

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
Facultad de Ingeniería Ambiental



**UTILIZACION DE ALMIDONES COMO
AYUDANTES DE FLOCULACION EN EL
TRATAMIENTO DE AGUAS PARA
CONSUMO HUMANO**

TESIS

**Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Sanitario**

**RONCAL VERGARA
SEGUNDO FAUSTO**

**SIU CHIRINOS
ROSARIO**

Asesora: ING. LIDIA CANEPA DE VARGAS

**Lima - Perú
1990**

EL AGRADECIMIENTO INCONDICIONAL A
MI PADRE Y A MI QUERIDA MADRE, FORJADORES
DE MI FORMACION, Y A MIS HERMANAS,
QUIENES EN FORMA CONJUNTA ME APOYARON
E INCENTIVARON PARA HACER REALIDAD
EL PRESENTE TRABAJO DE TESIS.

S.F.R.V.

CON TODO MI AMOR, A MI QUERIDA
MADRE, QUIEN CON SU INVALORABLE
ESFUERZO Y CARÍÑO ME ACOMPAÑO
Y ALENTO EN TODO MOMENTO, Y A
MIS HERMANOS POR SU CONSTANTE
APOYO Y COMPRESION.

R.S.CH.

AGRADECIMIENTOS

- A la Ingeniera Lidia Cánepa de Vargas, nuestra Asesora, por su continuo estímulo al perfeccionamiento técnico y científico de la investigación.
- Al Laboratorio Central del Servicio Nacional de Abastecimiento de Agua Potable y Alcantarillado (SENAPA), cuyas instalaciones hicieron posible la elaboración de los estudios de laboratorio programados.
- A los profesionales del Laboratorio Central de SENAPA, por su apoyo en la parte experimental del trabajo: Ing. Enrique Núñez Perales y la Bach. en Química, Srta. Myriam Arteaga Quispe.
- Al Servicio de Agua Potable de Lima (SEDAPAL), por brindarnos sus instalaciones para la ejecución de los ensayos con agua natural.
- A la Gerencia del Sistema de Capacitación y Desarrollo Tecnológico del SENAPA, que nos dió facilidades para el procesamiento de los resultados obtenidos.
- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYTEC), por brindarnos el apoyo financiero para la publicación del documento.
- No podríamos dejar de agradecer también a todos y cada uno de aquellos que directa o indirectamente contribuyeron a alcanzar los objetivos propuestos en esta investigación.

- A la señora Quim. María Luisa Castro de Esparza por brindarnos su apoyo en la ejecución del presente trabajo, con su experiencia.

- A la Ingeniera Alicia Chang Wong, por su continuo apoyo y estímulo.

- A la señorita Nancy Puente de la Vega B., por brindarnos su constante ánimo y por su excelente trabajo en la dactilografía del presente documento.

"LA MENTE PROGRESA SOLO CUANDO LOS HOMBRES SE ENCUENTRAN RELATIVAMENTE LIBRES PARA INVESTIGAR Y EXPLORAR TANTO EL MUNDO MATERIAL QUE LOS RODEA COMO SU PROPIA CONDUCTA. ESA ES SU TESIS CENTRAL.

POR EL CONTRARIO, LA MENTE HUMANA RETROCEDE CUANDO LA AUTORIDAD, LA TRADICION Y LAS IDEAS FIJAS AHOGAN LA LIBRE INVESTIGACION.

DEJEMOS ABIERTOS NUESTROS PENSAMIENTOS A LAS NUEVAS IDEAS, E INVESTIGUEMOS A CONCIENCIA....."

RESUMEN

Este trabajo presenta los resultados y conclusiones de la investigación realizada con almidones, teniendo como propósito el verificar su eficiencia como ayudante de floculación, en el tratamiento de aguas para consumo humano.

Los estudios fueron efectuados con los almidones convencionales más comunes en nuestro medio: almidón de papa, almidón nativo de maíz, almidón de maíz catiónico, y almidón de maíz pregelatinizado.

El trabajo de Laboratorio se realizó en tres etapas: La primera orientada a la solubilización de los almidones descritos, y selección del método más adecuado para su activación.

La segunda etapa comprendió el empleo de almidones en ensayos de floculación, con cuatro muestras de agua artificial, en agua natural, incluyendo pruebas complementarias, con la finalidad de mejorar las condiciones de aplicación de estos productos.

De los diversos almidones ensayados, tanto en su activación como en pruebas de Jar Test, aquel que proporcionó el mejor desempeño fue el almidón de papa.

No existe duda de que la utilización del almidón de papa, en el tratamiento de aguas de abastecimiento, posibilita una operación unitaria de floculación más eficiente, en aguas en donde los valores

de turbiedad son bajos y altos los de alcalinidad. Además proporciona flóculos más densos y con mayores velocidades de sedimentación.

Permite también la obtención de una agua de mejor calidad, y un volumen de lodos mucho menor, que cuando se utiliza sólo sulfato de aluminio, permitiendo una operación continua más prolongada de las unidades de decantación.

Con respecto a los costos de productos químicos, existe una probable reducción de los mismos, como consecuencia del ahorro en la dosis de sulfato de aluminio, cuando se emplea el almidón de papa como auxiliar de floculación. Entre tanto, los costos de aplicación de este polímero natural, con relación a los polielectrolitos sintéticos son considerablemente más bajos, puesto que su obtención y preparación se efectúan en nuestro medio.

