H / L)

en donde:

D = diámetro del recipiente (m)

g_c = factor de conversión gravitacional

(Kg masa m) / (Kg fuerza seg Exp 2)

H = altura o profundidad del líquido (m)

L = diámetro del agitador (m)

n = velocidad del agitador (rps)

P = potencia del agitador (Kg m / seg)

W = altura del agitador (m)

u = viscosidad del líquido (Kg / m seg)

ρ = densidad del líquido (Kg / m³)

θ = función de potencia, valor adimensional que varía con el tipo y características del agitador.

Puede emplearse cualquier otro grupo de unidades compatibles.

Si se emplean modelos geoméricamente semejantes, los factores de forma pueden reunirse en una sola constante con la función de potencia. Este tipo de correlación o fórmula ha sido confirmado por varios investigadores para diversos impulsores o

agitadores.

En el equipo de "Prueba de Jarras", la potencia teórica puede calcularse en función de la geometría de los agitadores con paletas planas utilizando los datos de White y Sumerford ;Chem. Met. Eng., 43, 370 (1936)M. En los límites más altos del tamaño de las paletas o de las velocidades, o bien de ambas cosas, White encontró que la potencia necesaria está relacionada con las dimensiones de la paleta, su velocidad y las propiedades del líquido por la ecuación:

$$P = c(L \text{ Exp}3)s(N \text{ Exp}3)(D \text{ Exp}1.1)(W \text{ Exp}0.3)(H \text{ Exp}0.6) \quad (9)$$

en donde:

P = potencia necesaria (H.P.)

c = coeficiente de potencia (adimensional)

D = diámetro del recipiente o jarra (m)

H = altura del líquido (m)

L = longitud de la paleta (m)

N = velocidad de la paleta (rps)

s = densidad del líquido (Kg / m³)

W = ancho de la paleta (m)

z = viscosidad absoluta (Kg / m seg)

Dichos autores encontraron que c está relacionado con el número de Reynolds modificado, en la misma forma que lo está en la circulación del fluido por tuberías, el coeficiente de rozamiento al número de Reynolds verdadero. La figura P del Perry, J. H. Manual del Ingeniero Químico 3a. ed., página 1915,

es una gráfica de c en función del número Reynolds modificado:

$$NRe = L \text{ Exp } 2 N s / z$$

Encontraron que esta ecuación se verificaba muy bien en tanques sin placas desviadoras, que tengan paletas con una longitud de un tercio o más del diámetro del tanque y un ancho menor de un sexto de su longitud. La flecha con la paleta ha de estar sobre el eje central del tanque y la altura del líquido no debe ser más del 50% mayor que el diámetro del mismo. Para calcular la potencia necesaria para un determinado agitador de paletas a una velocidad dada, hay que calcular primero el número Reynolds modificado. Por medio de la figura P de la citada referencia se encuentra el coeficiente de potencia c , y con él y la ecuación (9), se calcula la potencia P .

En la referencia, Perry, J. H. Manual del Ingeniero Químico 3a. ed., de las páginas 1916 a 1919, se presentan relaciones y nomogramas encontrados por diversos investigadores para calcular la potencia teórica en turbinas, hélices y diversos agitadores o rotores que se utilizan para llevar a una velocidad dada un líquido o fluido.

Equipo Auxiliar.

Los equipos o aparatos auxiliares que son utilizados para las determinaciones de las propiedades físicas del agua en la aplicación de los ensayos de las "Pruebas de Jarras" son:

- Turbidímetro o Nefelómetro
- Potenciómetro
- Comparador de Color
- Cronómetro
- Termómetro
- Cristalería
- Reactivos, etc.

V.1 OBTENCION DE LA ECUACION DE DOSIFICACION OPTIMA DE COAGULANTE

V.1.1 Objetivo:

- Determinar la dosis óptima de coagulante (sulfato de aluminio), que inicie la más rápida desestabilización de las partículas coloidales suspendidas en el agua, para inducir la formación de un flóculo pesado y compacto que pueda ser fácilmente retenido en la sedimentación y no se rompa al pasar por la filtración.
- Encontrar la ecuación de dosificación óptima del coagulante (sulfato de aluminio) y la gráfica de correlación de turbiedad de agua cruda vs dosis óptima de coagulante.

V.1.2 Metodología:

Para cada caso particular de turbiedad inicial presentada por el agua cruda, se utilizarán diferentes intervalos de dosificación de coagulante, fijando como base preparar la concentración de sulfato de aluminio al 1%.

El procedimiento es el siguiente:

1. Prepare como base la concentración del sulfato de aluminio al 1%, de esta solución madre prepare diferentes dosificaciones en vasos de precipitados, de preferencia señalando para cada jarra el vaso de precipitado con la dosificación correspondiente.
2. Determine la temperatura, turbiedad, color y pH iniciales del agua cruda (muestra aproximada de 10 lt).

3. Coloque el agua de la muestra en las seis jarras, previamente medida la cantidad de agua con una bureta (agregar 1.5 lt para cada jarra).
4. Coloque debajo de los agitadores del aparato cada jarra.
5. Inicie la mezcla rápida graduando en el aparato la agitación a 100 rpm. Mediante un cronómetro controle el tiempo de mezcla rápida, es decir, en forma simultánea proceda a la inyección del sulfato de aluminio (coagulante) y mezcla rápida a 100 rpm durante 1 minuto, el tiempo de inyección debe ser 5 segundos máximo.
6. Terminado el tiempo de mezcla rápida, disminuir la velocidad de rotación de las paletas a 40 rpm iniciando así la mezcla lenta o período de floculación durante un tiempo de 24 minutos. Realice observaciones minuciosas de las características del flóculo producido, controlando tiempo de aparición y el Índice de Floculación de Willcomb, para cada jarra.
7. Terminado el tiempo de floculación, suspenda la agitación y extraiga con cuidado las paletas de cada jarra, iniciando en ese momento la sedimentación, dejando reposar las jarras por un período de 5-10 minutos. Una vez alcanzado este tiempo anote observaciones físicas presentadas en cada jarra.
8. Finalmente tomar muestras de aproximadamente 200 ml de cada jarra para realizar análisis de turbiedad, pH y color. Anote los resultados.
9. Prepare en función de las características prefijadas la siguiente prueba de jarras.

V.1.3 Evaluación:

Para realizar los análisis se utilizaron los siguientes equipos:

Prueba de Jarras : Phipps and Bird con agitadores múltiples.

Medir turbiedad : Turbidímetro Hach Modelo

Medir pH : Potenciómetro Corning, Modelo 7

Medir color : Patrones de comparación, Escala Pt-Co

La evaluación para encontrar la dosificación óptima de coagulante para cada caso particular de turbiedad de agua cruda, consiste en obtener un gráfico de turbiedad remanente de cada jarra vs dosificación de reactivo en cada análisis, se analiza la gráfica y se selecciona como dosis óptima los valores que producen el menor valor de turbiedad.

Los diversos datos de dosis óptima para cada turbiedad de agua cruda se analizan aplicando la teoría de los mínimos cuadrados para obtener las constantes "a" y "b" de la ecuación de la línea recta:

$$Y = a + bX$$

donde:

Y = log. de la turbiedad del agua

X = dosis óptima de coagulante (sulfato de aluminio)

Esta ecuación de dosificación óptima se utiliza para construir la gráfica semilogarítmica denominada Correlación de turbiedad de agua cruda vs dosis óptima de coagulante, de donde se

obtiene la recta que nos permite relacionar la turbiedad inicial de agua cruda con una amplia gama de valores de dosificación de coagulante (sulfato de aluminio).

U.1.4 Resultados:

A continuación se tabulan los valores obtenidos de cada prueba de jarras para las diferentes turbiedades iniciales presentadas por el agua cruda, señalando las características físicas presentadas antes de realizar la prueba.

U.1.5 Cálculos:

Obtención de la ecuación de dosificación óptima de coagulante.

Puntos críticos de las gráficas (mínimo valor de turbiedad residual)

Punto de cada corrida	1	2	3	4	5
To agua cruda (LNT)	46	32	30	22	15
Dosis coagulante (mg/lit)	30	30	28	21	24

Estos puntos corresponden a las dosis óptimas para cada turbiedad del agua cruda (T_o), que presentaron la menor turbiedad en su respectiva prueba de jarras, y se representan en las gráficas U.1.1 a U.1.5

Los diversos datos de dosis óptimas para cada turbiedad de agua cruda se analizan aplicando la teoría de los mínimos cuadrados para obtener las constantes "a" y "b", de la línea recta:

$$Y = a + bX$$

PRUEBA DE JARRAS V.1.1

ENSAYO: OBTENCION DE LA ECUACION DE DOSIFICACION OPTIMA DE COAGULANTE

ANALISIS DE AGUA CRUDA:

TURBIEDAD (UNT) = 46 pH (UNIDADES) = 7.7 COLOR(ESC.Pt-Co) = 36 TEMP = 20 °C

CARACTERISTICAS DE TRATAMIENTO:

CONDICIONES DEL AGUA CRUDA = NORMALES REACTIVO = NINGUNO
 VOLUMEN DE AGUA A TRATAR = 1.5 lt
 COAGULANTE (REACTIVO) = A12(SO4)3 14H2O 22 A1203
 CONCENTRACION COAGULANTE = 1.0 %
 DOSIFICACION COAGULANTE = VAR. ppm
 VOLUMEN DE DOSIFICACION = VAR. ml
 TIEMPO DE MEZCLA RAPIDA = 1 min AGITACION N = 100 rpm
 TIEMPO DE RETENCION = 24 min AGITACION N = 40 rpm
 TIEMPO DE SEDIMENTACION = 5 - 10 min
 VOLUMEN DE ANALISIS = 200 ml

ANALISIS DEL AGUA TRATADA:

PARAMETROS DE TRATAMIENTO					ANALISIS DE TRATAMIENTO			
NUMERO DE JARRA	DOSIF. COAG. (ppm)	CONC. COAG. (%)	VOL. DOSIF. (ml)	TIEMPO FLOCUL. (min)	TURBIEDAD (UNT)	pH (UNIDADES)	COLOR ESCALA (Pt-Co)	INDICE DE WILLCOMB
1	10	1.0	1.50	24	12.0	7.5	9	2
2	15	1.0	2.25	24	7.3	7.4	7	4
3	20	1.0	3.00	24	2.6	7.2	6	6
4	25	1.0	3.75	24	2.3	7.1	6	6
5	30	1.0	4.50	24	2.2	6.9	6	8
6	35	1.0	5.25	24	2.4	6.9	6	6

PRUEBA DE JARRAS V.1.2

ENSAYO: OBTENCION DE LA ECUACION DE DOSIFICACION OPTIMA DE COAGULANTE

ANALISIS DE AGUA CRUDA:

TURBIEDAD (UNT) = 32 pH (UNIDADES) = 7.2 COLOR(ESC.Pt-Co) = 30 TEMP = 20 °C

CARACTERISTICAS DE TRATAMIENTO:

CONDICIONES DEL AGUA CRUDA = NORMALES REACTIVO = NINGUNO
 VOLUMEN DE AGUA A TRATAR = 1.5 lt
 COAGULANTE (REACTIVO) = Al₂(SO₄)₃ 14H₂O 22 A1203
 CONCENTRACION COAGULANTE = 1.0 %
 DOSIFICACION COAGULANTE = VAR. ppm
 VOLUMEN DE DOSIFICACION = VAR. ml
 TIEMPO DE MEZCLA RAPIDA = 1 min AGITACION N = 100 rpm
 TIEMPO DE RETENCION = 24 min AGITACION N = 40 rpm
 TIEMPO DE SEDIMENTACION = 5 - 10 min
 VOLUMEN DE ANALISIS = 200 ml

ANALISIS DEL AGUA TRATADA:

PARAMETROS DE TRATAMIENTO					ANALISIS DE TRATAMIENTO			
NUMERO DE JARRA	DOSIF. COAG. (ppm)	CONC. COAG. (%)	VOL. DOSIF. (ml)	TIEMPO FLOCUL. (min)	TURBIEDAD (UNT)	pH (UNIDADES)	COLOR ESCALA (Pt-Co)	INDICE DE WILLCOB
1	18	1.0	2.70	24	5.0	7.30	6	4
2	21	1.0	3.15	24	4.1	7.20	6	6
3	24	1.0	3.60	24	2.9	7.30	6	6
4	27	1.0	4.05	24	3.1	7.20	6	8
5	30	1.0	4.50	24	2.6	7.20	6	8
6	33	1.0	4.95	24	3.0	7.25	6	6

PRUEBA DE JARRAS V.1.3

ENSAYO: OBTENCION DE LA ECUACION DE DOSIFICACION OPTIMA DE COAGULANTE

ANALISIS DE AGUA CRUDA:

TURBIEDAD (UNT) = 30 pH (UNIDADES) = 7.7 COLOR(ESC.PI-Co) = 30 TEMP = 20 °C

CARACTERISTICAS DE TRATAMIENTO:

CONDICIONES DEL AGUA CRUDA = NORMALES REACTIVO = NINGUNO
 VOLUMEN DE AGUA A TRATAR = 1.5 lt
 COAGULANTE (REACTIVO) = A12(SO4)3 14M20 22 A1203
 CONCENTRACION COAGULANTE = 1.0 %
 DOSIFICACION COAGULANTE = VAR. ppm
 VOLUMEN DE DOSIFICACION = VAR. ml
 TIEMPO DE MEZCLA RAPIDA = 1 min AGITACION N = 100 rpm
 TIEMPO DE RETENCION = 24 min AGITACION N = 40 rpm
 TIEMPO DE SEDIMENTACION = 5 - 10 min
 VOLUMEN DE ANALISIS = 200 ml

ANALISIS DEL AGUA TRATADA:

PARAMETROS DE TRATAMIENTO					ANALISIS DE TRATAMIENTO			
NUMERO DE JARRA	DOSIF. COAG. (ppm)	CONC. COAG. (%)	VOL. DOSIF. (ml)	TIEMPO FLOCUL. (min)	TURBIEDAD (UNT)	pH (UNIDADES)	COLOR ESCALA (Pt-Co)	INDICE DE WILLCOB
1	20	1.0	3.00	24	3.0	7.0	2	6
2	22	1.0	3.30	24	2.9	6.9	2	6
3	24	1.0	3.60	24	3.4	6.9	2	6
4	26	1.0	3.90	24	3.0	6.8	2	6
5	28	1.0	4.20	24	2.4	6.8	2	8
6	30	1.0	4.50	24	2.6	6.9	2	8

PRUEBA DE JARRAS V.1.4

ENSAYO: OBTENCION DE LA ECUACION DE DOSIFICACION OPTIMA DE COAGULANTE

ANALISIS DE AGUA CRUDA:

TURBIEDAD (UNT) = 22 pH (UNIDADES) = 7.8 COLOR(ESC.Pt-Co) = 20 TEMP = 19 °C

CARACTERISTICAS DE TRATAMIENTO:

CONDICIONES DEL AGUA CRUDA = NORMALES REACTIVO = NINGUNO
 VOLUMEN DE AGUA A TRATAR = 1.5 l
 COAGULANTE (REACTIVO) = $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$ 22 Al2O3
 CONCENTRACION COAGULANTE = 1.0 %
 DOSIFICACION COAGULANTE = VAR. ppm
 VOLUMEN DE DOSIFICACION = VAR. ml
 TIEMPO DE MEZCLA RAPIDA = 1 min AGITACION N = 100 rpm
 TIEMPO DE RETENCION = 24 min AGITACION N = 40 rpm
 TIEMPO DE SEDIMENTACION = 5 - 10 min
 VOLUMEN DE ANALISIS = 200 ml

ANALISIS DEL AGUA TRATADA:

PARAMETROS DE TRATAMIENTO					ANALISIS DE TRATAMIENTO			
NUMERO DE JARRA	DOSIF. COAG. (ppm)	CONC. COAG. (%)	VOL. DOSIF. (ml)	TIEMPO FLOCUL. (min)	TURBIEDAD (UNT)	pH (UNIDADES)	COLOR ESCALA (Pt-Co)	INDICE DE WILLCOB
1	18	1.0	2.70	24	3.8	7.05	3	8
2	21	1.0	3.15	24	3.7	6.95	3	8
3	24	1.0	3.60	24	4.0	6.85	3	8
4	27	1.0	4.05	24	4.2	6.85	3	6
5	30	1.0	4.50	24	5.8	6.80	5	6
6	33	1.0	4.95	24	5.8	6.70	2	6

PRUEBA DE JARRAS V.1.5

ENSAYO: OBTENCION DE LA ECUACION DE DOSIFICACION OPTIMA DE COAGULANTE

ANALISIS DE AGUA CRUDA:

TURBIEDAD (UNT) = 15 pH (UNIDADES) = 7.5 COLOR(ESC.PI-Co) = 8 TEMP = 20 °C

CARACTERISTICAS DE TRATAMIENTO:

CONDICIONES DEL AGUA CRUDA = NORMALES REACTIVO = NINGUNO
 VOLUMEN DE AGUA A TRATAR = 1.5 lt
 COAGULANTE (REACTIVO) = A12(SO4)3 14H2O 22 A12O3
 CONCENTRACION COAGULANTE = 1.0 %
 DOSIFICACION COAGULANTE = VAR. ppm
 VOLUMEN DE DOSIFICACION = VAR. ml
 TIEMPO DE MEZCLA RAPIDA = 1 min AGITACION N = 100 rpm
 TIEMPO DE RETENCION = 24 min AGITACION N = 40 rpm
 TIEMPO DE SEDIMENTACION = 5 - 10 min
 VOLUMEN DE ANALISIS = 200 ml

ANALISIS DEL AGUA TRATADA:

PARAMETROS DE TRATAMIENTO					ANALISIS DE TRATAMIENTO			
NUMERO DE JARRA	DOSIF. COAG. (ppm)	CONC. COAG. (%)	VOL. DOSIF. (ml)	TIEMPO FLOCUL. (min)	TURBIEDAD (UNT)	pH (UNIDADES)	COLOR ESCALA (Pt-Co)	INDICE DE WILLCOBS
1	18	1.0	2.70	24	2.5	7.00	1	6
2	21	1.0	3.15	24	2.1	6.95	1	6
3	24	1.0	3.60	24	1.5	6.90	1	8
4	27	1.0	4.05	24	1.8	6.80	1	8
5	30	1.0	4.50	24	1.7	6.75	1	8
6	33	1.0	4.95	24	3.4	6.70	1	6

TABLA V.1.1

TURBIEDAD REMANENTE VS DOSIFICACION DE COAGULANTE

To (UNT)	46	32	30	22	15
DOSIS DE COAGULANTE	Tf (UNT)				
10	12.0	---	---	---	---
15	7.3	---	---	---	---
18	---	5.0	---	3.8	2.5
20	2.6	---	3.0	---	---
21	---	4.1	---	3.7	2.1
22	---	---	2.9	---	---
24	---	2.9	3.4	4.0	1.5
25	2.25	---	---	---	---
26	---	---	3.0	---	---
27	---	3.1	---	4.2	1.8
28	---	---	2.4	---	---
30	2.2	2.6	2.6	5.8	1.7
33	---	3.0	---	5.8	3.4
35	2.4	---	---	---	---