Además de esto, muchos polielectrolitos sintéticos, presentan dudas con respecto a los efectos secundarios que pueden provocar sobre la salud de los consumidores, problema que es superado con la aplicación de polímeros naturales.

Todos estos polímeros naturales fueron probados conjuntamente con sulfato de aluminio, habiéndose determinado también, los parámetros cinéticos relativos a sus características floculantes.

Los resultados obtenidos llevaron a la conclusión de que el almidón

de papa constituye una alternativa exitosa, (y probablemente a costos menores), para muestras de baja turbiedad y alta alcalinidad, mejorando las condiciones de floculación del agua artificial y natural probadas.

SUMMARY

=====

This work presents the results and conclusions of the research done with starch, having as objective to verify its efficiency as helper of flocculation, in the treatment of water for human consumption.

The studies were done with the most common commercial starchs: potato native starch, corn native starch, cationic corn starch and pre-gelatinized corn starch.

The has work was made in three stages: the first oriented to solubilization of the mentioned starchs and the selection of the most adequated method for its activation.

The second corresponded to the use of starchs in the flocculation test, with four samples of artificial water of different characteristics.

The third one consisted in the application of the starch that provided the best results with artificial water, in natural water, including complementary test, to improve the conditions for the application of these products.

Of all the starchs tested as well as in its activation as in the Jar Test, the one which provided the best performance was the potato starch.

There is no doubt that the use of potato starch, in the treatment of waters for supply, gives the possibility of a unitary operation of the most efficient flocculation in waters in the which the turbidity values are low and the alkalinity ones are high. It also provides more dense flocs and with higher speeds of sedimentation.

It also allows to obtain a better quality of water and a lower volume of sludges than when it's used just aluminium sulphate, letting a prolonged continuous operation of the regarding to the costs of chemical products, there is a probable reduction for them for the saving of the aluminium sulphate dosing, when is used the potato starch as a flocculation helper. Mean while there cost of application for this natural polymer related with the synthetic polyelectrolytes are considerably lower because its obtention and preparation are made in our medium.

In addition, some of the synthetic polyelectrolytes present doubts about the secondary effects which can bring to the health of consumers a problem that can be avoided with the application of natural polymers

All these natural polymers were tested with the aluminium sulphate having determined the kinetic parameters about flocculant characteristics.

The conclusion of the results obtained is that the potato starch is a successful alternative (and probably at lower costs) for samples

of low turbidity and high alkalinity, improving the conditions of flocculation of tested natural and artificial water.

I N D I C E

Pág. N°

LISTAS DE SIMBOLOS

1.	INTRODUCCION	1
2.	ALCANCES Y OBJETIVOS	6
3.	ANTECEDENTES	8
4.	CONCEPTOS GENERALES	10
4.1	DEFINICIONES PREVIAS	10
4.2	EL AGUA-CARACTERISTICAS	10
4.2.1	Características físicas	11
4.2.2	Características químicas	13
4.2.3	Características bacteriológicas	18
4.3	COAGULACION DEL AGUA	19
4.3.1	Definición	19
4.3.2	Mecanismos de desestabilización	20
4.3.3	Tipos de coagulación	29
4.3.4	Factores que influyen en la coagulación	39
4.4	FLOCULACION DEL AGUA	39
4.4.1	Definición	39
4.4.2	Mecánica de la floculación	42
4.4.3	Factores que influyen en la floculación	44

4.4.4	Ecuaciones para determinar la eficiencia de floculación	48
4.4.5	Parámetros operacionales	50
5.	POLIMEROS	60
5.1	DEFINICION	60
5.2	ESTRUCTURA DE LOS POLIMEROS	60
5.3	CLASIFICACION DE LOS POLIMEROS	61
5.3.1	Por su carga	61
5.3.2	Por su origen	63
5.4	MODO DE ACCION DE LOS POLIMEROS	65
5.5	IMPORTANCIA DE LOS POLIELECTROLITOS EN LA FLOCULACION	67
5.5.1	Teoría de floculación con polielectrolitos	67
5.5.2	Parámetros de importancia y sus efectos en la tasa de floculación	70
6.	ALMIDONES	95
6.1	COMPOSICION DE LOS ALMIDONES	95
6.2	CARACTERISTICAS DE LOS ALMIDONES	96
6.3	CARACTER ELECTRICO DE LOS ALMIDONES	100
6.4	SELECCION DEL METODO DE APLICACION Y ALMACENAMIENTO	102
6.5	PRODUCCION DE ALMIDONES	104

7.	DESCRIPCION DEL EQUIPO Y DE LA METODOLOGIA DE TRABAJO	110
7.1	DESCRIPCION DEL EQUIPO	110
7.1.1	Descripción del equipo de prueba de jarras	110
7.1.2	Componentes más importantes del equipo	111
7.1.3	Precauciones-limitaciones	117
7.1.4	Consideraciones generales para la ejecución de ensayos en la prueba de jarras	120
7.1.5	Equipo adicional utilizado en los ensayos de floculación	127
7.2	CARACTERISTICAS DE LOS PRODUCTOS QUIMICOS UTILIZADOS EN LAS PRUEBAS DE LABORATORIO	129
7.2.1	Almidones	130
7.2.2	Hidróxido de sodio	131
7.2.3	Sulfato de aluminio	132
7.2.4	Agua desionizada	134
7.3	METODOLOGIA DE TRABAJO	135
7.3.1	Selección de almidones a estudiar	135
7.3.2	Solubilización de almidones	136

7.3.3	Acondicionamiento de las muestras de agua artificial para los ensayos de floculación	139
7.3.4	Ensayos de floculación	143
7.3.5	Parámetros estudiados en los ensayos de floculación	146
	K_A, K_B, K_C	
8.	SOLUBILIZACION DEL ALMIDON	163
8.1	Hidrólisis al ambiente	163
8.2	Hidrólisis térmica	164
8.3	Hidrólisis térmica-ácida	165
8.4	Hidrólisis térmica-alcalina	165
8.5	Almidón calcinado en seco	165
8.6	Hidrólisis en frío (método químico)	166
8.7	Presentación y discusión de resultados	167
8.8	Conclusiones	168
9.	EMPLEO DEL ALMIDON SELECCIONADO CON AGUA ARTIFICIAL	171
9.1	CARACTERISTICAS DE LAS MUESTRAS DE AGUA ARTIFICIAL	171
9.2	RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS DE FLOCULACION	172
9.2.1	MUESTRA I	172

9.2.2	MUESTRA II	179
9.2.3	MUESTRA III	184
9.2.4	MUESTRA IV	189
9.3	DISCUSION DE RESULTADOS	193
9.4	CONCLUSIONES	197
10.	EMPLEO DEL ALMIDON SELECCIONADO CON AGUA NATURAL	259
10.1	PROCEDENCIA DEL AGUA NATURAL	259
10.2	CARACTERISTICAS DEL AGUA NATURAL	260
10.3	PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS	261
10.4	CONCLUSIONES	265
11.	PRUEBAS COMPLEMENTARIAS CON ALMIDON DE PAPA	283
11.1	ALMIDON COMO COAGULANTE PRIMARIO	283
11.2	ORDEN DE ADICION DEL COAGULANTE	285
11.3	COMPARACION DE EFICIENCIA ENTRE POLIELECTROLITOS: ALMIDON DE PAPA Y CAT FLOC C.	286
11.4	ANALISIS DE VOLUMEN DE LODOS	288
11.5	CONCLUSIONES	291
12.	ANALISIS DE COSTOS DE PRODUCTOS QUIMICOS	300
12.1	PARA EL PORCENTAJE DE REDUCCION DE SULFATO DE ALUMINIO	301

12.2	COSTOS COMPARATIVOS CON POLIMEROS SINTETICOS	302
12.3	CONCLUSIONES	303
13.	CONSIDERACIONES SOBRE LA ELABORACION Y UTILIZACION DEL ALMIDON DE PAPA EN LABORATORIO	305
13.1	PREPARACION DEL ALMIDON. GELATINIZACION	305
13.1.1	Preparación del almidón nativo de papa	306
13.1.2	Gelatinización	306
13.2	LA GENTE: Otro factor que afecta la aplicación exitosa de los polímeros	308
13.3	PRECAUCIONES-ALMACENAJE	309
13.3.1	Precauciones	309
13.3.2	Almacenaje	310
14.	CONCLUSIONES	311
15.	RECOMENDACIONES	316
16.	BIBLIOGRAFIA	318
	ANEXO 1	
	ANEXO 2.	

SIMBOLOGIA GENERAL

=====

a	Velocidad mínima de sedimentacion
A_d	Alcalinidad del agua desionizada
ALM	Almidón
Am	Alcalinidad media deseada
Anm	Peso de almidón nativo de maíz
Ao	Alcalinidad inicial del agua cruda
A'o	Alcalinidad inicial del agua de la red pública
A''o	Alcalinidad inicial del agua desionizada
Pp	Peso de almidón de papa
Ar	Alcalinidad de la red pública
b	Constante de Langmuir
Bm	Peso de agua
ϕ	Concetración de coagulante
C_f	Concentración final de partículas floculentas
CFC	Cat Floc C
C,CNaOH	Peso de soda cáustica utilizada en la activación del almidón.
Co	Conductividad inicial del agua cruda
C'o	Conductividad del agua de la red pública.
C''o	Conductividad del agua desionizada
C (Tf/To)	Concentración de partículas floculentas
D	Dósis de coagulante
D'	Dósis reducida de sulfato de aluminio

d'CFC	Dosis óptima de Cat Flocc C
D _{ALM}	Dosis de almidón de papa
Do	Dureza inicial del agua cruda
D'o	Dureza del agua de red pública
D''o	Dureza de agua desionizada
D _{SO₄}	Dosis de sulfato de aluminio
E	Eficiencia de floculación
Eremoc	Eficiencia remocional
G	Gradiente de velocidad
G*	Gradiente óptimo de velocidad
G.t	Número de CAMP.
h	Altura de toma de muestra
IN	Indice de Willcomb
K _A	Constante de agregación de partículas
K _B	Constante de ruptura de flóculos
K _C	Constante de eficiencia de floculación
m	Constante, depende del área específica de las partículas
Na	Concentración de partículas de alcalinidad acondicionada
N' _O	Número de partículas que ingresan al reactor
N' ₁	Número de partículas primarias que salen del reactor
N ₀	Concentración de partículas de la solución madre
Nm	Concentración media de partículas
Po	Concentración de polielectrolito
pHo	Potencial de hidrógeno inicial, del agua cruda