DOSIS DE COAGULANTE (SULFATO DE ALUMINIO) UNIDADES = mg/l t = ppm

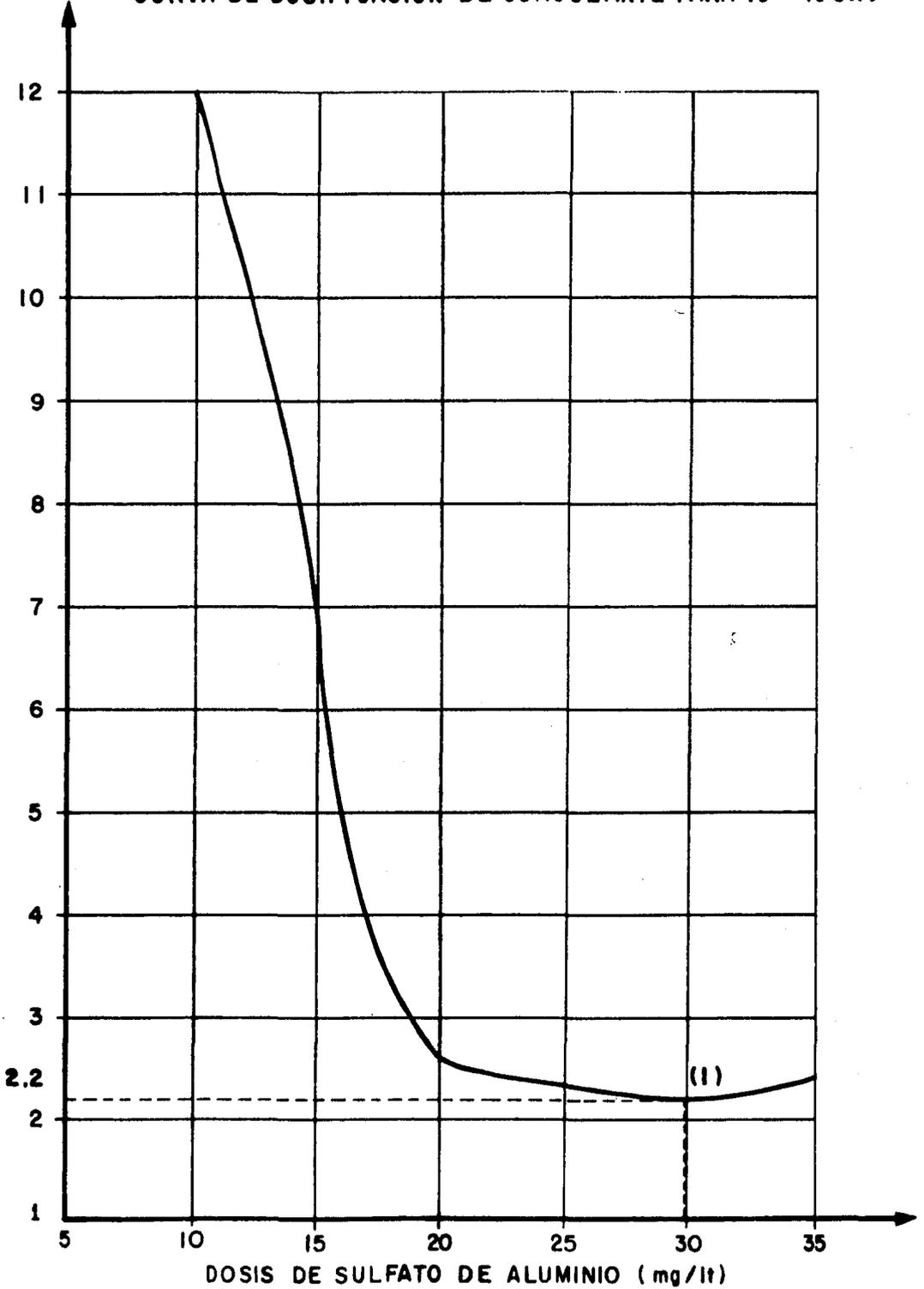
CONCENTRACION DE LA SOLUCION DE COAGULANTE = 1 %

Tf = TURBIEDAD REMANENTE DEL AGUA TRATADA (UNT)

To = TURBIEDAD DEL AGUA CRUDA (UNT)

Gráfica V.1.1

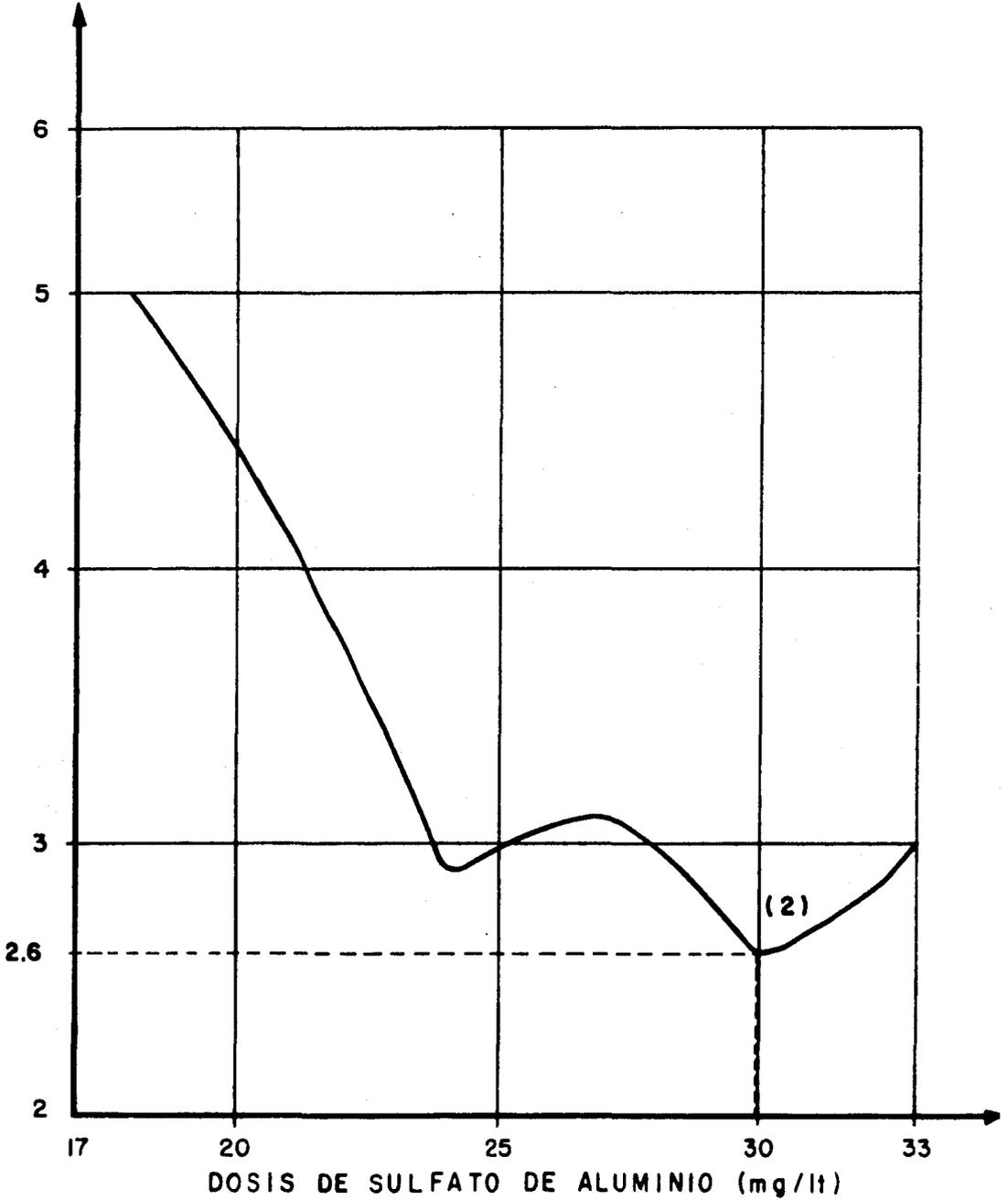
Tf (UNT) CURVA DE DOSIFICACION DE COAGULANTE PARA $T_0 = 46$ UNT



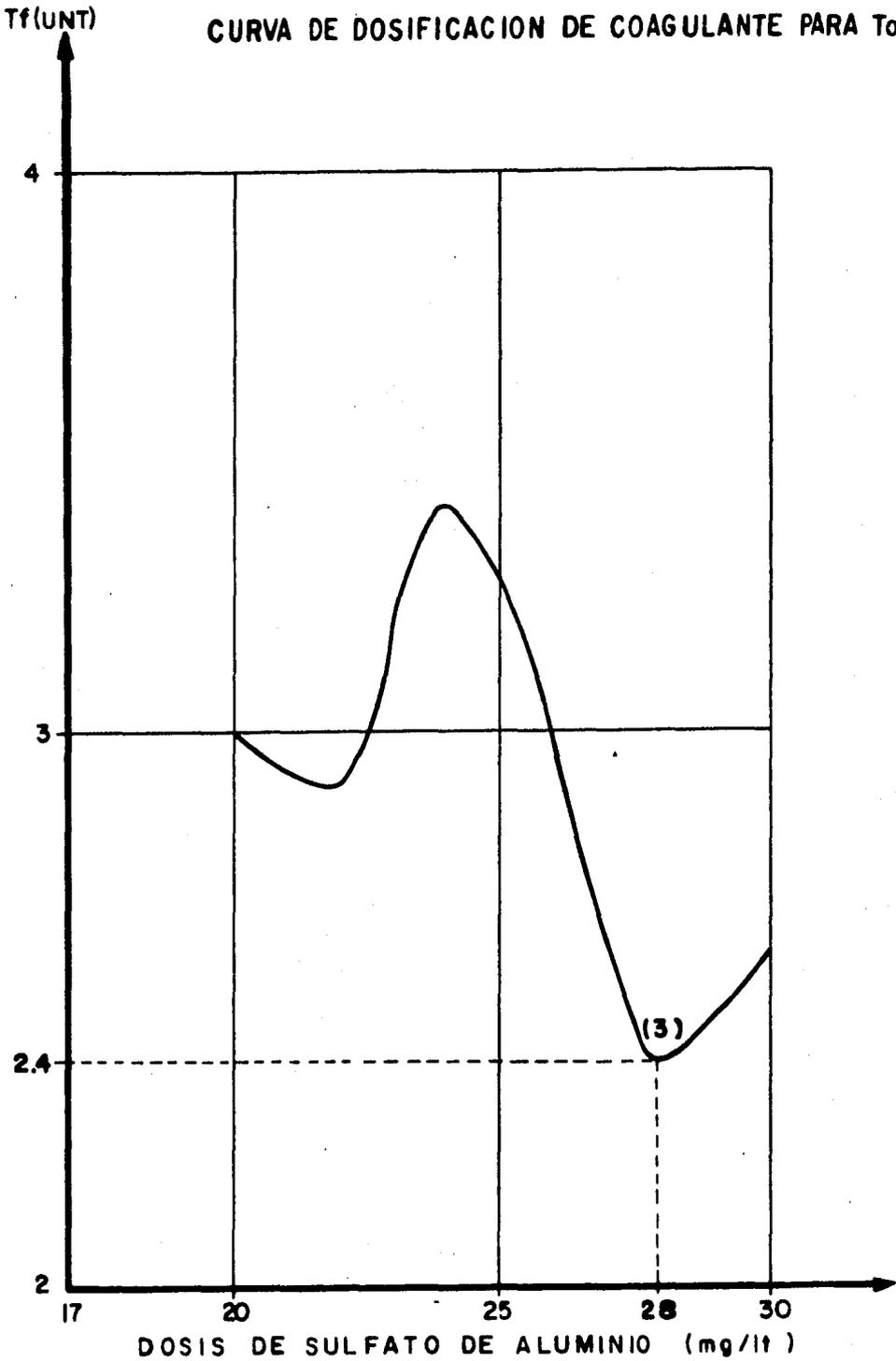
Gráfica V.1.2

Tf(UNT)

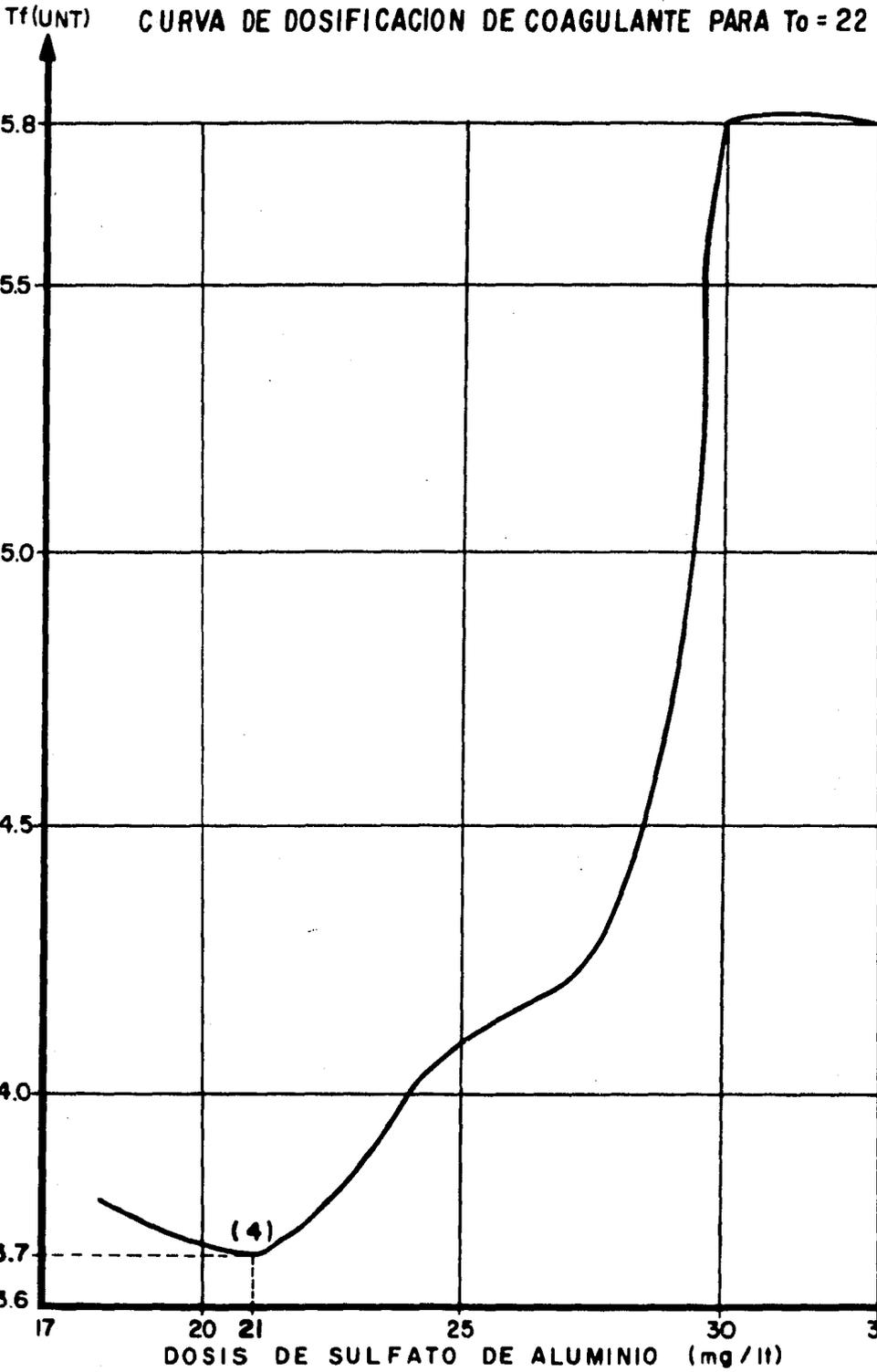
CURVA DE DOSIFICACION DE COAGULANTE PARA $T_0 = 32$



CURVA DE DOSIFICACION DE COAGULANTE PARA $T_0=30$

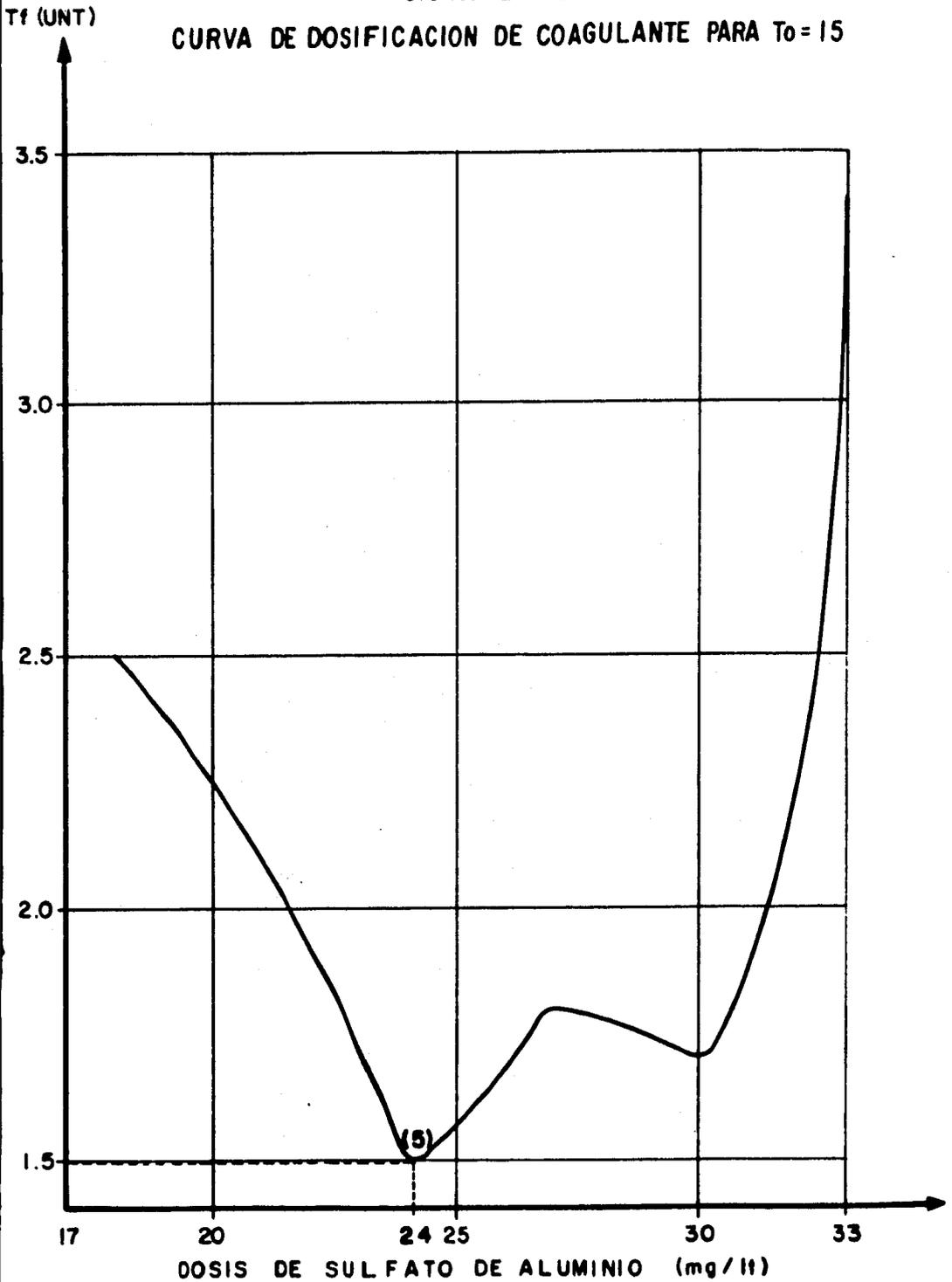


Gráfica V.1.4



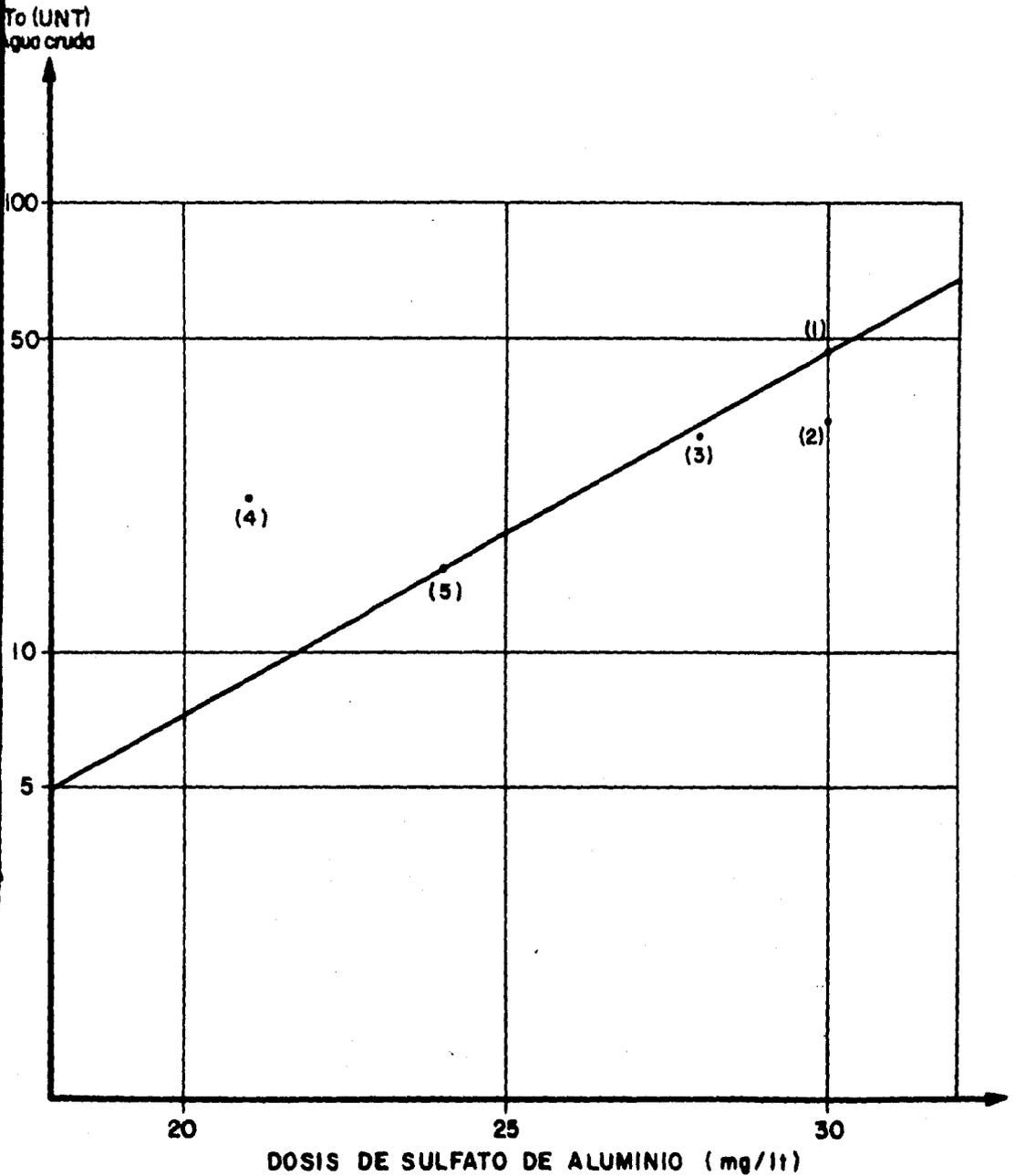
Gráfica X.1.5

CURVA DE DOSIFICACION DE COAGULANTE PARA $T_0 = 15$



Gráfica V.1.6

CORRELACION DE TURBIEDAD DE AGUA CRUDA VS DOSIS OPTIMA DE COAGULANTE



Punto de cada recta	1	2	3	4	5
Y = log To	1.6628	1.5051	1.4771	1.3424	1.1761
X = C (mg/l)	30	30	28	21	24

Aplicando mfnimos cuadrados, obtenemos:

$$a = 0.4761 \text{ (ordenada al origen)}$$

$$b = 0.0360 \text{ (pendiente de la línea recta)}$$

Por lo tanto, la Ecuación de Dosificación Óptima de Coagulante es:

$$\log T_o = 0.4761 + 0.0360 (C)$$

Con esta ecuación, se obtiene la Correlación de Turbiedad de Agua Cruda con dosis ótima de coagulante, la línea recta que se obtiene se representa en la gráfica U.1.6

U.2 DETERMINACION DEL INTERVALO DE pH OPTIMO DE COAGULACION

U.2.1 Objetivo:

Encontrar el intervalo de pH mediante el cual se obtengan buenos resultados de dosificación de coagulante, ajustando el pH del agua cruda bajo condiciones de agua acidulada y agua alcalinizada.