pH'o	Potencial de hidrógeno, del agua de la red pública
pH''o	Potencial de hidrógeno del agua desionizada
RT	Remoción de turbiedad
r	Coefficiente de correlación
Sa	Número medio de segmentos por moléculas de polielectrolitos.
SO ₄	Solo sulfato de aluminio
SO ₄ + ALM	Sulfato de aluminio más almidón
SO ₄ + CFC	Sulfato de aluminio más Cat Floc C
t, T	Tiempo de floculación
Ta	Tiempo de adición de polímero
Tf	Turbiedad final
TML	Tiempo de mezcla lenta
TMR	Tiempo de mezcla rápida
To	Turbiedad inicial del agua cruda
TR	Turbiedad removida
T _R	Turbiedad residual
Tsed	Tiempo de sedimentación
(To/Tf) _{máx}	Máxima eficiencia de floculación
Va	Volumen de muestra de alcalinidad acondicionada
Vd	Volumen de agua desionizada
Vm	Volumen medio de muestra
VML	Velocidad de rotación de mezcla lenta
VMR	Velocidad de rotación de mezcla rápida

V_r	Volumen de agua de la red pública
V_s	Volumen de solución madre, para la obtención de muestras artificiales
V_r	Volumen total final
V_s	Velocidad de asentamiento de flóculos
Ψ_o	Potencial de Nerst
Ψ_ϕ	Potencial Phi
Ψ_5	Potencial Zeta
θ	Fracción de "sitios" superficiales descubiertos en una partícula.

1. INTRODUCCION

1. INTRODUCCION

Los métodos modernos de tratamiento de aguas para consumo humano, incluyen la aplicación de polielectrolitos sintéticos comerciales.

Los polielectrolitos sintéticos han venido utilizándose desde hace ya varias décadas, su empleo mejoró la eficiencia del tratamiento de las aguas, lo cual trajo como consecuencia el lanzamiento de diversos productos con tales características.

El uso de polielectrolitos orgánicos en el tratamiento de las aguas puede incrementar la velocidad de sedimentación del flóculo, mejorar la calidad del efluente, reducir el volumen de los lodos depositados y mejorar sus características, facilitando la disposición final. Así mismo, podría significar una disminución en los costos de tratamiento.

Sin embargo, el uso de estos polielectrolitos tiene sus limitaciones, existe riesgos para la salud de los consumidores, debido a la toxicidad de ciertos tipos de polielectrolitos sintéticos.

Ante la preocupación demostrada por la Organización Mundial de la Salud (OMS), por los eventuales problemas de salud relacionados con la utilización de estos polímeros sintéticos, fueron realizadas investigaciones, las cuales establecieron que existe

riesgo potencial a la salud, al emplear estos productos (1).

Teniendo en cuenta lo expuesto, existe la necesidad de investigar con sustancias naturales que puedan ser empleadas eficientemente como polielectrolitos y que no ofrezcan peligro a la salud de los consumidores.

La toxicidad de los polímeros naturales es, por lo general, mínima o nula, ya que en muchos casos son usados como comestibles o como aditivos en diversos productos alimenticios.

Como los polímeros naturales no causan perjuicios a la salud, sus propiedades coagulantes deben ser estudiadas, de modo que puedan sustituir a los productos comerciales potencialmente peligrosos, con ventajas principalmente en el aspecto sanitario.

Considerando el aspecto económico, cabe notar que los polímeros naturales son de fácil obtención y no exigen complejos procesos químicos e industriales.

Actualmente en nuestro país, la Planta de Tratamiento de Agua de Lima, utiliza los polímeros sintéticos comerciales sin que se efectúe un control de calidad (para verificar si las trazas de impurezas se encuentran dentro de los límites asignados), de acuerdo a las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud.

También el Servicio Nacional de Abastecimiento de Agua Potable y Alcantarillado (SENAPA), está estudiando la posibilidad de extender su uso a otras plantas de tratamiento de agua del país.

Otros países como E.U.A. y Brasil ya han realizado investigaciones sobre la utilización de polímeros naturales en el tratamiento de aguas para consumo humano, reemplazando los sintéticos, con resultados muy positivos (2).

Aprovechando la información existente, este trabajo se orientará principalmente a seleccionar e identificar, entre los almidones en nuestro medio, aquel que produzca la máxima eficiencia técnico-económica, y que además sea de fácil obtención y utilización para este fin.

Los polímeros pueden actuar como coagulantes, cuando el polímero es agregado al agua como único coagulante; como ayudante de coagulación, cuando es agregado antes que el coagulante metálico; como ayudante de floculación, cuando el polímero es agregado después del coagulante metálico; y en algunos casos como ayudante de filtración. En la práctica, la mayoría de los polímeros se usan como ayudantes de floculación, pues se adicionan de 30 a 60 segundos después del coagulante metálico, cuando las partículas ya se encuentran desestabilizadas. Sin embargo,

no existe ninguna manera de conocer de antemano si un polímero puede actuar mejor como ayudante de coagulación o como ayudante de floculación. La eficiencia de éstos sólo podrá ser determinada mediante cuidadosos ensayos a nivel de laboratorio y de planta, trabajando con el agua que se va a tratar.

Dentro de los polímeros naturales con características similares a los polielectrolitos que hasta el momento se usan en el tratamiento de agua se encuentran: los compuestos de celulosa, almidón y sus derivados, polisacáridos, alginato (extraído de algas marinas pardas: Phaeophyceas), goma extraída de cactus *Opuntia Ficus* Índica, gelatina común, etc.

Este trabajo enfatizará la utilización de almidones como ayudantes de floculación en el tratamiento de agua, específicamente, se estudiarán los almidones de papa y maíz, debido a que se encuentran en abundancia en nuestro medio y pueden ser extraídos con relativa facilidad.

Teniendo en cuenta que el almidón en estado nativo tiene como desventaja su insolubilidad en agua fría (3), se realizará ésta por el método de la gelatinización. Usaremos este método porque en investigaciones previas (4), se estableció que éste es el método más efectivo para solubilizar el almidón.

Los ensayos de laboratorio se harán con cada almidón, y se

seleccionará el que dé la mejor solución técnico-económica.

Por todo lo expuesto, nos hemos visto en la necesidad de hacer extensivo este tipo de investigaciones y teniendo en cuenta que el presente trabajo de tesis no tiene como objetivo descubrir nuevas técnicas de tratamiento, sino el de adecuarlas a nuestro medio, haciendo uso de los recursos existentes en el país, con la sola idea de aportar, en cierto modo, resultados que puedan contribuir al desarrollo de tecnologías adecuadas a nuestra realidad y por ende al desarrollo de la Ingeniería Sanitaria en el Perú.

2. ALCANCES Y OBJETIVOS

2. ALCANCES Y OBJETIVOS

La utilización de polielectrolitos sintéticos en el tratamiento de aguas para consumo humano es una práctica que ha venido desarrollándose y estimulándose de forma extraordinaria. Pero existen factores importantes que deben ser ponderados cuando se quiera hacer uso de estos productos: el costo relativamente alto, y lo que es muy importante, el riesgo potencial que existe para la salud de los consumidores.

Es necesario investigar sustancias naturales que puedan ser empleadas eficientemente como polielectrolitos, que no ofrezcan peligro a la salud de los consumidores, que se encuentren en abundancia en nuestro medio y que puedan ser extraídas con relativa facilidad.

Por tanto, la finalidad básica de este trabajo es la de contribuir a la solución de los problemas que dificultan la utilización de polímeros en nuestro país, es decir:

- 2.1 Complementar y esclarecer los estudios de cinética, cuando los almidones son utilizados como ayudantes de floculación.
- 2.2 Verificar la utilización de los almidones como ayudantes de floculación, a fin de mejorar la eficiencia de los procesos de coagulación, floculación y sedimentación.
- 2.3 Reducir los costos de tratamiento, tanto directamente

en función de los costos de productos químicos, como indirectamente, debido a los equipos y mano de obra necesarios para su preparación y aplicación.

- 2.4 Evitar la dependencia en la importación de polímeros sintéticos, para tratamiento de aguas, contribuyendo a superar los problemas de algún eventual desabastecimiento de productos químicos.

- 2.5 Contribuir al desarrollo de tecnologías adecuadas a nuestro medio, haciendo uso de los recursos existentes en el país.

3. ANTECEDENTES

3. ANTECEDENTES

La mención más antigua que se conoce sobre los polímeros solubles en agua, se ha encontrado en la literatura escrita en sancrito, alrededor del año 2000 A.C.. En esta época polímeros naturales, tales como: derivados de almidón, gomas, etc., se usaban como agentes clarificadores para el vino.

En la actualidad el uso de polímeros que contienen grupos ionizables está bastante extendido en el tratamiento de agua potable, como reemplazo de coagulantes primarios, ayudantes de coagulación, ayudantes de floculación, ayudantes de filtración, etc., y es práctica corriente en los procesos modernos de tratamiento del agua.

Se tiene conocimiento que productos naturales han sido y son empleados como clarificadores de agua por pobladores rurales de diversas zonas del mundo, sin que ellos conozcan las propiedades químicas de estos productos, es decir, utilizan estos polímeros naturales empíricamente. Tales son los casos de: en las áreas rurales del Altiplano y Valles de Bolivia usan pepas de durazno (*Pércica Vulgaris*) y habas secas (*Vicia Faba*); en México y Perú (en la sierra de Cajamarca) utilizan las pencas de Tuna; en la India es común el uso de semillas de Nirmalí (5); y en Sudán utilizan *Moringa Oleifera* (canafistula) (6).

Investigadores del campo decidieron estudiar las propiedades

de estos productos naturales, en base a estas referencias y a la inquietud que la Organización Mundial de la Salud (OMS), demostraba ante el riesgo de salud involucrados con la utilización de polímeros sintéticos. En Brasil, los ingenieros José Campos y José Martiniano D'Azevedo Netto efectuaron el estudio del "Empleo del almidón de papa como auxiliar de floculación de aguas para abastecimiento" (1980) (4), logrando resultados muy positivos en el mejoramiento de la calidad del agua.

Posteriormente el Ing. José Campos y otros investigadores estudiaron comparativamente la eficiencia de almidones de diversas fuentes naturales, cuando son empleados como auxiliares de floculación de agua para abastecimiento (1984) (7), obteniendo también buenos resultados; en Colombia, INFOPAL ha efectuado, desde 1981, estudios comparativos sobre el empleo de almidón de papa y el comportamiento de los polímeros sintéticos, habiéndose logrado como resultado un agua tratada de mejor calidad (8); en Estados Unidos se realizó un estudio en la Planta de Abastecimiento de Miami demostrándose que el uso de un almidón modificado produjo un precipitado mejor y de más fácil manejo del que se lograba en los decantadores con la sola adición de cal y soda (5).

En el Perú el Servicio de Agua Potable de Lima (SEDAPAL), ha venido utilizando polielectrolitos sintéticos desde 1983, sin que se haya efectuado un adecuado control de calidad del producto.