U.2.2 Metodología:

La metodología consiste en realizar titulaciones volumétricas por separado de ácido sulfúrico 0.02 N e hidróxido de sodio 0.02 N al agua cruda para ajustar el pH a un intervalo de 4.0 a 10.0 unidades. Una vez conocidas las cantidades de ácido sulfúrico como de hidróxido de sodio para el ajuste del pH, se procederá a realizar las pruebas de jarras. De acuerdo a la turbiedad del agua cruda presentada en el muestreo se utilizará la dosificación óptima del coagulante (sulfato de aluminio).

Procedimiento:

1. A una muestra de agua cruda, determinar pH inicial.
2. Fijar un intervalo amplio de comparación de escala de pH.
3. Colocar en una bureta de 50 ml H_2SO_4 0.02 N.
4. Realizar pruebas al agua cruda de pH cada 5 ml de ácido agregado durante la titulación.
5. Anotar en una tabla el pH medido y la cantidad de ácido sulfúrico agregado
6. Fijar un intervalo amplio de comparación de pH básico.
7. Colocar en otra bureta de 50 ml, NaOH 0.02 N

8. Realizar pruebas pH (lectura del potenciómetro) vs ml de NaOH cada 1 ml agregado.
9. Anotar en una tabla el pH básico medido y la cantidad de NaOH agregado para el ajuste.
10. Realizar a una muestra de agua cruda, análisis de turbiedad, pH, color y temperatura iniciales.
11. Seleccionar en función de la turbiedad inicial del agua cruda, la dosificación óptima de coagulante para realizar la prueba de Jarras.
12. Seguir el mismo procedimiento de aplicación de prueba de Jarras del ensayo anterior V.1 Obtención de la Ecuación de dosificación óptima de coagulante.

V.2.3 Evaluación:

El equipo utilizado para realizar los análisis es el descrito en el inciso anterior V.1

Para la obtención del pH óptimo de coagulación, se tabulan los resultados y se construye una gráfica de turbiedad remanente vs pH ajustado del agua cruda, se analiza la gráfica y se determina el intervalo ó pH óptimo de coagulación, en función de los valores que producen el menor valor de turbiedad remanente.

V.2.4 Resultados:

Titulaciones de ácido sulfúrico e hidróxido de sodio para el ajuste del pH del agua cruda:

Volumen de titulación para bajar pH

Acido = H₂SO₄ 0.02 N, Agua cruda: pH = 7.70

Vaso No.	1	2	3	4	5	6	7
H ₂ SO ₄ (ml)	0	10	30	35	40	49	60
pH	7.7	6.95	6.40	6.20	6.00	5.55	4.20

Volumen de titulación para aumentar el pH

Base = NaOH 0.02 N, Agua cruda: pH = 7.70

Vaso No.	1	2	3	4	5	6
NaOH (ml)	0	1.4	3.3	7.4	16.4	31.6
pH	7.7	7.9	8.4	8.9	9.45	9.9

Los volúmenes en las titulaciones para ambas situaciones son acumulativos.

En ambas situaciones se aplicó prueba de Jarras para verificar la influencia del pH en el agua de la presa "Necaxa" cuando se aplica coagulante.

Los resultados obtenidos se tabulan en el inciso U.2.5. Las gráficas U.2.1, U.2.2 y U.2.3, representan el comportamiento del agua cruda bajo condiciones ácidas y alcalinas.

U.2.5 Cálculos:

Obtención de la gráfica de turbiedad residual vs pH del agua cruda

Titulaciones realizadas:

Dosificación con pH ácido, $T_0 = 15.0$

Vaso No.	1	2	3	4	5	6	7
pH inicial (ajustado)	7.70	6.95	6.40	6.20	6.00	5.55	4.20
Tf (UNT)	1.40	2.40	8.80	15.00	17.00	11.00	9.90
pH final (tratamiento)	6.83	6.52	6.04	5.80	5.40	4.90	4.20

Dosificación con pH alcalino, $T_0 = 15.0$

Vaso No.	1	2	3	4	5	6
pH inicial (ajustado)	7.70	7.95	8.40	8.90	9.45	9.90
Tf (UNT)	2.00	1.45	1.70	1.30	4.50	13.00
pH final (tratamiento)	6.90	7.00	7.10	7.30	7.90	9.20

PRUEBA DE JARRAS V.2.1

ENSAYO: DETERMINACION DEL pH OPTIMO DE COAGULACION

ANALISIS DE AGUA CRUDA:

TURBIEDAD (UNT) = 15.0 pH (UNIDADES) = 7.7 COLOR(ESC.Pt-Co) = 16 TEMP = 19 °C

CARACTERISTICAS DE TRATAMIENTO:

CONDICIONES DEL AGUA CRUDA = ACIDULADA REACTIVO = H2SO4 0.02 N
 VOLUMEN DE AGUA A TRATAR = 1.5 lt
 COAGULANTE (REACTIVO) = A12(SO4)3 14H2O 22 A1203
 CONCENTRACION COAGULANTE = 1.0 %
 DOSIFICACION COAGULANTE = 21 ppm
 VOLUMEN DE DOSIFICACION = 3.15 ml
 TIEMPO DE MEZCLA RAPIDA = 1 min AGITACION N = 100 rpm
 TIEMPO DE RETENCION = 24 min AGITACION N = 40 rpm
 TIEMPO DE SEDIMENTACION = 5 - 10 min
 VOLUMEN DE ANALISIS = 200 ml

ANALISIS DEL AGUA TRATADA:

PARAMETROS DE TRATAMIENTO					ANALISIS DE TRATAMIENTO			
NUMERO DE JARRA	DOSIF. COAG. (ppm)	CONC. COAG. (%)	VOL. DOSIF. (ml)	TIEMPO FLOCUL. (min)	TURBIEDAD (UNT)	pH (UNIDADES)	COLOR ESCALA (Pt-Co)	INDICE DE WILLCOMB
1	21	1.0	3.15	24	1.4	6.83	1	8
2	21	1.0	3.15	24	2.4	6.52	2	6
3	21	1.0	3.15	24	8.8	6.04	3	4
4	21	1.0	3.15	24	15.0	5.80	4	2
5	21	1.0	3.15	24	17.8	5.40	11	2
6	21	1.0	3.15	24	11.0	4.90	7	4

PRUEBA DE JARRAS V.2.2

ENSAYO: DETERMINACION DEL pH OPTIMO DE COAGULACION

ANALISIS DE AGUA CRUDA:

TURBIEDAD (UNT) = 15.0 pH (UNIDADES) = 7.7 COLOR(ESC.Pt-Co) = 15 TEMP = 20 °C

CARACTERISTICAS DE TRATAMIENTO:

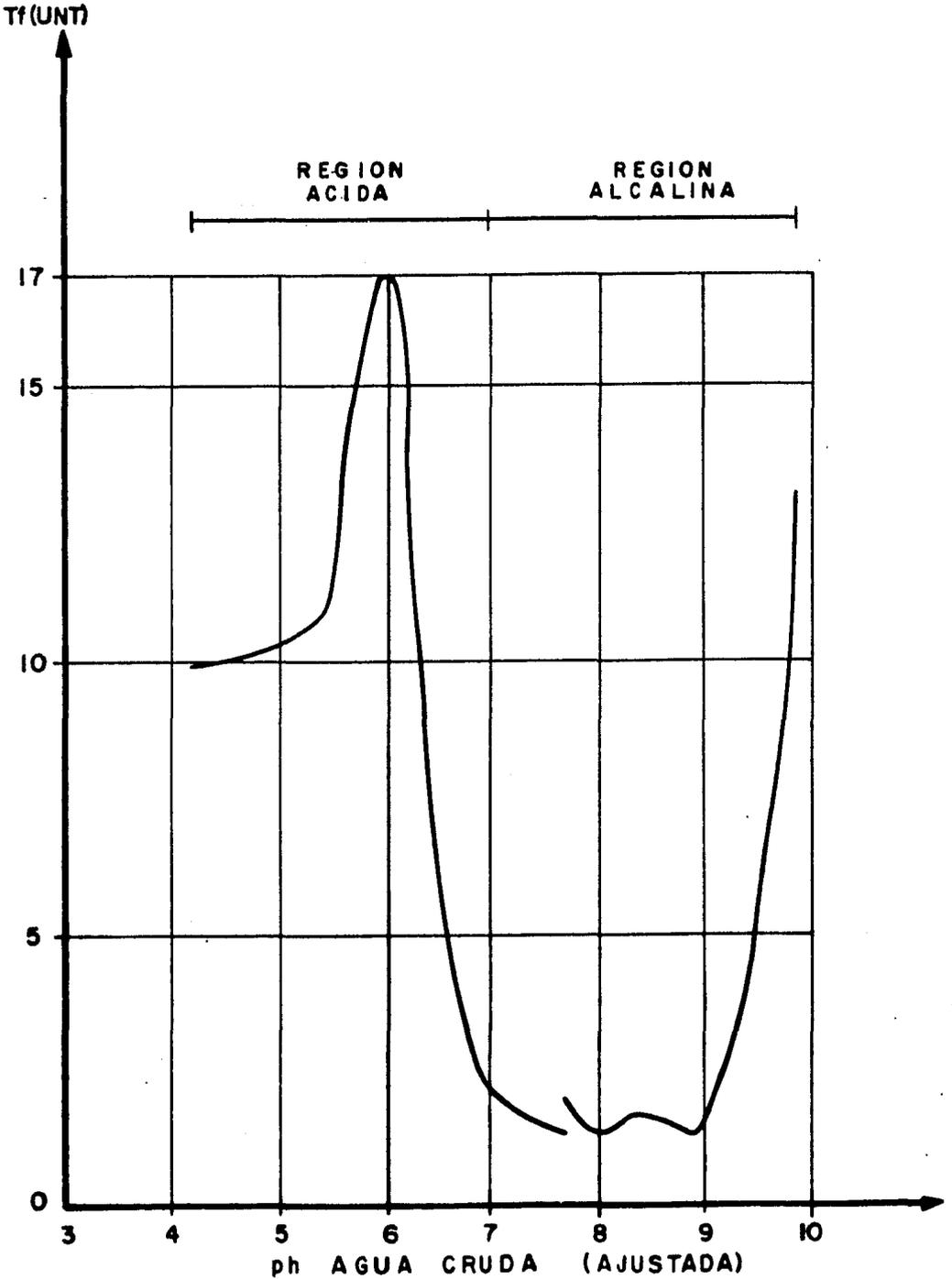
CONDICIONES DEL AGUA CRUDA = BASICA REACTIVO = NaOH 0.02 N
 VOLUMEN DE AGUA A TRATAR = 1.5 lt
 COAGULANTE (REACTIVO) = Al2(SO4)3 14H2O 22 Al2O3
 CONCENTRACION COAGULANTE = 1.0 %
 DOSIFICACION COAGULANTE = 21 ppm
 VOLUMEN DE DOSIFICACION = 3.15 ml
 TIEMPO DE MEZCLA RAPIDA = 1 min AGITACION N = 100 rpm
 TIEMPO DE RETENCION = 24 min AGITACION N = 40 rpm
 TIEMPO DE SEDIMENTACION = 5 - 10 min
 VOLUMEN DE ANALISIS = 200 ml

ANALISIS DEL AGUA TRATADA:

PARAMETROS DE TRATAMIENTO					ANALISIS DE TRATAMIENTO			
NUMERO DE JARRA	DOSIF. COAG. (ppm)	CONC. COAG. (%)	VOL. DOSIF. (ml)	TIEMPO FLOCUL. (min)	TURBIEDAD (UNT)	pH (UNIDADES)	COLOR ESCALA (Pt-Co)	INDICE DE WILLCOFF
1	21	1.0	3.15	24	2.00	6.90	2	8
2	21	1.0	3.15	24	1.45	7.00	2	6
3	21	1.0	3.15	24	1.70	7.10	1	6
4	21	1.0	3.15	24	1.30	7.30	1	8
5	21	1.0	3.15	24	4.50	7.90	5	2
6	21	1.0	3.15	24	13.00	9.20	15	0

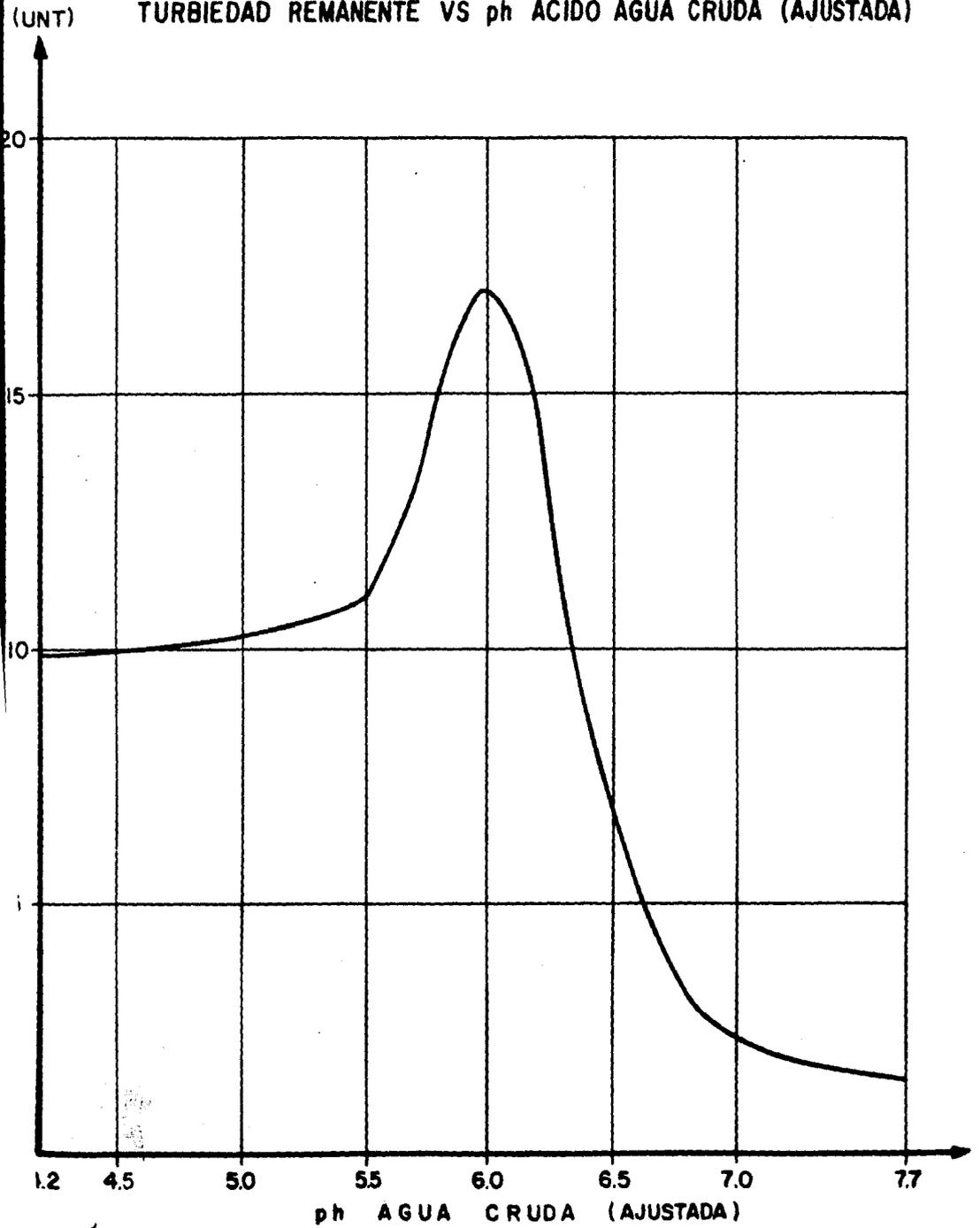
Gráfica V.2.1

TURBIEDAD REMANENTE VS ph ACIDO AGUA CRUDA (AJUSTADA)

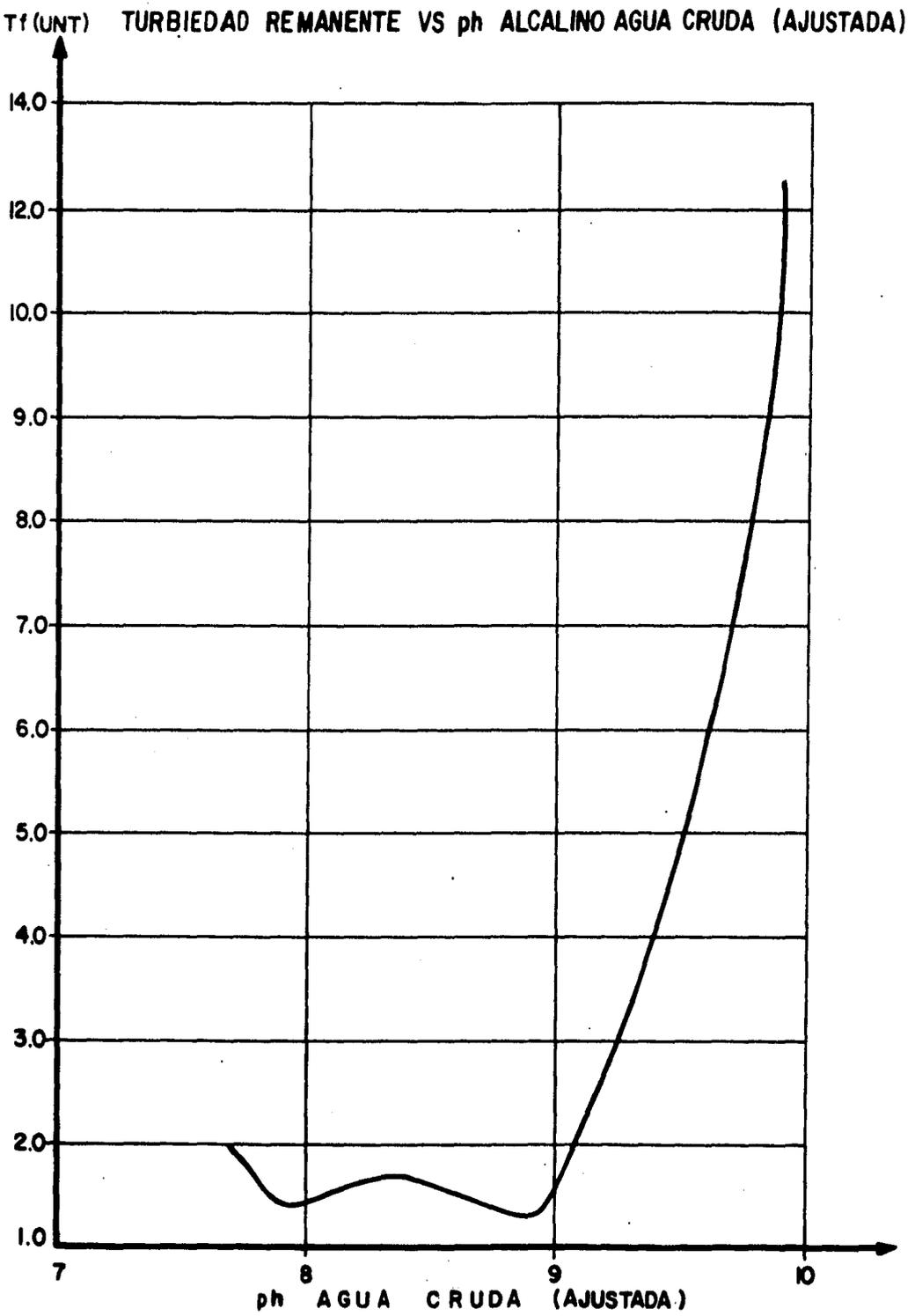


Gráfica V. 2.2

TURBIEDAD REMANENTE VS ph ACIDO AGUA CRUDA (AJUSTADA)



Gráfica V. 2.3



V.3 IMPORTANCIA DE LOS POLIELECTROLITOS EN LA COAGULACION

Existe una gran variedad de polielectrolitos (ayudantes de coagulación), que pueden utilizarse en el tratamiento de agua. Algunos sólo pueden utilizarse en procesos industriales, porque son tóxicos. Otros por el contrario, están aprobados para uso en agua potable.