4. CONCEPTOS GENERALES

4. ASPECTOS GENERALES

4.1 DEFINICIONES PREVIAS

Para poder atender los mecanismos y procesos que intervienen en el tratamiento de las aguas, es necesario tener en cuenta definiciones que hagan posible el conocimiento de los mismos.

El tratamiento de agua tiene por finalidad producir en ésta los cambios físicos, químicos y biológicos, necesarios para hacerla aceptable para consumo humano.

A continuación se exponen, en forma somera algunas de estas definiciones:

4.2 EL AGUA-CARACTERISTICAS

Es importante saber que las aguas sufren cambios en sus características, los cuales hacen variar las condiciones de las mismas. Estos cambios pueden ser originados por condiciones naturales que producen mayor, o menor concentración (lluvias, sequía, calidad de los terrenos atravesados por las aguas, etc.), o por alteraciones producidas por el hombre (descarga de desechos domésticos, e industriales en los ríos y demás cursos receptores que sean usados para aprovisionamiento de aguas para consumo humano). La proliferación de organismos, puede también contribuir a realizar grandes cambios en las características de las

aguas.

Es necesario dejar claramente establecido, que las características, o impurezas existentes en el agua, no se encuentran en forma estática, es decir, son muy variables y cambiantes con el tiempo y el espacio. Estos cambios muchas veces son muy marcados en una muestra tomada en un mismo punto del curso del agua en tiempos diferentes, y pueden ser de efecto nocivo para la salud, lo cual hace necesaria la utilización de procesos unitarios (físicos, químicos y biológicos) para el tratamiento de estas aguas y de esta manera hacerla aceptable para consumo humano.

4.2.1 Características Físicas

Turbiedad: Es la característica que hace parecer al agua como sucia o barrosa. La turbiedad es causada por partículas suspendidas y coloidales que limitan el paso de la luz a través del agua. Estas partículas pueden ser minerales y orgánicas (limo, arcilla, compuestos de zinc, hierro, manganeso; materiales como aserrín, fibras orgánicas, microorganismos, etc.).

Color: El color que presentan las aguas pueden ser de origen mineral tal como el que producen

los compuestos de hierro y manganeso, o vegetal como el producido por materia orgánica en suspensión, algas, semillas y protozoos. El color de las aguas puede deberse también a desechos industriales tales como: sustancias solubles procedentes de minas, refinerías, explosivos, industria del papel, etc.

Olor y Sabor: Los olores desagradables que se presentan en algunas aguas, son debido a una gran variedad de sustancias, siendo las principales, los organismos microscópicos vivos, o vegetación en estado de descomposición, incluyendo semillas, bacterias, hongos, actinomicetes y algas. También pueden deberse a materia orgánica en estado de descomposición, desagües domésticos y desechos industriales.

Temperatura: Aunque a simple vista el efecto de la temperatura puede pasar inadvertido, en realidad el cambio de temperatura en una fuente de agua puede tener muchos efectos y muchas veces éste es un factor crítico.

Es sabido que los organismos aeróbicos necesitan fundamentalmente de la presencia de oxígeno en

el agua y, de que también a mayor temperatura hay menor solubilidad de gases y mayor actividad biológica. Por lo tanto, el aumento de la temperatura disminuirá la cantidad de oxígeno, aumentará la actividad bacterial y puede por tanto llegar a producir condiciones sépticas, con los consiguientes problemas de malos olores y sabores.

Los cambios de temperatura en el agua se pueden deber a cambios climáticos y a desechos industriales.

Las temperaturas bajas afectan la coagulación, el movimiento Browniano y por lo tanto la floculación Pericinetica. También la sedimentación reduce su eficiencia al incrementarse su caudal. Las temperaturas altas en cambio favorecen estos procesos.

4.2.2 Características Químicas

Potencial Hidrógeno (pH): El pH es una forma de expresar la concentración de iones Hidrógeno en el agua.

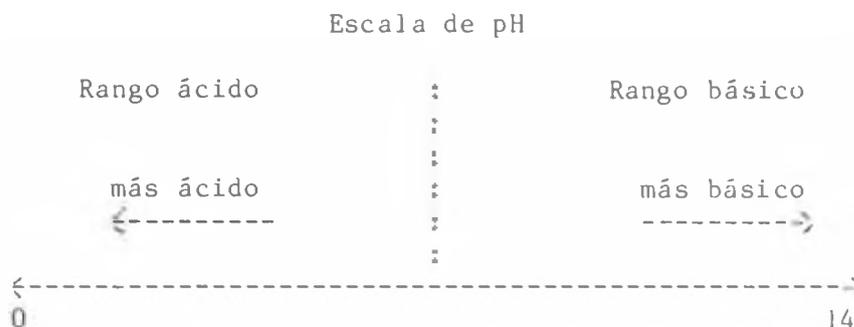
Matemáticamente, se determina de la siguiente manera:

$$\text{pH} = - \log (\text{H}^+) \quad \text{ó} \quad \text{pH} = \log (1/(\text{H}^+))$$

Además:

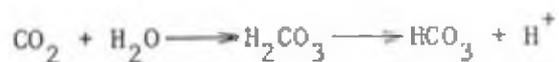
$$\text{pH} + \text{pOH} = 14$$

Normalmente se acostumbra a construir una escala de pH en la siguiente forma:



En la actualidad la determinación del pH en el agua, se realiza mediante instrumentos electrónicos, disminuyendo de esta manera los errores de manipulación y sistemáticos. También son más rápidas las mediciones y más seguras.

Acidez: Puede definirse la acidez del agua como su capacidad para neutralizar el OH. La acidez en las aguas naturales es generalmente debida a la presencia de CO_2 , el cual tiende a combinarse con el agua, dando origen al ión H^+ .



El CO_2 proviene en pequeña cantidad de la atmósfera, pero la principal fuente es el producto final de la descomposición aerobia y anaerobia de la materia orgánica. Otra fuente de acidez en el agua es la presencia de ácidos minerales proveniente de las industrias. Tanto la presencia de CO_2 , como la acidez mineral constituyen un serio problema porque le comunican al agua un alto poder corrosivo.

Alcalinidad: La alcalinidad en el agua puede definirse como la presencia de radicales OH^- y su capacidad para neutralizar la acidez. La presencia de iones OH^- en el agua se debe generalmente a la acción de sales provenientes de ácidos débiles y bases fuertes, siendo las más comunes los carbonatos y bicarbonatos. En algunas aguas la presencia de algas puede producir alcalinidad, debido a que éstas consumen CO_2 dentro de sus actividades fotosintéticas.

La alcalinidad tiene muy poca importancia sanitaria, a no ser por el sabor que presentan las aguas con alcalinidades muy altas. Estas alcalinidades altas son perjudiciales, porque producen precipitaciones de calcio en tuberías y artefactos sanitarios,

reduciendo su capacidad.

Dureza: la dureza de las aguas es debida a la presencia de cualquier catión polivalente, tales como: Ca^{++} , Mg^{++} , Al^{++} , Fe^{++} , etc., pero generalmente sólo se considera el Calcio y el Magnesio por ser los más abundantes en aguas naturales.

La presencia de éstos cationes impide la formación de espuma de jabón y causa gran desperdicio del mismo; otro problema que ocasiona la dureza, es la formación del precipitado dentro de tuberías y accesorios, reduciendo de esta manera su capacidad, por ésto es necesario controlar la dureza y adecuarla a los límites permisibles.

De acuerdo al tipo de catión que la constituye puede ser: dureza Cálcica o dureza Magnésica.

De acuerdo al radical con el cual se combina puede ser: dureza carbonatada, o temporal; o dureza no carbonatada, o permanente.

Hierro y Manganeseo: El Hierro y Manganeseo constituyen un serio problema cuando están presentes en el

agua. Estos cationes entran en solución generalmente en forma bivalente (Fe^{++} , Mn^{++}), aunque también pueden encontrarse formando complejos orgánicos.

Estos cationes crean serios problemas en el agua, como son: presencia de mal sabor, color, manchas en la ropa y artefactos sanitarios, y la proliferación de bacterias del fierro, lo cual acelera los problemas de corrosión de tuberías, pues dan origen a la producción de ácidos.

Actualmente no se ha demostrado que el hierro y al manganeso tengan un efecto nocivo para la salud, pero si para la industria.

Cloro Residual: La cloración es un proceso de desinfección que hasta el presente reúne las mayores ventajas: es eficiente, barato, fácil de aplicar y deja un efecto residual, lo cual no permite la proliferación de microorganismos y los elimina. Este efecto residual se puede medir por sistemas muy simples y al alcance de todos.

Sustancias Tóxicas: En ciertas ocasiones el agua puede contar con la presencia de ciertas sustancias

tóxicas, que pueden causar daño a la salud. Entre las sustancias tóxicas más comunes tenemos: el Plomo, Selenio, Arsénico, Cromo hexavalente, Cianuro, Cadmio y el Bario.

4.2.3 Características Bacteriológicas

Toda agua natural contiene microorganismos, los cuales provienen del suelo, del aire, de los objetos, de las personas y animales. Su mayor o menor concentración es una de las características de cada fuente de abastecimiento.

Los microorganismos en el agua pueden ser perjudiciales o benéficos según el caso. En ocasiones pueden:

- a. Producir enfermedades específicas (cólera, disentería, etc.).
- b. Ser responsable de la muerte de ganado.
- c. Destruir la vida acuática (cuando muere el plancton y se descompone, agota el oxígeno libre).

En ocasiones en cambio, la actividad bacterial sirve para producir el proceso de autopurificación

de la corriente y estabilización de la materia orgánica lo que representa un considerable beneficio sanitario. En las plantas de tratamiento de aguas residuales se aprovechan en este sentido la labor de los microorganismos.

4.3 COAGULACION DEL AGUA

4.3.1 Definición

Es el proceso de desestabilización de las partículas que se encuentran en el agua en forma de suspensión, o en estado coloidal. Este proceso tiene dos etapas:

Primera: La adición de uno, o más productos químicos (coagulantes), para hacer inestables las partículas coloidales.

Segunda: La aglomeración de estas partículas desestabilizadas al entrar en contacto unas con otras.

Si uno de estos pasos no está apropiadamente diseñado el proceso de coagulación no funcionará.

La coagulación es normalmente el proceso inicial en una planta de filtración rápida, del cual depende

fundamentalmente la eficiencia de los procesos subsiguientes.

4.3.2 Mecanismos de Acción (Desestabilización)

La desestabilización de los coloides se explica mediante dos teorías, las cuales son de interés teórico y práctico en la coagulación:

- Modelo Físico: basado en la teoría de comprensión de la doble capa eléctrica.