Desde el punto de vista sanitario, la primer condición que un polielectrolito debe satisfacer, es que no sea peligroso para la salud. La Agencia para la Protección del Ambiente de los Estados Unidos (EPA), publica periódicamente listas de polielectrolitos que pueden usarse en aguas de consumo.

Sin embargo, el hecho de que aparezca en las listas un determinado polielectrolito, no significa que se obtengan buenos resultados como ayudante de coagulación. Al contrario, algunos no sólo no ayudan, sino que a veces perjudican la coagulación, debido a que con cierta agua cruda dispersan el flóculo formado.

Todo depende de la carga eléctrica que posean, puesto que pueden ser aniónicos, catiónicos y no iónicos, así como de la carga eléctrica de las partículas de la suspensión y la energía necesaria para la adsorción de los polímeros.

Por lo tanto un criterio de selección, para poder decidir cuál es el polielectrolito que mejor se adapta a la calidad del agua

que se va a flocular, es por medio de la prueba de jarras realizadas con un buen número de polielectrolitos (líquidos y/o sólidos), hasta encontrar el que más convenga tanto desde el punto de vista técnico como económico.

El resultado de las pruebas de jarras puede indicar, en ocasiones, que no conviene utilizar ayudantes de coagulación, por un lado, o no son suficientemente eficientes por otro, que finalmente repercutirían en encarecer el costo de producción del agua.

U.3.1 Objetivo:

El objeto de realizar pruebas de jarras utilizando polielectrolitos, es el comparar la eficiencia en la remoción de turbiedad y/o color, de varios polielectrolitos, a fin de escoger el que mejor se adapte a las características del agua que se quiere analizar.

U.3.2 Metodología:

La metodología empleada para realizar los ensayos de prueba de jarras utilizando polielectrolito es el siguiente procedimiento:

1. Efectuar una prueba de jarras en la forma convencional, para determinar la dosis óptima de coagulante metálico (sulfato de aluminio), o en función de la turbiedad inicial del agua cruda, consultando la gráfica de turbiedad del agua cruda vs dosis óptima de coagulante (realizada en el inciso U.1), y seleccione la dosificación óptima.

2. Preparar una nueva prueba de jarras, en la que se agregue la misma dosis óptima de coagulante a todas las jarras o vasos, pero añadiendo la siguiente dosis de polielectrolito, excepto a la primera jarra, entre 0.1 - 1.0 mg/lit o entre 0.01 - 0.5 mg/lit, de acuerdo con las recomendaciones de los fabricantes. El vaso al cual no se le agrega polielectrolito, servirá de punto de comparación con los demás vasos.
3. Durante el proceso determine el Índice de Willcomb y el tiempo de aparición del flóculo producido de cada jarra.
4. Suspendida la agitación al cabo de 24 minutos, dejar sedimentar el agua por 10 - 15 minutos, tomar el sobrenadante y determinar la turbiedad y/o color coagulante y el pH residual. Repetir con el mayor número de polielectrolitos disponibles, a fin de hacer una selección preliminar.

U.3.3 Evaluación.

Una vez realizados los ensayos de prueba de jarras, con el que mejor resultados presente, se pueden hacer nuevos ensayo disminuyendo la dosis de coagulante metálico (por ejemplo 75% del óptimo) y agregando polielectrolito en cantidad variable, o en su defecto, manteniendo constante la dosis de polielectrolito y variando la dosis de coagulante hasta obtener la combinación más económica de coagulante/polielectrolito (ver Experimentos de Laboratorio Propuestos inciso VI.2, capítulo VI).

La evaluación se realiza graficando la turbiedad remanente vs dosis de ayudante de coagulación (mg/lt), se seleccionan los valores que producen el menor valor de turbiedad remanente como dosis óptima de ayudante de coagulación.

V.3.4 Importancia de la aplicación de Polielectrolitos.

La importancia de la adición adecuada y controlada de polielectrolitos como ayudantes de coagulación y/o floculación, estriba en que pueden ayudar a reducir los costos de tratamiento, por las bajas dosis que se emplean y al aumento de la eficiencia en las carreras de filtración.

Si se selecciona el polímero más adecuado, el tipo de flóculo permite la formación de lodos, que pueden ser fácilmente disponibles en el proceso de sedimentación, permitiendo así una clarificación más eficiente.

U.4 DETERMINACION DE LA CONCENTRACION OPTIMA DE COAGULANTE

U.4.1 Objetivo:

Para diferentes tiempos de retención experimentar un intervalo de concentración de solución de coagulante prefijado, que nos permita conocer la concentración óptima para cada tiempo de retención, considerando como parámetro básico en función de la turbiedad inicial del agua cruda la dosificación y el pH óptimos de coagulación.

U.4.2 Metodología:

Para los siguientes tiempos de retención (4, 5, 6, y 7 min.), experimentar el siguiente intervalo de concentración de coagulante (0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 y 5.0%).

Procedimiento:

1. A una muestra de agua cruda, determinar la turbiedad inicial T_0 , pH, color y temperatura iniciales.
2. Se llenan las seis jarras del equipo con el agua cruda (1.5 lt a cada jarra).
3. Se fija la dosis óptima de coagulante y pH óptimo de tratamiento.
4. Se calcula el volumen de dosificación de coagulante de acuerdo a la concentración seleccionada para cada jarra.
5. Tener preparada una jeringa hipodérmica para cada vaso con el volumen de dosificación que le corresponda.
6. Se fija el tiempo de floculación (por ejemplo 4 minutos).
7. Se pone a funcionar el equipo a la velocidad de 100 rpm.

8. Se aplica la inyección de la solución de coagulante, iniciándose la mezcla rápida, durante 1 minuto.
9. Al finalizar la mezcla rápida, se inicia el proceso de floculación, para lo cual se modifica la velocidad de agitación a 40 rpm, en función del tiempo de retención (por ejemplo 24 minutos).
10. Durante el tiempo de floculación realizar observaciones del floculo producido aplicando la técnica del Índice de Willcomb.
11. Terminado el tiempo de floculación (mínimo acumulado), suspender la agitación y extraer las paletas de cada vaso, en ese momento se inicia la sedimentación, dejando reposar los vasos por un período de 5 - 10 minutos.
12. Tomar muestras de aproximadamente 200 ml de cada jarra y determinar la turbiedad residual Tf (UNT), pH y color resultado del tratamiento.
13. Preparar para los siguientes tiempos de retención parciales (TR = 5, 6, y 7 minutos) las siguientes pruebas de Jarras, utilizando las mismas concentraciones aplicadas a cada Jarra 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 y 5.0%.

V.4.3 Evaluación.

La evaluación consiste en realizar una tabla de resultados para cada tiempo de retención, siguiendo la construcción de una gráfica de turbiedad remanente vs porcentaje de concentración de coagulante, para los diferentes tiempos de retención, se analiza la gráfica y se fija la concentración o intervalo de concentración de solución de coagulante expresado en porcentaje, que nos proporcione los mejores resultados para la

planta de tratamiento.

El intervalo de concentración se fijará considerando los valores que producen el menor valor de turbiedad remanente en el análisis.

De acuerdo a la turbiedad de agua cruda ($T_0 = 14-15$ UNT), se juzgó conveniente utilizar como dosificación óptima 21 ppm de coagulante metálico, así como, de acuerdo a la interpretación de la curva de turbiedad remanente vs pH, es conveniente utilizar como pH óptimo para este ensayo, el pH que presentó el agua cruda (pH = 7.7).

V.4.4 Resultados.

Los resultados obtenidos para cada tiempo de retención parcial, se presentan en las gráficas V.4.1 a V.4.4, así como las características iniciales del agua cruda, se tabulan a continuación en el inciso V.4.5 (Cálculos).

U.4.5 Cálculos:

Obtención de la Gráfica de Turbiedad Remanente vs Concentración de Coagulante

 TR. mínimo parcial = 4 min. To = 14 (UNT)

Vaso No.	1	2	3	4	5	6
Conc. (%)	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	5.0
Tf (UNT)	2.3	2.25	2.25	2.40	2.15	1.90

TR. parcial = 5 min. To = 15 (UNT)

Vaso No.	1	2	3	4	5	6
Conc. (%)	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	5.0
Tf (UNT)	2.6	1.5	1.8	1.6	1.6	1.5

TR. parcial = 6 min. To = 14.5 (UNT)

Vaso No.	1	2	3	4	5	6
Conc. (%)	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	5.0
Tf (UNT)	1.6	1.3	1.4	1.5	1.4	1.6

TR. máximo parcial = 7 min. To = 15 (UNT)

Vaso No.	1	2	3	4	5	6
Conc. (%)	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	5.0
Tf (UNT)	2.3	1.6	1.15	1.5	1.7	1.5

PRUEBA DE JARRAS V.4.1

ENSAYO: DETERMINACION DE LA CONCENTRACION OPTIMA DE COAGULANTE

ANALISIS DE AGUA CRUDA:

TURBIEDAD (UNT) = 14 pH (UNIDADES) = 7.7 COLOR(ESC.Pt-Co) = 14 TEMP = 21 °C

CARACTERISTICAS DE TRATAMIENTO:

CONDICIONES DEL AGUA CRUDA = NORMALES REACTIVO = NINGUNO
 VOLUMEN DE AGUA A TRATAR = 1.5 lt
 COAGULANTE (REACTIVO) = A12(SO4)3 14H2O 22 A1203
 CONCENTRACION COAGULANTE = VAR. %
 DOSIFICACION COAGULANTE = 21 ppm
 VOLUMEN DE DOSIFICACION = VAR. ml
 TIEMPO DE MEZCLA RAPIDA = 1 min AGITACION N = 100 rpm
 TIEMPO DE RETENCION = 4 min AGITACION N = 40 rpm
 TIEMPO DE SEDIMENTACION = 5 - 10 min
 VOLUMEN DE ANALISIS = 200 ml

ANALISIS DEL AGUA TRATADA:

PARAMETROS DE TRATAMIENTO					ANALISIS DE TRATAMIENTO			
NUMERO DE JARRA	DOSIF. COAG. (ppm)	CONC. COAG. (%)	VOL. DOSIF. (ml)	TIEMPO FLOCUL. (min)	TURBIEDAD (UNT)	pH (UNIDADES)	COLOR ESCALA (Pt-Co)	INDICE DE MILLICOMB
1	21	0.5	6.30	4	2.30	7.00	6	6
2	21	1.0	3.15	4	2.25	6.85	8	6
3	21	1.5	2.10	4	2.25	6.90	6	6
4	21	2.0	1.60	4	2.40	6.90	6	6
5	21	3.0	1.05	4	2.15	6.90	6	8
6	21	5.0	0.63	4	1.90	6.90	6	8

PRUEBA DE JARRAS U.4.2

ENSAYO: DETERMINACION DE LA CONCENTRACION OPTIMA DE COAGULANTE

ANALISIS DE AGUA CRUDA:

TURBIEDAD (UNT) = 15 pH (UNIDADES) = 7.7 COLOR(ESC.Pt-Co) = 14 TEMP = 20 °C

CARACTERISTICAS DE TRATAMIENTO:

CONDICIONES DEL AGUA CRUDA = NORMALES REACTIVO = NINGUNO
 VOLUMEN DE AGUA A TRATAR = 1.5 lt
 COAGULANTE (REACTIVO) = A12(SO4)3 14H2O 22 A1203
 CONCENTRACION COAGULANTE = VAR. %
 DOSIFICACION COAGULANTE = 21 ppm
 VOLUMEN DE DOSIFICACION = VAR. ml
 TIEMPO DE MEZCLA RAPIDA = 1 min ABITACION N = 100 rpm
 TIEMPO DE RETENCION = 5 min ABITACION N = 40 rpm
 TIEMPO DE SEDIMENTACION = 5 - 10 min
 VOLUMEN DE ANALISIS = 200 ml

ANALISIS DEL AGUA TRATADA:

PARAMETROS DE TRATAMIENTO					ANALISIS DE TRATAMIENTO			
NUMERO DE JARRA	DOSIF. COAG. (ppm)	CONC. COAG. (%)	VOL. DOSIF. (ml)	TIEMPO FLOCUL. (min)	TURBIEDAD (UNT)	pH (UNIDADES)	COLOR ESCALA (Pt-Co)	INDICE DE WILLCOXB
1	21	0.5	6.30	5	2.6	6.95	1	4
2	21	1.0	3.15	5	1.5	6.90	1	6
3	21	1.5	2.10	5	1.8	6.90	1	6
4	21	2.0	1.60	5	1.6	6.90	1	8
5	21	3.0	1.05	5	1.6	6.90	1	6
6	21	5.0	0.63	5	1.5	6.90	1	6

PRUEBA DE JARRAS U.4.3

ENSAYO: DETERMINACION DE LA CONCENTRACION OPTIMA DE COAGULANTE

ANALISIS DE AGUA CRUDA:

TURBIEDAD (UNT) = 14.5 pH (UNIDADES) = 7.7 COLOR(ESC.Pt-Co) = 14 TEMP = 20 °C

CARACTERISTICAS DE TRATAMIENTO:

CONDICIONES DEL AGUA CRUDA = NORMALES REACTIVO = NINGUNO
 VOLUMEN DE AGUA A TRATAR = 1.5 lt
 COAGULANTE (REACTIVO) = A12(SO4)3 14H2O 22 A1203
 CONCENTRACION COAGULANTE = VAR. %
 DOSIFICACION COAGULANTE = 2l ppm
 VOLUMEN DE DOSIFICACION = VAR. ml
 TIEMPO DE MEZCLA RAPIDA = 1 min AGITACION N = 100 rpm
 TIEMPO DE RETENCION = 6 min AGITACION N = 40 rpm
 TIEMPO DE SEDIMENTACION = 5 - 10 min
 VOLUMEN DE ANALISIS = 200 ml

ANALISIS DEL AGUA TRATADA:

PARAMETROS DE TRATAMIENTO					ANALISIS DE TRATAMIENTO			
NUMERO DE JARRA	DOSIF. COAG. (ppm)	CONC. COAG. (%)	VOL. DOSIF. (ml)	TIEMPO FLOCUL. (min)	TURBIEDAD (UNT)	pH (UNIDADES)	COLOR ESCALA (Pt-Co)	INDICE DE WILLCOMB
1	2l	0.5	6.30	6	1.6	6.90	1	4
2	2l	1.0	3.15	6	1.3	6.90	1	6
3	2l	1.5	2.10	6	1.4	6.90	1	6
4	2l	2.0	1.60	6	1.5	6.90	1	4
5	2l	3.0	1.05	6	1.4	6.90	1	6
6	2l	5.0	0.63	6	1.6	6.95	1	8

PRUEBA DE JARRAS V.4.4

ENSAYO: DETERMINACION DE LA CONCENTRACION OPTIMA DE COAGULANTE

ANALISIS DE AGUA CRUDA:

TURBIEDAD (UNT) = 15.0 pH (UNIDADES) = 7.65 COLOR(ESC.Pt-Co) = 14 TEMP = 19 °C

CARACTERISTICAS DE TRATAMIENTO:

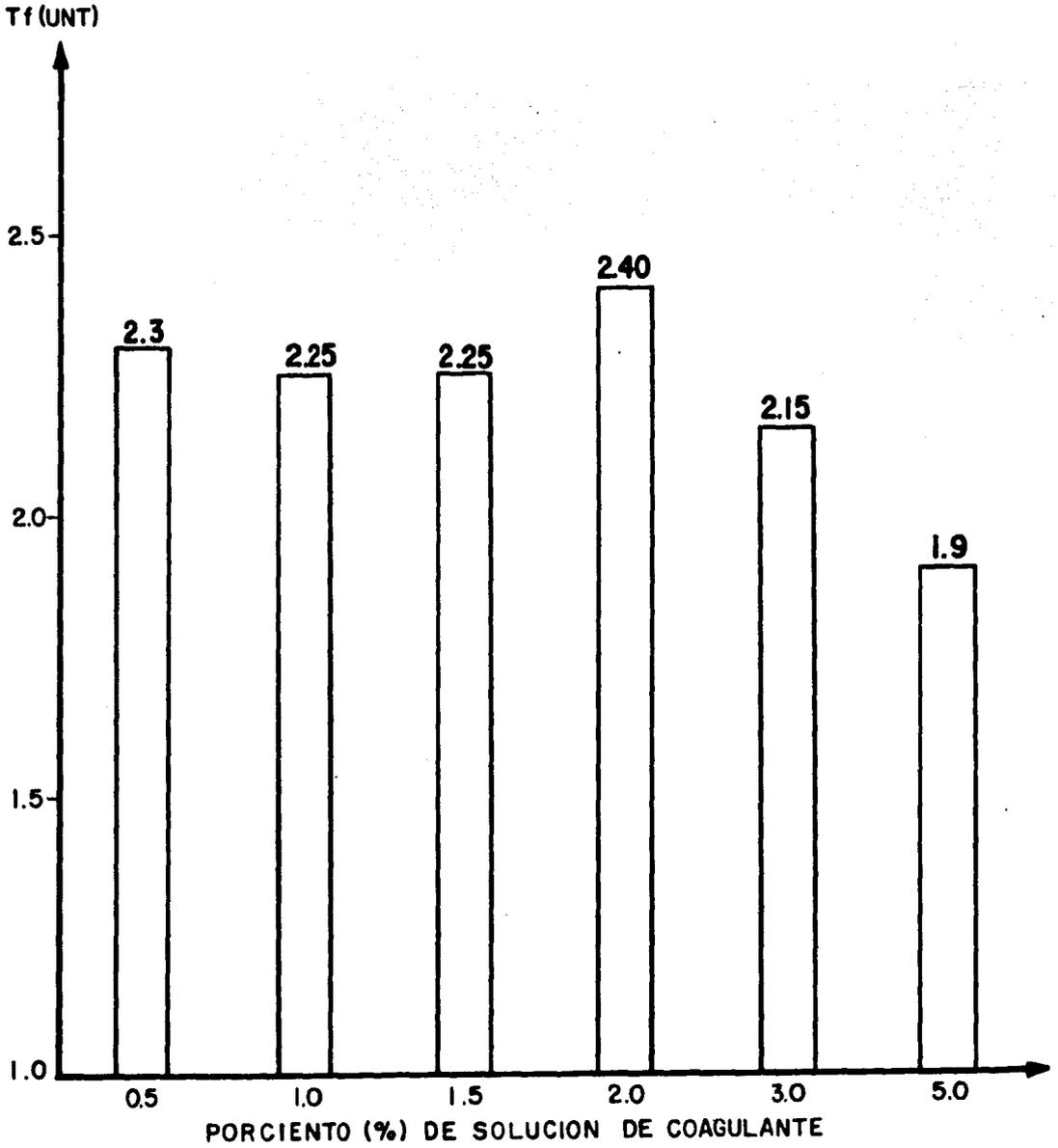
CONDICIONES DEL AGUA CRUDA = NORMALES REACTIVO = NINGUNO
 VOLUMEN DE AGUA A TRATAR = 1.5 lt
 COAGULANTE (REACTIVO) = $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$ 22 A1203
 CONCENTRACION COAGULANTE = VAR. %
 DOSIFICACION COAGULANTE = 21 ppm
 VOLUMEN DE DOSIFICACION = VAR. ml
 TIEMPO DE MEZCLA RAPIDA = 1 min AGITACION N = 100 rpm
 TIEMPO DE RETENCION = 7 min AGITACION N = 40 rpm
 TIEMPO DE SEDIMENTACION = 5 - 10 min
 VOLUMEN DE ANALISIS = 200 ml

ANALISIS DEL AGUA TRATADA:

PARAMETROS DE TRATAMIENTO					:	ANALISIS DE TRATAMIENTO			
NUMERO DE JARRA	DOSIF. COAG. (ppm)	CONC. COAG. (%)	VOL. DOSIF. (ml)	TIEMPO FLOCUL. (min)	:	TURBIEDAD (UNT)	pH (UNIDADES)	COLOR ESCALA (Pt-Co)	INDICE DE WILLCOMB
1	21	0.5	6.30	7	:	2.30	6.80	2	4
					:				
2	21	1.0	3.15	7	:	1.60	6.80	2	6
					:				
3	21	1.5	2.10	7	:	1.15	6.90	2	8
					:				
4	21	2.0	1.60	7	:	1.50	6.85	2	6
					:				
5	21	3.0	1.05	7	:	1.70	6.95	2	6
					:				
6	21	5.0	0.63	7	:	1.50	6.90	2	6

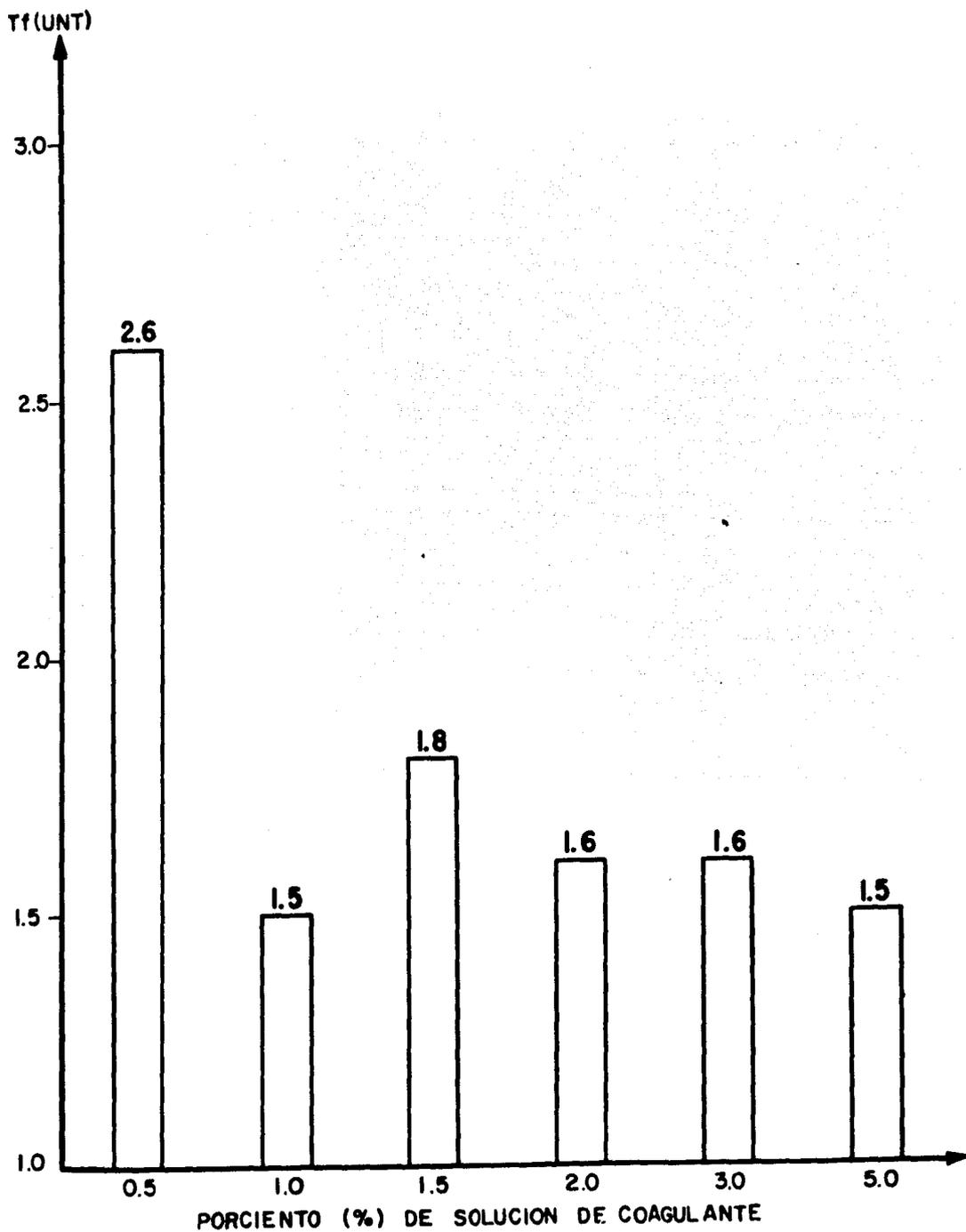
Gráfico V.4.1

TIEMPO DE RETENCION MINIMO PARCIAL = 4 min. TR = 4 min.



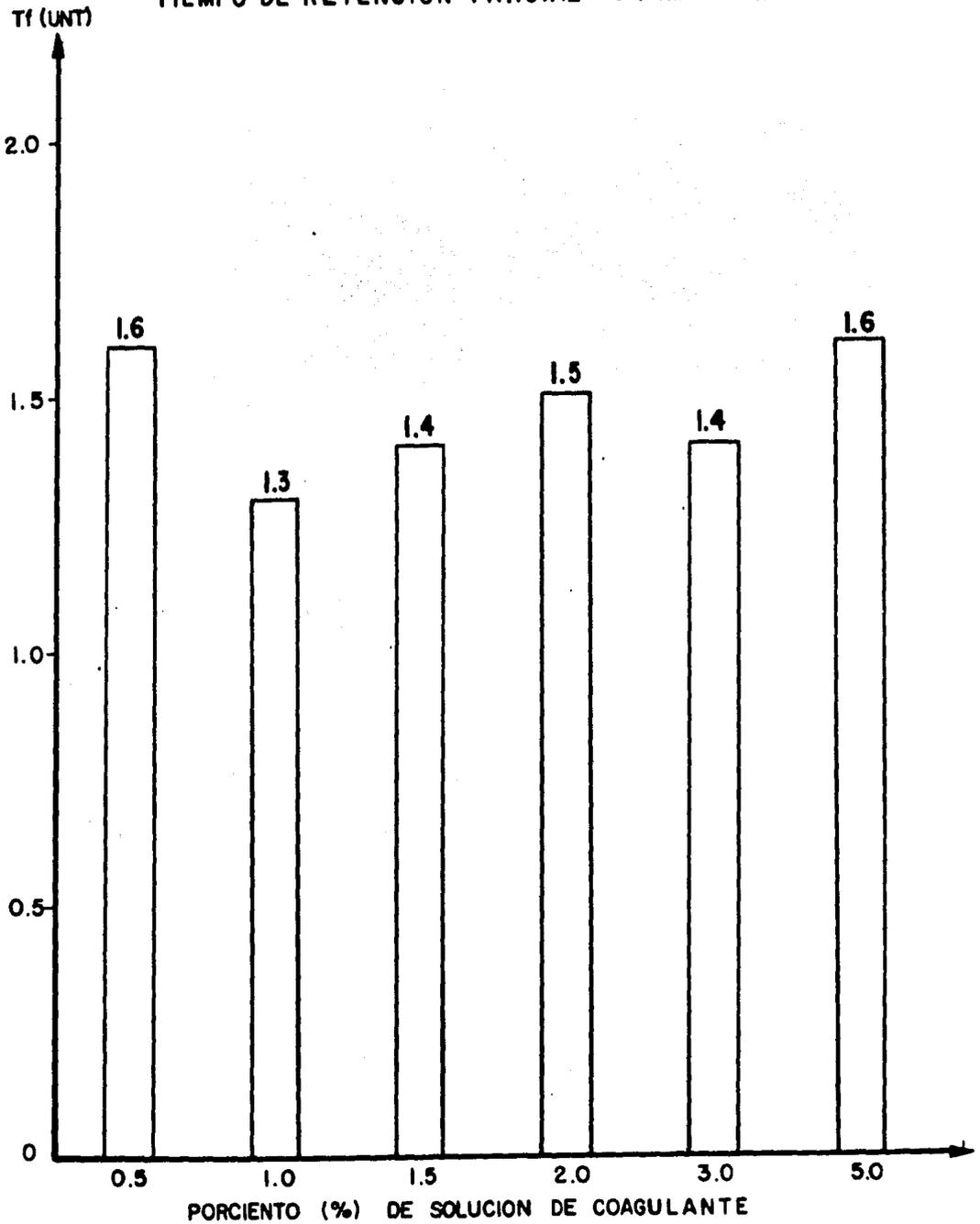
Gráfica V. 4.2

TIEMPO DE RETENCION PARCIAL = 5 min. TR = 5 min.



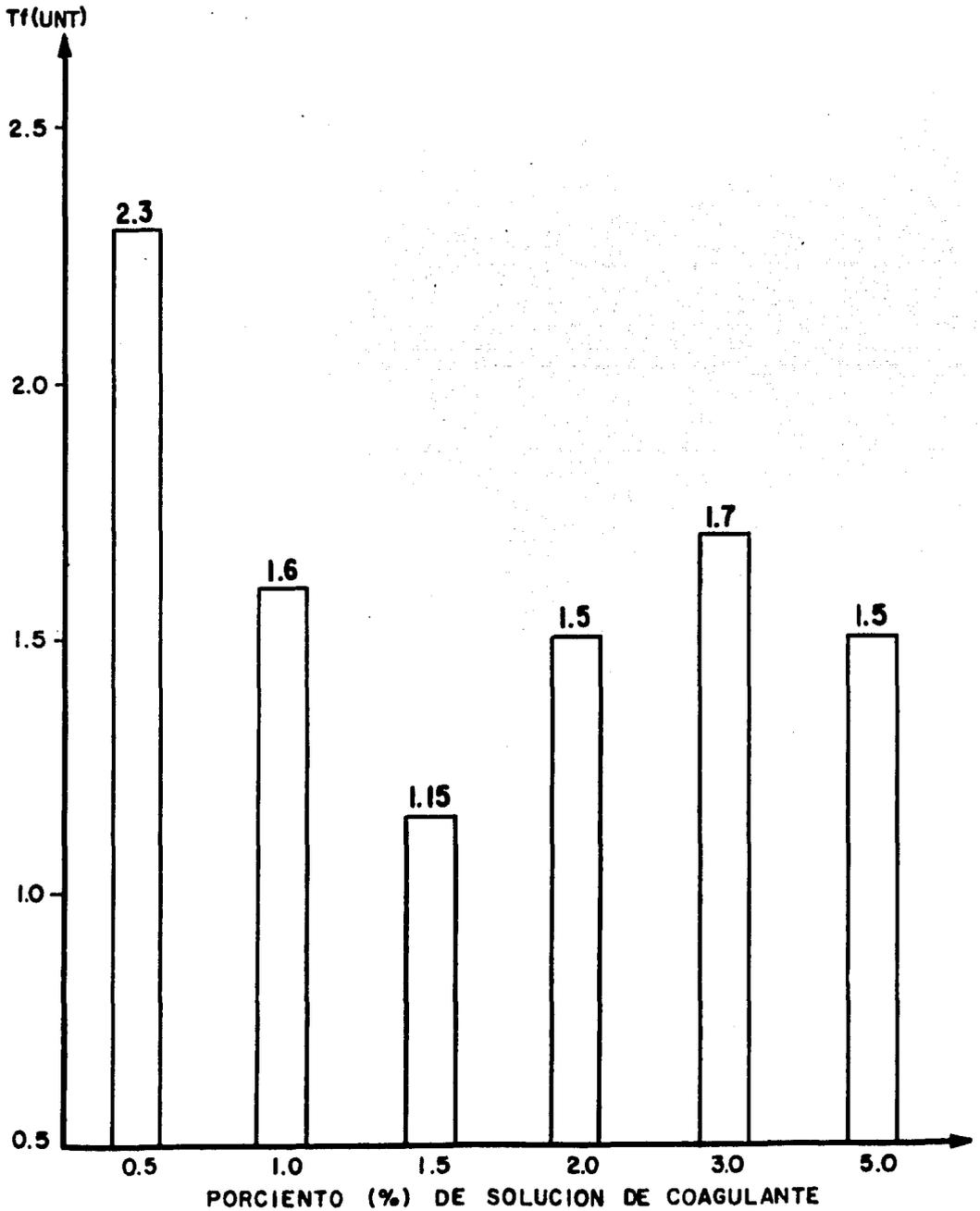
Gráfica V. 4.3

TIEMPO DE RETENCION PARCIAL = 6 min. TR = 6 min.



Gráfica V. 4.4

TIEMPO DE RETENCION MAXIMO PARCIAL = 7 min. TR = 7 min.



U.5 DETERMINACION Y OBTENCION DE LA ECUACION DE LOS PARAMETROS FISICOS OPTIMOS "G" Y "T" DE FLOCULACION.

U.5.1 Objetivo:

Determinar la ecuación de floculación que nos permita conocer los parámetros físicos óptimos "G" y "T" del proceso unitario floculación.

Encontrar la curva de gradientes de velocidad óptimos (G*) para diferentes tiempos de floculación.

U.5.2 Metodología:

Seleccionar los intervalos de gradientes de velocidad y tiempos de floculación. Del Programa Regional OPS/EHP/CEPIS de Mejoramiento de Calidad de Agua para Consumo Humano, Ciclo: CB-14 Ciencias Básicas de Tratamiento de Agua 1981, se utilizan como bases para la realización de esta Tesis, los experimentos realizados por Ruey y Cía para calcular la agitación necesaria para cada prueba de jarras de acuerdo a las características del equipo utilizado, dichos experimentos se mencionan más adelante.

Procedimiento:

1. Tomar una muestra de agua cruda, determinar turbiedad inicial (T_0), pH, color y temperatura.
2. Se mide 1.5 lt de agua cruda para cada jarra.
3. Se pone a funcionar el equipo a una velocidad de agitación de 100 rpm.

4. Se aplican los parámetros químicos óptimos seleccionados de acuerdo a las características del agua cruda.
5. A partir de la aplicación del coagulante se inicia la mezcla rápida durante 1 min.
6. Al finalizar la mezcla rápida, se inicia el proceso de floculación, para lo cual se modifica la velocidad de agitación de acuerdo al gradiente seleccionado (20, 30, 40, 50, 60, y 70 seg^{-1}).
7. Después de floculada el agua por 5 minutos, se retira el primer vaso, y se deja sedimentar por 5 - 10 min.

Vaso No. 1 $T_1 = 5$ minutos

8. Los siguientes vasos se retiran en los tiempos que a continuación se indican:

Vaso No. 2 $T_2 = 10$ minutos

Vaso No. 3 $T_3 = 15$ minutos

Vaso No. 4 $T_4 = 20$ minutos

Vaso No. 5 $T_5 = 25$ minutos

Vaso No. 6 $T_6 = 30$ minutos

9. Para cada uno de los vasos, después del tiempo de floculación, se retira y se procede al tiempo de sedimentación durante 5 - 10 minutos.
10. Se determina la turbiedad residual (T_f) para cada vaso y se calcula la eficiencia residual de la siguiente manera:
 Eficiencia residual $n = T_f/T_0 \times 100$
 Los resultados para cada ensayo se registran en la Tabla U.5.1
11. Se repite el ensayo incrementando el gradiente de acuerdo a la siguiente relación (20, 30, 40, 50, 60 y 70 seg^{-1}), ajustando la agitación para cada gradiente de acuerdo a la

gráfica V.5.1

12. Se efectua todo el procedimiento completo para cada una de las turbiedades iniciales presentadas por el agua cruda.

V.5.3 Evaluación.

De acuerdo a los resultados obtenidos en las pruebas de jarras para la determinación de los parámetros químicos óptimos de coagulación y a la turbiedad presentada por el agua cruda ($T_o = 13 - 14$ UNT), se seleccionaron las siguientes constantes de tratamiento:

Dosificación óptima = 21 ppm de coagulante metálico

Concentración óptima = 2% de solución de coagulante

pH óptimo = 7.5 - 7.6 unidades (el del agua cruda)

Selección de gradientes de Agitación para los Ensayos de "Prueba de Jarras":

Del Programa Regional OPS/EHP/CEPIS de Mejoramiento de Calidad de Agua para Consumo Humano, Ciclo CB-14, Ciencias Básicas de Tratamiento de Agua, se obtuvieron los datos necesarios para calcular de acuerdo a los gradientes propuestos para la planta piloto (de 20 a 70 rpm), las revoluciones por minuto aplicables en las pruebas de jarras, para simular el proceso a nivel laboratorio y encontrar los parámetros físicos de floculación de la planta

Del Programa Regional se utilizaron los experimentos realizados por Ruey, Hudson, Singler y Camp, donde determinaron los gradientes de velocidad para diferentes tipos de rotores, de acuerdo al equipo utilizado en este ensayo, las relaciones que

se utilizaron son las siguientes:

Relación matemática $G'x = G (V1 - V2) \text{Exp } 1/2$

donde:

$V1$ = volumen de 2 lt

G = gradiente para volumen de 2 lt

$V2$ = volumen (x)

$G'x$ = gradiente de velocidad para un volumen (x)

También se utiliza la gráfica V.5.1 Gradientes de Velocidad para un volumen de 2 lt vs Agitación (rpm), encontrada por Ruy y Cfa para diferentes tipos de rotor y utilizando como coagulante metálico sulfato de aluminio (la gráfica se presenta en el inciso V.5.5 Cálculos).

V.5.4 Resultados

Ajuste de la agitación de acuerdo a los gradientes seleccionados para un volumen de tratamiento de agua cruda de 1.5 lt.

Datos:

$V1 = 2 \text{ lt}$

$V2 = 1.5 \text{ lt}$ (volumen de muestra)

$G = ?$

$G'x = (20, 30, 40, 50, 60 \text{ y } 70 \text{ seg}^{-1})$

$G'x = G (V1 / V2) \text{Exp } 1/2$

despejando G , tenemos:

$G = G'x / (V1 / V2) \text{Exp } 1/2$

sustituyendo datos, tenemos:

$G = G'x / (2 \text{ lt} / 1.5 \text{ lt}) \text{Exp } 1/2$

$G = G'x / 1.1547$

De esta última relación se calculan los valores de G a partir de G'x:

G'x	20	30	40	50	60	70
G	17.32	25.98	36.64	43.30	51.96	60.62

Con estos nuevos valores de G, se consulta la gráfica U.5.1, G (gradiente de velocidad l / segundo) vs N (agitación rpm) para encontrar los nuevos valores de N que se utilizarán en los Ensayos de Prueba de Jarras.

De esta manera, tenemos:

G'x	20	30	40	50	60	70
N	38	48	62	70	81	90

Para cada Ensayo de Prueba de Jarras se especifican los gradientes y agitación aplicados.

U.5.5 Cálculos:

De la tabla U.5.1 Eficiencias Residuales vs Parámetros Físicos de Floculación: G (gradientes de velocidad) y T (tiempos de floculación), se obtienen las gráficas U.5.2 y U.5.3 para obtener los parámetros óptimos de floculación.

Se grafican (en escalas aritméticas) los valores de nr:

$nr = (T_f / T_o) \times 100$ vs periodo de floculación para los diversos valores de gradientes de velocidad. De la gráfica U.5.3 se selecciona el periodo total de floculación en base al punto que produce el menor valor de nr que corresponde a la mayor eficiencia remocional ($nR = 100 - nr$).

Posteriormente se grafican (en escalas aritméticas también) los valores de $nr = (T_f / T_o) \times 100$ vs gradientes de velocidad para los diferentes periodos de floculación. De la gráfica U.5.2 para cada valor de gradiente se obtiene un tiempo de floculación en el cual se produce un valor mínimo de nr que corresponde a la máxima eficiencia remocional nR ($nR = 100 - nr$) para cada gradiente.

Estos valores se analizan aplicando la teoría de los mínimos cuadrados a la ecuación de una línea recta:

$$Y = a + bX$$

donde:

$$Y = \log G ; X = \log T$$

a = ordenada al origen

b = pendiente de la recta

PRUEBA DE JARRAS U.5.1

ENSAYO: DETERMINACION Y OBTENCION DE LA ECUACION DE LOS PARAMETROS FISICOS OPTIMOS
 "G" Y "T" DE FLOCULACION

ANALISIS DE AGUA CRUDA:

TURBIEDAD (UNT) = 14.0 pH (UNIDADES) = 7.65 COLOR(ESC.Pt-Co) = 12 TEMP = 20 °C

CARACTERISTICAS DE TRATAMIENTO:

CONDICIONES DEL AGUA CRUDA = NORMALES REACTIVO = NINGUNO
 VOLUMEN DE AGUA A TRATAR = 1.5 lt
 COAGULANTE (REACTIVO) = A12(SO4)3 14H2O 22 A12O3
 CONCENTRACION COAGULANTE = 2.0 %
 DOSIFICACION COAGULANTE = 21 ppm
 VOLUMEN DE DOSIFICACION = 1.6 ml
 TIEMPO DE MEZCLA RAPIDA = 1 min AGITACION N = 100 rpm
 TIEMPO DE RETENCION = VAR. min AGITACION N = 30 rpm GRADIENTE = 20 seg-1
 TIEMPO DE SEDIMENTACION = 5 - 10 min
 VOLUMEN DE ANALISIS = 200 ml

ANALISIS DEL AGUA TRATADA:

PARAMETROS DE TRATAMIENTO					ANALISIS DE TRATAMIENTO			
NUMERO DE JARRA	DOSIF. COAG. (ppm)	CONC. COAG. (%)	VOL. DOSIF. (ml)	TIEMPO FLOCUL. (min)	TURBIEDAD (UNT)	pH (UNIDADES)	COLOR ESCALA (Pt-Co)	INDICE DE WILLCOB
1	21	2.0	1.60	5	8.55	6.95	5	2
2	21	2.0	1.60	10	4.25	6.95	3	4
3	21	2.0	1.60	15	3.10	6.90	2.5	6
4	21	2.0	1.60	20	1.75	7.00	1.5	8
5	21	2.0	1.60	25	1.40	7.00	1	8
6	21	2.0	1.60	30	1.15	7.00	1	8

PRUEBA DE JARRAS V.5.2

ENSAYO: DETERMINACION Y OBTENCION DE LA ECUACION DE LOS PARAMETROS FISICOS OPTIMOS
 °G° Y °T° DE FLOCULACION

ANALISIS DE AGUA CRUDA:

TURBIEDAD (UNT) = 13.0 pH (UNIDADES) = 7.55 COLOR(ESC.Pt-Co) = 12 TEMP = 21 °C

CARACTERISTICAS DE TRATAMIENTO:

CONDICIONES DEL AGUA CRUDA = NORMALES REACTIVO = NINGUNO
 VOLUMEN DE AGUA A TRATAR = 1.5 lt
 COAGULANTE (REACTIVO) = A12(SO4)3 14H2O 22 A1203
 CONCENTRACION COAGULANTE = 2.0 %
 DOSIFICACION COAGULANTE = 21 ppm
 VOLUMEN DE DOSIFICACION = 1.6 ml
 TIEMPO DE MEZCLA RAPIDA = 1 min AGITACION N = 100 rpm
 TIEMPO DE RETENCION = VAR. min AGITACION N = 48 rpm GRADIENTE = 30 seg-1
 TIEMPO DE SEDIMENTACION = 5 - 10 min
 VOLUMEN DE ANALISIS = 200 ml

ANALISIS DEL AGUA TRATADA:

PARAMETROS DE TRATAMIENTO					ANALISIS DE TRATAMIENTO			
NUMERO DE JARRA	DOSIF. COAG. (ppm)	CONC. COAG. (%)	VOL. DOSIF. (ml)	TIEMPO FLOCUL. (min)	TURBIEDAD (UNT)	pH (UNIDADES)	COLOR ESCALA (Pt-Co)	INDICE DE WILLCOMB
1	21	2.0	1.60	5	7.80	6.85	1	2
2	21	2.0	1.60	10	4.15	6.90	1	4
3	21	2.0	1.60	15	2.15	6.90	1	6
4	21	2.0	1.60	20	1.75	6.95	1	8
5	21	2.0	1.60	25	1.90	6.95	1	8
6	21	2.0	1.60	30	1.15	7.00	1	8

PRUEBA DE JARRAS V.5.3

ENSAYO: DETERMINACION Y OBTENCION DE LA ECUACION DE LOS PARAMETROS FISICOS OPTIMOS
 "G" Y "T" DE FLOCULACION

ANALISIS DE AGUA CRUDA:

TURBIEDAD (UNT) = 14.0 pH (UNIDADES) = 7.50 COLOR(ESC.Pt-Co) = 12 TEMP = 21 °C

CARACTERISTICAS DE TRATAMIENTO:

CONDICIONES DEL AGUA CRUDA = NORMALES REACTIVO = NINGUNO
 VOLUMEN DE AGUA A TRATAR = 1.5 lt
 COAGULANTE (REACTIVO) = $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$ 22 A1203
 CONCENTRACION COAGULANTE = 2.0 %
 DOSIFICACION COAGULANTE = 21 ppm
 VOLUMEN DE DOSIFICACION = 1.6 ml
 TIEMPO DE MEZCLA RAPIDA = 1 min AGITACION N = 100 rpm
 TIEMPO DE RETENCION = VAR. min AGITACION N = 62 rpm GRADIENTE = 40 seg-1
 TIEMPO DE SEDIMENTACION = 5 - 10 min
 VOLUMEN DE ANALISIS = 200 ml

ANALISIS DEL AGUA TRATADA:

PARAMETROS DE TRATAMIENTO					ANALISIS DE TRATAMIENTO			
NUMERO DE JARRA	DOSIF. COAG. (ppm)	CONC. COAG. (%)	VOL. DOSIF. (ml)	TIEMPO FLOCUL. (min)	TURBIEDAD (UNT)	pH (UNIDADES)	COLOR ESCALA (Pt-Co)	INDICE DE WILLCOB
1	21	2.0	1.60	5	7.10	6.90	1	2
2	21	2.0	1.60	10	3.25	6.90	1	4
3	21	2.0	1.60	15	3.55	6.90	1	4
4	21	2.0	1.60	20	2.40	7.00	1	6
5	21	2.0	1.60	25	2.25	7.00	1	8
6	21	2.0	1.60	30	2.30	7.00	1	6

PRUEBA DE JARRAS V.5.4

ENSAYO: DETERMINACION Y OBTENCION DE LA ECUACION DE LOS PARAMETROS FISICOS OPTIMOS
 °G° Y °T° DE FLOCULACION

ANALISIS DE AGUA CRUDA:

TURBIEDAD (UNT) = 13.0 pH (UNIDADES) = 7.5 COLOR(ESC.Pt-Co) = 12 TEMP = 20 °C

CARACTERISTICAS DE TRATAMIENTO:

CONDICIONES DEL AGUA CRUDA = NORMALES REACTIVO = NINGUNO
 VOLUMEN DE AGUA A TRATAR = 1.5 lt
 COAGULANTE (REACTIVO) = A12(SO4)3 14H2O 22 A1203
 CONCENTRACION COAGULANTE = 2.0 %
 DOSIFICACION COAGULANTE = 21 ppm
 VOLUMEN DE DOSIFICACION = 1.6 ml
 TIEMPO DE MEZCLA RAPIDA = 1 min AGITACION N = 100 rpm
 TIEMPO DE RETENCION = VAR. min AGITACION N = 70 rpm GRADIENTE = 50 seg-1
 TIEMPO DE SEDIMENTACION = 5 - 10 min
 VOLUMEN DE ANALISIS = 200 ml

ANALISIS DEL AGUA TRATADA:

PARAMETROS DE TRATAMIENTO					ANALISIS DE TRATAMIENTO			
NUMERO DE JARRA	DOSIF. COAG. (ppm)	CONC. COAG. (%)	VOL. DOSIF. (ml)	TIEMPO FLOCUL. (min)	TURBIEDAD (UNT)	pH (UNIDADES)	COLOR ESCALA (Pt-Co)	INDICE DE WILLCOB
1	21	2.0	1.60	5	7.10	6.90	1	2
2	21	2.0	1.60	10	3.95	6.90	1	4
3	21	2.0	1.60	15	2.90	6.95	1	6
4	21	2.0	1.60	20	2.70	6.98	1	8
5	21	2.0	1.60	25	2.90	6.92	1	6
6	21	2.0	1.60	30	2.70	6.98	1	8

PRUEBA DE JARRAS V.5.5

ENSAYO: DETERMINACION Y OBTENCION DE LA ECUACION DE LOS PARAMETROS FISICOS OPTIMOS
 "G" Y "T" DE FLOCULACION

ANALISIS DE AGUA CRUDA:

TURBIEDAD (UNT) = 14.0 pH (UNIDADES) = 7.6 COLOR(ESC.Pt-Co) = 13 TEMP = 19 °C

CARACTERISTICAS DE TRATAMIENTO:

CONDICIONES DEL AGUA CRUDA = NORMALES REACTIVO = NINGUNO
 VOLUMEN DE AGUA A TRATAR = 1.5 lt
 COAGULANTE (REACTIVO) = A12(SO4)3 14H2O 22 A1203
 CONCENTRACION COAGULANTE = 2.0 %
 DOSIFICACION COAGULANTE = 21 ppm
 VOLUMEN DE DOSIFICACION = 1.6 ml
 TIEMPO DE MEZCLA RAPIDA = 1 min AGITACION N = 100 rpm
 TIEMPO DE RETENCION = VAR. min AGITACION N = 81 rpm GRADIENTE = 60 seg-1
 TIEMPO DE SEDIMENTACION = 5 - 10 min
 VOLUMEN DE ANALISIS = 200 ml

ANALISIS DEL AGUA TRATADA:

PARAMETROS DE TRATAMIENTO					ANALISIS DE TRATAMIENTO			
NUMERO DE JARRA	DOSIF. COAG. (ppm)	CONC. COAG. (%)	VOL. DOSIF. (ml)	TIEMPO FLOCUL. (min)	TURBIEDAD (UNT)	pH (UNIDADES)	COLOR ESCALA (Pt-Co)	INDICE DE MILLICOM
1	21	2.0	1.60	5	5.0	6.90	1	2
2	21	2.0	1.60	10	3.1	6.90	1	4
3	21	2.0	1.60	15	3.1	6.90	1	4
4	21	2.0	1.60	20	2.5	6.90	1	8
5	21	2.0	1.60	25	5.5	6.95	1	4
6	21	2.0	1.60	30	4.8	7.00	1	4

PRUEBA DE JARRAS V.5.6

ENSAYO: DETERMINACION Y OBTENCION DE LA ECUACION DE LOS PARAMETROS FISICOS OPTIMOS
 'G' Y 'T' DE FLOCULACION

ANALISIS DE AGUA CRUDA:

TURBIEDAD (UNT) = 14.0 pH (UNIDADES) = 7.5 COLOR(ESC.Pt-Co) = 13 TEMP = 20 °C

CARACTERISTICAS DE TRATAMIENTO:

CONDICIONES DEL AGUA CRUDA = NORMALES REACTIVO = NINGUNO
 VOLUMEN DE AGUA A TRATAR = 1.5 lt
 COAGULANTE (REACTIVO) = A12(SO4)3 14H2O 22 A1203
 CONCENTRACION COAGULANTE = 2.0 %
 DOSIFICACION COAGULANTE = 21 ppm
 VOLUMEN DE DOSIFICACION = 1.6 ml
 TIEMPO DE MEZCLA RAPIDA = 1 min AGITACION N = 100 rpm
 TIEMPO DE RETENCION = VAR. min AGITACION N = 90 rpm GRADIENTE = 70 seg-1
 TIEMPO DE SEDIMENTACION = 5 - 10 min
 VOLUMEN DE ANALISIS = 200 ml

ANALISIS DEL AGUA TRATADA:

PARAMETROS DE TRATAMIENTO					:	ANALISIS DE TRATAMIENTO			
NUMERO DE JARRA	DOSIF. COAG. (ppm)	CONC. COAG. (%)	VOL. DOSIF. (ml)	TIEMPO FLOCUL. (min)	:	TURBIEDAD (UNT)	pH (UNIDADES)	COLOR ESCALA (Pt-Co)	INDICE DE MILLICOMB
1	21	2.0	1.60	5	:	6.0	7.00	1	2
2	21	2.0	1.60	10	:	3.5	7.00	1	4
3	21	2.0	1.60	15	:	3.7	7.00	1	6
4	21	2.0	1.60	20	:	3.0	7.00	1	8
5	21	2.0	1.60	25	:	5.0	7.00	1	6
6	21	2.0	1.60	30	:	4.5	7.00	1	6

Valores Críticos de Floculación:

Estos valores se obtienen de la gráfica U.5.2 Eficiencia Residual vs Gradientes de Velocidad, corresponden a la turbiedad más baja para cada tiempo de floculación (mayor eficiencia remocional).

Valores Críticos:

Punto	1	2	3	4	5	6
Tiempo (min)	5	10	15	20	25	30
Grad.(seg-1)	60	60	30	20	20	20

Estos valores se analizan aplicando la teoría de los mínimos cuadrados para obtener las constantes de la ecuación de la línea recta: $Y = a + bX$

Por lo tanto tenemos:

$\log T = X$	0.6996	1.0000	1.1761	1.3010	1.3979	1.4771
$\log G = Y$	1.7782	1.7782	1.4771	1.3010	1.3010	1.3010

$$a = 2.3710$$

$$b = - 0.7502$$

Por lo tanto la ecuación es:

$$\log G = 2.3710 - 0.7502 \log T$$

Valores Críticos de Floculación:

Estos valores se obtienen de la gráfica V.5.2 Eficiencia Residual vs Gradientes de Velocidad, corresponden a la turbiedad más baja para cada tiempo de floculación (mayor eficiencia remocional).

Valores Críticos:

Punto	1	2	3	4	5	6
Tiempo (min)	5	10	15	20	25	30
Grad.(seg-1)	60	60	30	20	20	20

Estos valores se analizan aplicando la teoría de los mínimos cuadrados para obtener las constantes de la ecuación de la línea recta: $Y = a + bX$

Por lo tanto tenemos:

$\log T = X$	0.6996	1.0000	1.1761	1.3010	1.3979	1.4771
$\log G = Y$	1.7782	1.7782	1.4771	1.3010	1.3010	1.3010

$$a = 2.3710$$

$$b = - 0.7502$$

Por lo tanto la ecuación es:

$$\log G = 2.3710 - 0.7502 \log T$$

Reagrupando términos tenemos:

$$1.333 \quad 3.16$$

$$G \quad x T = 10$$

Ecuación que determina los parámetros óptimos "G" y "T" para el proceso de floculación en función de las características del agua cruda de la presa "Necaxa".

De la ecuación de la curva: $\log G = 2.3710 - 0.7502 \log T$, se obtiene la recta que se representa en la gráfica U.5.6 denominada Valores Óptimos de G* vs Tiempo de Floculación, de esta gráfica se obtienen los siguientes puntos para los diferentes tiempos de floculación:

Punto	1	2	3	4	5	6
Tiempo (min)	5	10	15	20	25	30
Grad.(seg-1)	60	38	31	25	22	19

De la gráfica U.5.4 denominada Correlación de Gradientes de Velocidad vs Tiempos de Floculación, se obtienen los gradientes de velocidad para cualquier tiempo de floculación parcial y acumulado para los cuatro compartimientos de floculación que tiene la planta piloto.

A continuación se tabulan los gradientes de velocidad para los diferentes tiempos utilizados en la planta piloto en la etapa de preoperación, los datos se obtienen de la gráfica U.5.5 (Extrapolación de la gráfica U.5.4) Correlación de Gradientes

de Velocidad vs Tiempos de Floculación.

FLOCULADOR NUMERO.	1	2	3	4
PERIODO DE RETENCION (min.)	4	8	12	16
GRADIENTE DE VELOCIDAD (seg-1)	84	52	37	30
PERIODO DE RETENCION (min.)	5	10	15	20
GRADIENTE DE VELOCIDAD (seg-1)	71	42	31	25
PERIODO DE RETENCION (min.)	6	12	18	24
GRADIENTE DE VELOCIDAD (seg-1)	64	37	27	22
PERIODO DE RETENCION (min.)*	7	14	21	28
GRADIENTE DE VELOCIDAD (seg-1)*.	57	33	24	19

* Se registran los gradientes de velocidad correspondientes a cada floculador para el tiempo de retención de 7 min., periodo de retención que no puede ser utilizado, debido a que no se puede alcanzar dicho periodo en los floculadores (el diseño de los floculadores está considerado para 6 minutos de tiempo de retención).

TABLA V.3.1

TABULACION DE EFICIENCIAS RESIDUALES VS PARAMETROS FISICOS DE FLOCULACION

N (rpm)	6		5		10		15		20		25		30		AGUA CRUDA T ₀
	T _f	n	T _f	n											
30	20	8.55	61.07	4.25	30.36	3.10	22.14	1.75	12.50	1.40	10.00	1.15	8.21	14	
40	30	7.00	40.00	4.15	31.92	2.15	16.54	1.75	13.46	1.90	14.62	1.15	8.85	13	
42	40	7.10	50.71	3.25	23.21	3.55	25.36	2.40	17.14	2.25	14.07	2.30	16.43	14	
70	50	7.10	54.42	3.95	30.30	2.90	22.31	2.70	20.77	2.90	22.31	2.70	20.77	13	
81	60	5.00	41.43	3.10	22.14	3.10	22.14	2.50	17.86	5.50	39.29	4.00	34.29	14	
90	70	6.00	42.84	3.50	25.00	3.70	26.43	3.00	21.43	5.00	35.71	4.50	32.14	14	

N = AGITACION (REVOLUCIONES POR MINUTO)

G = GRADIENTE (SEGUNDOS -1)

T_f = TURBIEDAD DEL AGUA TRATADA (UNT)

n = EFICIENCIAS RESIDUALES (T_f/T₀) X 100 = n

T₀ = TURBIEDAD DEL AGUA CRUDA (UNT)

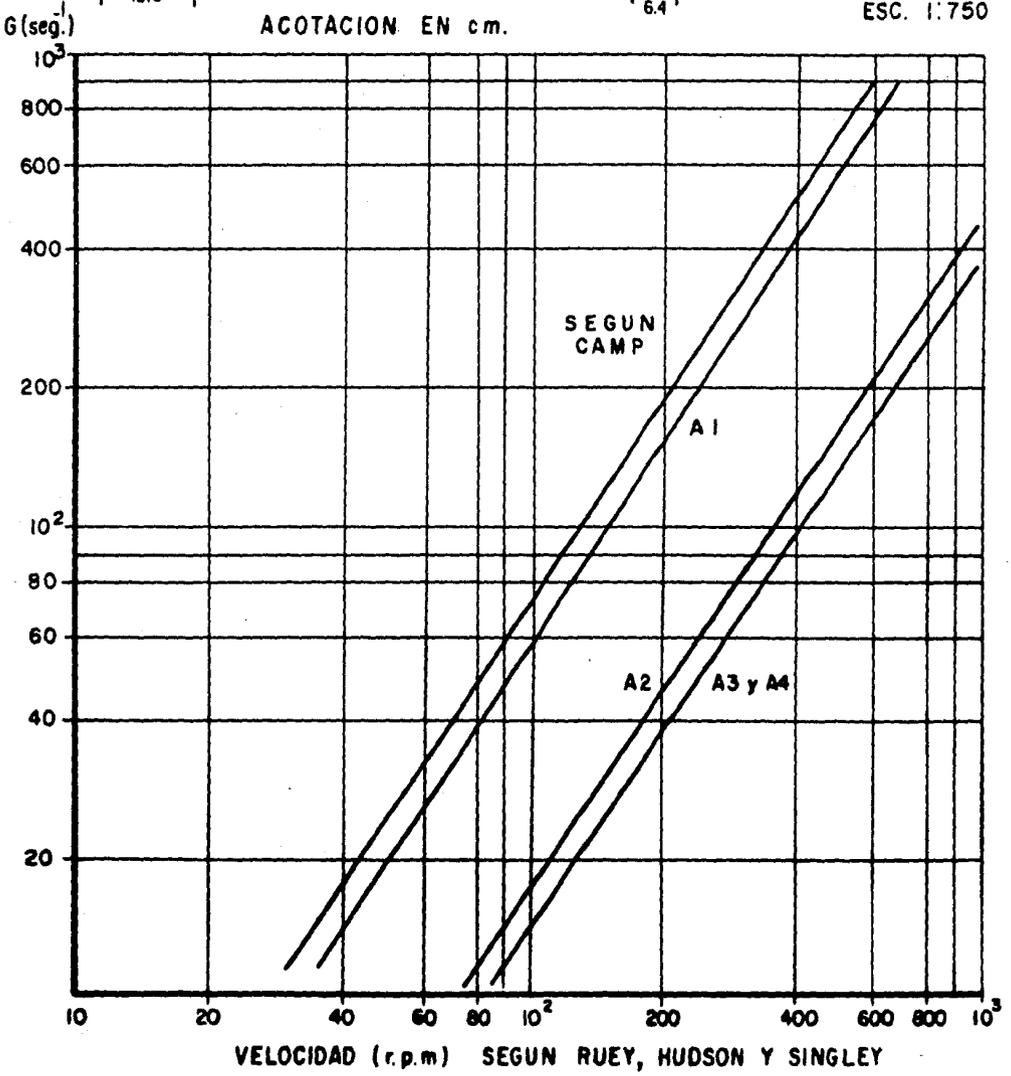
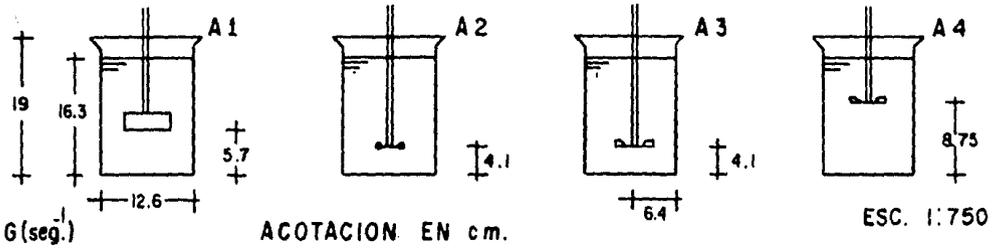
COAGULANTE = SULFATO DE ALUMINIO

DOSIFICACION OPTIMA = 21 ppm COLOR ESC. Pt-Co = 12 - 13 (INTERVALO DEL AGUA CRUDA)

CONCENTRACION OPTIMA = 2% pH OPTIMO = 7.5 - 7.6 (INTERVALO DEL AGUA CRUDA)

Gráfica V. 5.1

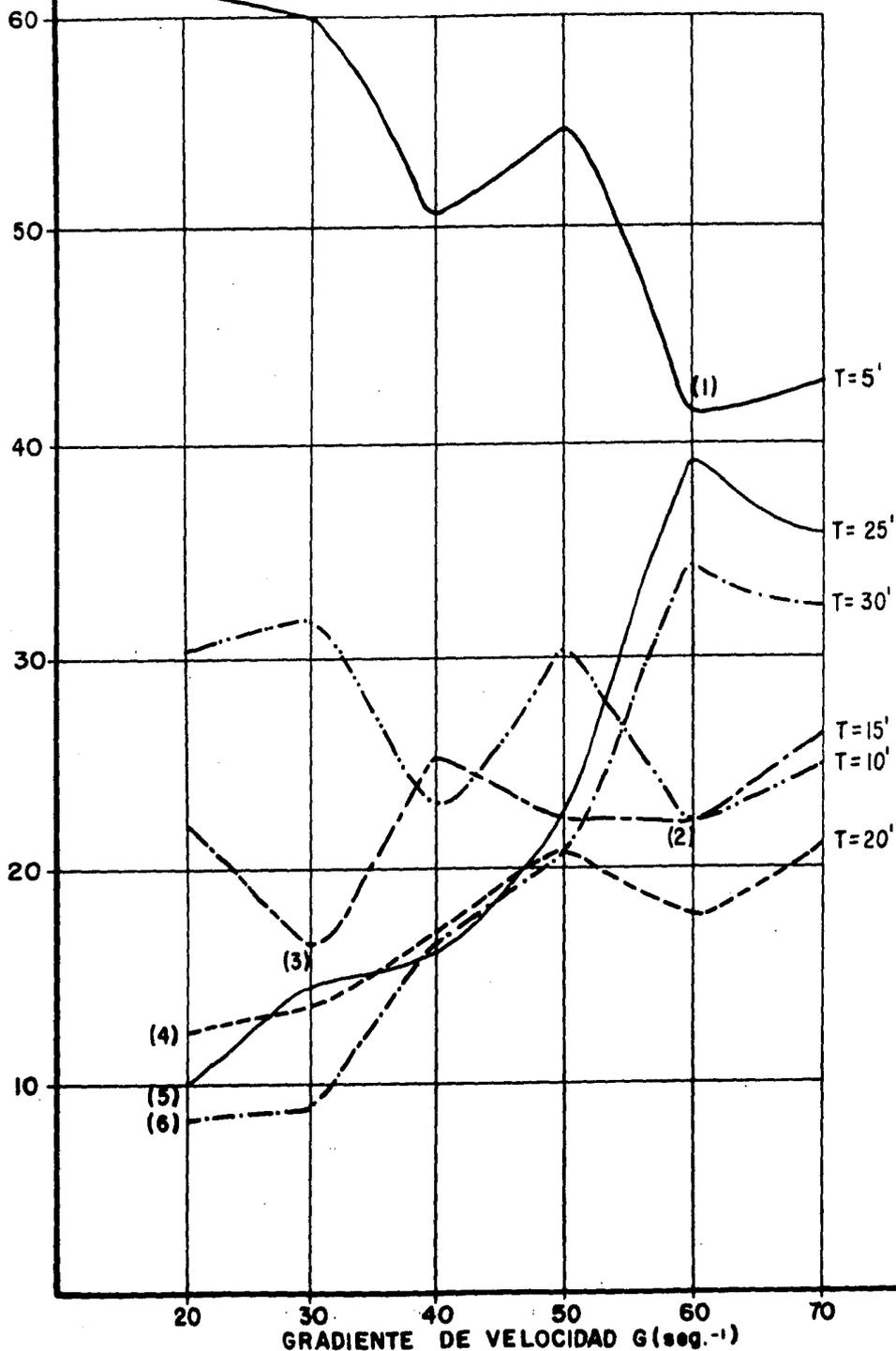
GRADIENTES DE VELOCIDAD PARA DIVERSOS TIPOS DE ROTORES



Gráfica V. 5. 2

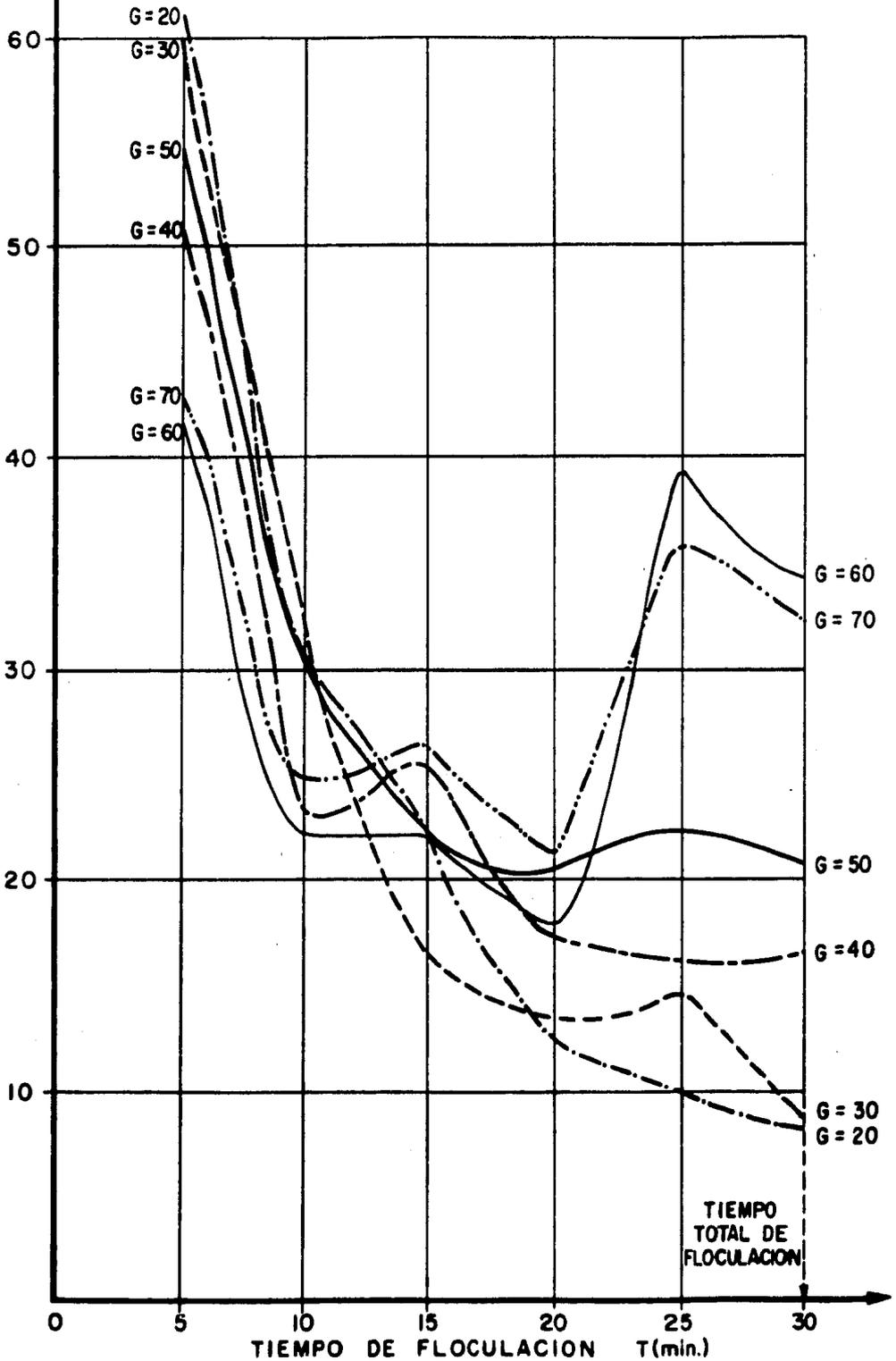
GRAFICA DE EFICIENCIA RESIDUAL VS GRADIENTES DE VELOCIDAD

$\frac{Tf}{To} * 100 = nr$



$$\frac{T_f}{T_0} * 100 = nr$$

GRAFICA DE EFICIENCIA RESIDUAL VS TIEMPO DE FLOCULACION



Gráfica V. 5.4

G (seg⁻²) CORRELACION DE GRADIENTES DE VELOCIDAD VS TIEMPOS DE FLOCULACION
ECUACION DE FLOCULACION
 $G^{1.33} * T = 10^{3.16}$

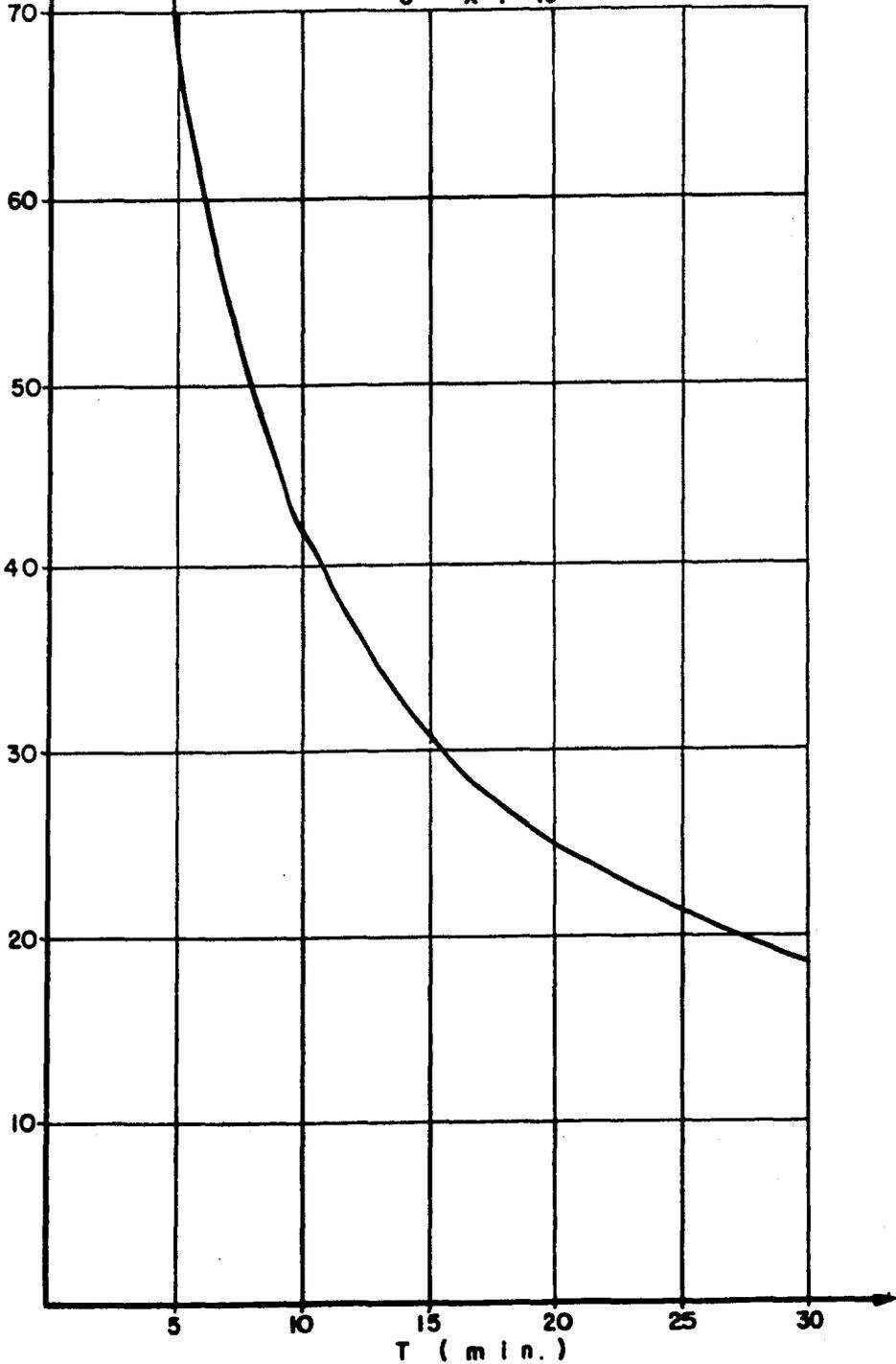


Gráfico V.5.5

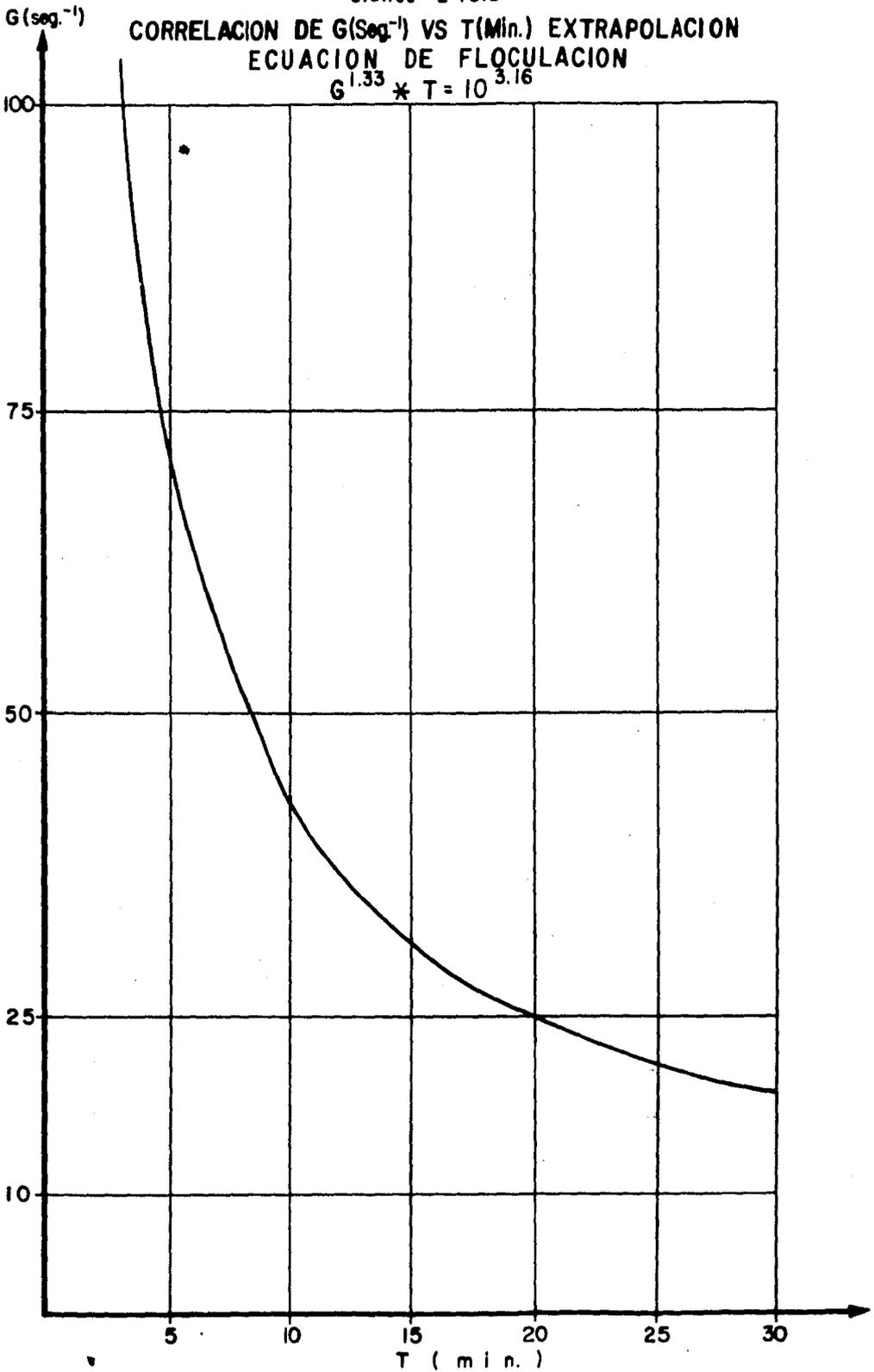
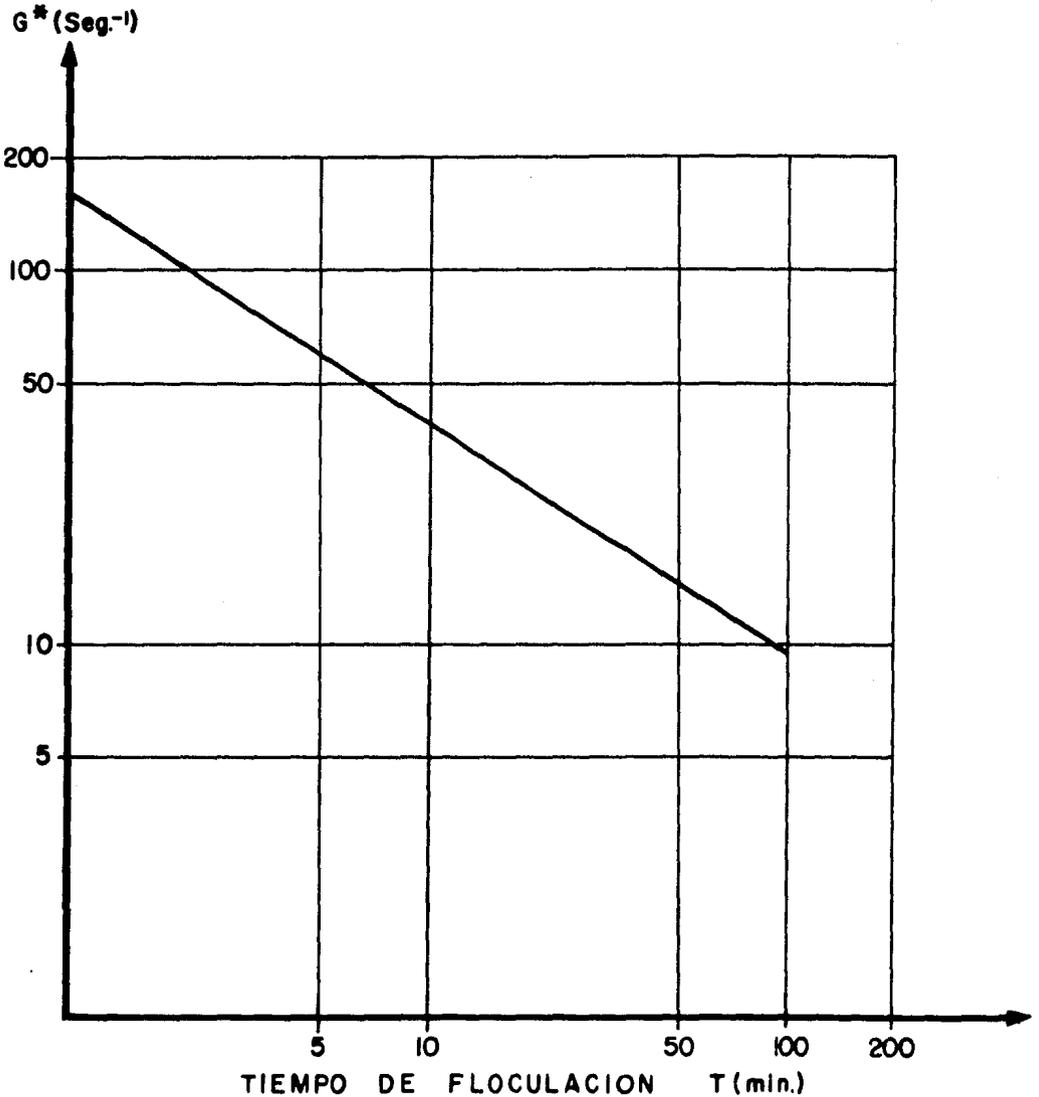


Gráfico V.5.6

VALORES OPTIMOS DE G^* VS TIEMPO DE FLOCULACION
ECUACION: $\log G = 2.3710 - 0.7502 \log T$



VI. SELECCION DE LOS PARAMETROS FISICO-QUIMICOS OPTIMOS PARA EL PROCESO DE COAGULACION-FLOCULACION

Para realizar la selección de los parámetros físico-químicos óptimos, es necesario efectuar una interpretación general de los resultados obtenidos en cada Ensayo de "Prueba de Jarras" experimentado.

VI.A OBTENCION DE LA ECUACION DE DOSIFICACION OPTIMA DE COAGULANTE

Mediante la ecuación obtenida de los resultados de prueba de jarras, que a continuación se expresa:

$$\log T_o = 0.4761 + 0.0360 (C)$$

Ecuación que rige el comportamiento del agua cruda de la presa "Necaxa" bajo el intervalo de turbiedad de 5 - 65 UNT, en función de las diferentes dosificaciones de coagulante de 10 - 35 mg/lit, se obtuvo la gráfica V.1.6 denominada Correlación de Turbiedad de Agua Cruda vs Dosis Optima de Coagulante.

Mediante esta gráfica V.1.6, se puede relacionar para cualquier valor de turbiedad inicial del agua cruda (para el intervalo de 5 - 65 UNT) con la dosificación óptima de coagulante metálico sulfato de aluminio (bajo el intervalo de 18 - 32 mg/lit).

Los puntos críticos de la gráfica V.1.6 representan los valores mínimo de turbiedad remanente (Tf) para cualquier

turbiedad inicial de agua cruda (T_0), estos valores implican los mejores resultados de tratamiento (dosificación óptima) para cada Ensayo de "Prueba de Jarras".

VI.B DETERMINACION DEL INTERVALO DE pH OPTIMO DE COAGULACION

De acuerdo a los resultados obtenidos en las "Pruebas de Jarras" de este Ensayo y al comportamiento de la gráfica U.2.1 denominada Turbiedad Remanente vs pH del Agua Cruda (ajustado), se puede verificar en las dos escalas (ácida y alcalina) que a un pH básico se obtiene un mejor comportamiento del coagulante metálico en el tratamiento, sin embargo, realizando una revisión más detallada de la gráfica y considerando el punto de vista económico del reactivo, se puede inferir que el tratamiento realizado con el pH del agua cruda (7.7 unidades) es aceptable comparándolo con un pH básico, es decir, utilizando un intervalo de $\text{pH} = 7 - 8$ unidades del agua cruda es suficiente para obtener valores bajos de turbiedad remanente (T_f), sin necesidad de ajustar el pH del agua cruda y utilizar reactivo innecesario que repercutiría finalmente en elevar los costos de tratamiento.

Dentro de la escala ácida, no es conveniente ajustar el pH del agua cruda, puesto que los resultados muestran que se elevan los valores de turbiedad remanente, principalmente de 4 a 5 unidades y al llegar de 6 a 7 bajan los valores de tratamiento súbitamente.

Por lo tanto la gráfica U.2.1 indica que el pH óptimo de coagulación comprende el intervalo de 7 a 7.7 unidades, donde se presentan los valores más bajos de turbiedad remanente (T_f).

En este caso corresponden a los valores presentados por el agua cruda.

VI.C DETERMINACION DE LA CONCENTRACION OPTIMA DE COAGULANTE

Mediante las gráficas de barras de Turbiedad Remanente vs Porcentaje de Concentración de Coagulante (%) (gráficas V.4.1 a V.4.4) para los diferentes tiempos de retención, se pueden fijar claramente los límites de concentración de coagulante bajo el cual se obtienen buenos y aceptables resultados de tratamiento de agua cruda, es decir, mediante estas gráficas se puede verificar que bajo un intervalo de concentración de 1% a 2% se obtienen los mejores resultados de tratamiento que corresponden a los valores mínimos de turbiedad remanente (T_f).

Para la selección de la concentración de solución del coagulante metálico (sulfato de aluminio), es necesario considerar la turbiedad inicial (T_0) del agua cruda y el tiempo de retención que se va a utilizar en el proceso de floculación. Se consulta la gráfica de barras (V.4.1 a V.4.4) correspondiente al tiempo de retención y se fija la concentración óptima del coagulante metálico, previamente seleccionando tanto la dosificación como el pH óptimos de tratamiento.

VI.D DETERMINACION Y OBTENCION DE LA ECUACION DE LOS
PARAMETROS FISICOS OPTIMOS "G" Y "T" DE FLOCULACION.

En función de los resultados obtenidos en los diferentes Ensayos de "Prueba de Jarras", se encontró la ecuación que determina los parámetros físicos óptimos "G" y "T", gradiente y tiempo de retención respectivamente, para la Planta Potabilizadora Piloto "Necaxa" de acuerdo a la turbiedad inicial (To) del agua cruda de la presa "Necaxa".

Mediante la ecuación:

$$1.333 \quad 3.16$$

$$G \quad x \quad T = 10$$

Se obtiene la gráfica V.5.6 Gradiente Optimo de G* vs T Tiempos de Floculación, que se utiliza para conocer, en función de diferentes tiempos de floculación el gradiente de velocidad óptima y la agitación correspondiente.

El análisis de la teoría de los mínimos cuadrados ó regresión lineal aplicado a las eficiencias residuales (nr) que presentó cada tratamiento del agua cruda, se determinó la Ecuación de Floculación.

Los menores valores de eficiencia residual:

$$nr = (Tf / To) \times 100$$

corresponden a la mayor eficiencia remocional:

$$nR = 100 - nr$$

TABLA VI.1.1

TABULACION DE LOS PARAMETROS FISICO-QUIMICOS OPTIMOS SELECCIONADOS	
NUMERO	PARAMETRO
VI.1.A	OBTENCION DE LA ECUACION DE DOSIFICACION OPTIMA DE COAGULANTE
ECUACION:	$\log T = 0.4761 + 0.0360 (C)$
GRAFICA:	V.1.6 Correlación de Turbiedad de Agua Cruda vs Dosis Optima de Coagulante
VI.1.B	DETERMINACION DEL INTERVALO DE pH OPTIMO DE COAGULANTE
INTERVALO:	7.0 - 7.7 unidades
GRAFICA:	V.2.1 Turbiedad Residual vs pH Agua Cruda (ajustado)
VI.1.C	DETERMINACION DE LA CONCENTRACION OPTIMA DE COAGULANTE
INTERVALO:	1.0 - 2.0 % de solución de coagulante
GRAFICAS:	V.4.1 a V.4.4 Turbiedad Residual vs Porcentaje (%) de Concentración de Coagulante para diferentes Tiempos de Retención
VI.1.D	DETERMINACION Y OBTENCION DE LA ECUACION DE LOS PARAMETROS FISICOS OPTIMOS "G" Y "T" DE FLOCULACION
ECUACION:	$\log G = 2.3710 - 0.7502 \log T$
GRAFICA:	V.5.6 Valores Optimos de G* vs Tiempo de Floculacion

VI.2 EXPERIMENTOS DE LABORATORIO PROPUESTOS PARA DETERMINACION
DE PARAMETROS FISICO-QUIMICOS DEL PROCESO
COAGULACION-FLOCULACION

VI.2.1 Objetivo:

Para fines de investigación y/o docencia, a continuación se proponen experimentos de laboratorio adicionales a los Ensayos de "Prueba de Jarras" realizados en esta tesis. Estos experimentos reafinan la determinación de los parámetros físico-químicos aplicables a otras fuentes de agua cruda para potabilización.

VI.2.2 Metodología.

Se aplicarán "Pruebas de Jarras" a los experimentos propuestos, indicándose las variables seleccionadas para cada determinación.

Experimentos de Laboratorio Propuestos:

VI.2.A Determinación de la Eficiencia de los Polielectrolitos

Combinación de coagulante-polímero

Coagulante	Polielectrolito
sulfato de aluminio	cat-floc (catiónico)
cloruro férrico	cat-floc (catiónico)
sulfato de aluminio	separán NP-10 (aniónico)
cloruro férrico	separán NP-10 (aniónico)

Se pueden formar cuatro grupos para que cada uno experimente con una combinación.

Experimento VI.2.1

Manteniendo dosificación óptima de coagulante constante aplicar a cada jarra dosis variables de polielectrolito, utilizando intervalos de 0.1 -- 1.0 mg/lit.

Experimento VI.2.2

Fijando dosis óptima de polielectrolito constante (el mejor resultado del experimento VI.2.1), variar dosis óptima de coagulante (75% del óptimo) para cada jarra a un intervalo de 0.5 en 0.5 mg/lit.

Experimento VI.2.3

Con la mejor combinación de dosificación óptima de coagulante-polímero, determinar los parámetros físicos de floculación, siguiendo la misma metodología del inciso V.5 del capítulo V.

VI.2.B Determinación de la Eficiencia de los Polielectrolitos utilizando Turbiedades Artificiales.

Para obtener turbiedades artificiales, preparar suspensiones de caolín al 0.5%, 1%, 5% y 10%.

Se pueden formar cuatro grupos para que cada uno experimente con una concentración.

Experimento VI.2.4

Preparar suspensión de caolín (0.5%, 1%, 5%, 10%)

Variar dosis de caolín de 25 en 25 ppm para cada jarra y mantener dosis óptima de coagulante constante (la dosis utilizada en el experimento VI.2.1).

Experimento VI.2.5

Con la mejor dosis de caolín y coagulante aplicar a cada jarra dosis variables de polielectrolito (mejor resultado del experimento VI.2.2) a un intervalo de 0.1 -- 1.0 mg/lt.

Experimento VI.2.6

Con la mejor combinación de dosificación óptima de polielectrolito-coagulante-caolín, determinar los parámetros físicos de floculación (siguiendo mismo procedimiento del experimento VI.2.3).

VI.2.3 Procedimiento.

El procedimiento de realización de los experimentos es aplicar las "Pruebas de Jarras" utilizando las mismas variables de los

ensayos del capítulo V.

Para los Experimentos VI.2.1, VI.2.2, VI.2.4 y VI.2.5, aplicar:

Volumen de la muestra : 1.5 lt (agua cruda)
 Mezcla Rápida : N = 100 rpm t = 1 min.
 Mezcla Lenta : N = 40 rpm t = 24 min.
 Sedimentación : N = 0 rpm t = 5 -- 10 min.
 Volumen para análisis : 200 ml

Para los Experimentos VI.2.3 y VI.2.6, aplicar:

Volumen de la muestra : 1.5 lt (agua cruda)
 Mezcla Rápida : N = 100 rpm t = 1 min.
 Mezcla Lenta : N = variable t = variable
 Gradiente G (seg-1) : 20 30 40 50 60 70
 T. floc. T (min) : 5 10 15 20 25 30
 Sedimentación : N = 0 rpm t = 5 -- 10 min.

A las muestras de agua cruda y tratada, los análisis que se deben de determinar son:

- turbiedad
- pH
- temperatura
- color

Los equipos que se pueden utilizar, son los mencionados en el Capítulo V.1 Obtención de la Ecuación de Dosificación Óptima de Coagulante, inciso V.1.3 Evaluación.

VI.2.4 Evaluación.

Para los experimentos VI.2.1, VI.2.2, VI.2.4 y VI.2.5, la

evaluación se realiza graficando los valores de turbiedad remanente vs dosis de reactivo (mg/lit). Se selecciona para cada ensayo los puntos que producen el menor valor de turbiedad remanente como dosis óptima de tratamiento.

Para los Experimentos VI.2.3 y VI.2.6, la evaluación se realiza en dos partes.

Primero. Se grafican los valores de eficiencia residual $n_r = (T_f/T_o) \times 100$ vs periodo de floculación, se selecciona el periodo total de floculación en función del punto que produce el menor valor de n_r , que corresponde a la mayor eficiencia remocional $nR = 100 - n_r$

Segundo. Se grafican los valores de n_r vs gradiente de velocidad, para los diferentes periodos de floculación, se seleccionan los puntos que producen el menor valor de n_r para cada gradiente de velocidad, dichos puntos corresponden a la máxima eficiencia remocional $nR = 100 - n_r$.

Los puntos seleccionados de las dos gráficas anteriores, se analizan aplicando la teoría de los mínimos cuadrados a la ecuación de una línea recta: $Y = a + bX$

De esta manera se obtiene la ecuación de floculación de los experimentos VI.2.3 y VI.2.6, mediante estas ecuaciones se pueden determinar los parámetros físicos "G" y "T" de floculación, así como determinar la curva de gradientes de velocidad óptimos (*G) para diferentes tiempos de floculación de ambos experimentos.

VII. CONCLUSIONES

La función de las plantas potabilizadoras es producir siempre y bajo cualquier condición agua potable. Por tal razón, es importante realizar un control adecuado del laboratorio, en particular a los Ensayos de "Prueba de Jarras", para que la producción del agua reúna las condiciones ideales de los procesos, se obtengan las normas y/o calidad prevista del tratamiento en la forma más económica.

De acuerdo al programa de los Ensayos de "Prueba de Jarras", se alcanzaron los objetivos señalados para encontrar los Parámetros Físico-Químicos Óptimos del Proceso de Coagulación-Floculación.

Se encontró la Ecuación de Dosificación Óptima de Coagulante (sulfato de aluminio), así como la gráfica de Correlación de Turbiedad de Agua Cruda vs Dosificación Óptima de Coagulante.

Se determinó el Intervalo Óptimo de pH bajo el cual se obtienen buenos resultados de Dosificación de Sulfato de Aluminio. Se obtuvo la gráfica de Turbiedad Remanente vs pH de Agua Cruda (ajustado).

Se delimitó el Intervalo de Concentración de Solución de Coagulante en función de la Turbiedad Inicial del Agua Cruda para diferentes Tiempos de Retención. Se obtuvieron las gráficas de barras de Turbiedad Remanente para diferentes Tiempos de Retención.

Se determinó la Ecuación de Floculación que permite calcular los Parámetros Físicos Óptimos "G" y "T", así como la Obtención de la gráfica de Gradientes de Velocidad Óptimos (G*) para diferentes Tiempos de Floculación que se pueden aplicar en la planta de tratamiento.

La adición adecuada de polielectrolitos como ayudantes de coagulación y/o floculación, reduce los costos de tratamiento por las bajas dosis que se emplean de coagulante y aumenta la eficiencia en las carreras de filtración. Si se selecciona el polímero más adecuado el tipo de flóculo formado permite la formación de lodos que pueden ser fácilmente disponibles en el proceso de sedimentación.

Desafortunadamente, la planta piloto en su etapa de preoperación no contó con la adquisición de los polielectrolitos, por tal razón no fue posible experimentar con los polímeros en los Ensayos de "Prueba de Jarras".

Finalmente podemos agregar, que el estudio de la construcción de la Planta Potabilizadora Piloto "Necaxa", en su primera etapa de experimentación del agua cruda de la presa "Necaxa" y mediante la realización del programa a nivel de laboratorio de los Ensayos de "Prueba de Jarras", para la obtención de los Parámetros Físico-Químicos Óptimos del Proceso de Coagulación-Floculación, utilizando como coagulante metálico sulfato de aluminio, iniciaron la experimentación de la potabilización de las aguas superficiales captadas en la presa

"Necaxa".

Es necesario mencionar que, los resultados obtenidos en el laboratorio de los Ensayos de "Prueba de Jarras" aplicados al agua cruda de la presa "Necaxa" en la planta piloto, no se pueden generalizar, puesto que las características físicas del agua cruda son diferentes para cada fuente, y por lo tanto cada caso particular requiere de un tratamiento especial.

Sin embargo, los Ensayos de "Prueba de Jarras" pueden ser tomados como experimentos básicos con las modificaciones adecuadas en la determinación de parámetros Físico-Químicos del proceso coagulación-floculación para otras características de agua cruda presentadas en otras fuentes de interés para potabilización de agua.

Los procesos convencionales de tratamiento de agua son confiables y aplicables a otras fuentes de agua cruda y es mediante los Ensayos de "Prueba de Jarras" el vehículo a través del cual se pueden afinar los procesos de clarificación y por consiguiente obtener la mayor eficiencia y calidad del agua tratada en función de las normas establecidas para la potabilización del agua.

VIII. BIBLIOGRAFIA

- VIII.1 Carrión, J. M., Castro de Esparza, M. J.
Cáñepa de Vargas, J.
Programa Regional OPS/EHP/CEPIS de Mejoramiento de
Calidad de Agua para Consumo Humano.
Ciclo: CB 4.5 Procesos Unitarios-Laboratorio
Abril 1981.
- VIII.2 Arboleda Valencia, J.
Teoría Diseño y Control de los Procesos de Clarificación
de Agua.
Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias
del Ambiente (CEPIS). OMS
Serie técnica 13.
- VIII.3 Departamento de Ingeniería Sanitaria, División
Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería, UNAM.
Normas Técnicas para el Proyecto de Plantas
Potabilizadoras.
México, D.F., Octubre 1979.
- VIII.4 Desarrollo y Sistemas S.A.
Estudio de una Planta Potabilizadora Piloto en la
Cuenca Alta del Río Tecolutla.
Manual de Operación y Mantenimiento
Diciembre 1984.

- VIII.5 Perry, J. H.
Manual del Ingeniero Químico
Tomo II, 3a. ed., México, D.F., UTEHA, 1979
- VIII.6 Foust, A. S.
Principios de Operaciones Unitarias
1a. ed., México, D.F. CECSA, 1975
- VIII.7 Duncan J. Shaw.
Introducción a la Química de Superficies y Coloides
1a. ed., México, D.F., Alhambra, 1970
- VIII.8 Six Paddle Stirrer
Operating Instructions
Model 7790-300 Phipps & Bird
- VIII.9 Laboratory Turbidimeter
Instruction Manual
Model 2100 A Hach.
Hach, Company.
- VIII.10 pH Meter
Instruction Manual
Model 7, Direct Indicating.
Corning, Company.