- Modelo Químico: basado en los puentes químicos.

a. Modelo Físico

Fue el primero que explicó los fenómenos de desestabilización y coagulación. Actualmente no es considerado el mecanismo principal, pero en ciertos casos aún es aplicable.

Las partículas coloidales no tienen carga eléctrica. Sin embargo la dispersión coloidal (fases sólida y acuosa juntas), no tienen una carga eléctrica, por lo que la carga primaria en la partícula debe ser equilibrada

en la fase acuosa. Consecuentemente, existe una doble capa eléctrica en cada interfase entre un sólido y el agua. Dicha capa está constituida por la partícula con carga y un exceso igual de iones con carga contraria (contraiones), los cuales se acumulan en el agua cerca de la superficie de la partícula (9).

Los contraiones están sujetos a dos influencia:

. A la atracción electrostática a la partícula coloidal con carga distinta, y

. A la difusión térmica de los iones en la masa de la solución.

El modelo de la doble capa difusa de Stern-Guoy es el que mejor explica la doble capa eléctrica, Fig. 4.1 (10).

En este modelo se tiene 3 potenciales de interés:

1. Potencial ψ_0 en la superficie coloidal, o potencial de Nernst.
2. Potencial ψ_ϕ (Phi) en el interior de

la superficie de la doble capa, donde comienza la capa difusa.

3. El potencial ψ_5 (Zeta) en el plano de cizalla. El plano de cizalla es el que separa del resto de la dispersión la sección de la capa que se mueve con la partícula formando parte integral de ella; y está situado en algún punto, entre la superficie interior y la superficie exterior de la doble capa.

Como no se puede separar el coloide de los contraiones que lo rodean, el potencial zeta es el único que se puede determinar con mas o menos precisión, por medio de experimentos electrocinéticos.

El potencial zeta puede ser calculado de varias maneras basándose en fenómenos electrocinéticos, de electrofóresis y potencial de corriente de las partículas coloidales.

Debido a la incertidumbre sobre los valores asignados a las constantes en las ecuaciones,

el cálculo del potencial zeta puede diferir del valor real. Es por esto que, algunos prefieren referirse a movilidades electroforéticas en lugar de potencial zeta. La movilidad electroforética es directamente proporcional al potencial zeta y se expresa en unidades experimentales.

(Micrones/seg.)/(voltios/cm.).

Cuando dos partículas coloidales se acercan una a la otra, dos fuerzas entran en acción. La carga coloidal ocasiona que las partículas se rechacen, mientras que las fuerzas de Van Der Waals acercan a las partículas entre sí.

La energía potencial de interacción de estas partículas se ilustra en la Fig. 4.2.

En las Figs. 4.3, 4.4 y 4.5 se muestra el efecto que produce el aumento de concentración iónica en la distribución de la carga.

En la Fig. 4.6 se aprecia un aumento en la concentración total de electrolitos que reduce la distancia efectiva a través de la cual

se manifiesta la carga. Este efecto se acentúa al utilizarse cationes polivalentes.

La Fig. 4.2 muestra las dos energías de atracción y repulsión.

Debido a que iones trivalentes como el aluminio y el ión férrico son los más importantes en la coagulación del agua, el modelo físico es de uso limitado para explicar el fenómeno de la coagulación.

b. Modelo químico

El modelo químico de la coagulación pretende una interacción directa entre el coagulante y el coloide. Las interacciones incluyen enlaces covalentes, intercambio iónico, puente de hidrógeno, enlaces coordinados, fuerzas de Van der Waals entre el coagulante y el coloide, y la repulsión del coagulante por la fase acuosa.

Realmente, la coagulación es una combinación de interacciones físicas y químicas,

entre las cuales se pueden distinguir como mínimo, cuatro diferentes mecanismos basados en el modelo físico y el modelo químico. Estos mecanismos son:

-El de comprensión de la capa difusa

-El de adsorción y neutralización de la carga.

-El de captura de un precipitado de hidróxido metálico, y

-El de adsorción y puente interparticular.

Mecanismo de la doble capa

Algunos iones actúan mutuamente con partículas coloidales de manera puramente electrostática y se comportan de acuerdo con la regla de Schulze Hardy que dice que la desestabilización de un coloide por un electrolito indiferente es realizada por iones con carga opuesta a la del coloide (contraiones), y que la eficacia de estos iones aumenta marcadamente con

la carga.

Este mecanismo sólo es válido para explicar la acción de iones de sodio y calcio, más no para explicar la acción del aluminio, ya que el aluminio no es un electrolito indiferente, sino que reacciona tanto con el agua como con la alcalinidad presente.

La desestabilización por polielectrolitos indiferentes, implica una reducción del potencial para que las fuerzas de Van der Waals se vuelvan efectivas y causen la desestabilización.

Adsorción y neutralización de la carga

Este efecto se encuentra estrechamente ligado al de compresión de la doble capa.

Captura de un precipitado de hidróxido metálico

Cuando se excede el producto de solubilidad

de hidróxido metálico en las soluciones de sales metálicas se produce una precipitación rápida de los hidróxidos gelatinosos que explica el fenómeno de remoción de turbiedad.

A medida que aparecen las partículas, los hidróxidos pueden atraparlas y formar precipitados.

La velocidad de precipitación de un hidróxido metálico depende del grado de sobresaturación.

Adsorción y puente interparticular

Durante los últimos años se han venido empleando en la coagulación polímeros orgánicos sintéticos, habiéndose observado muchas veces, que los polímeros con carga negativa son efectivos para coagular coloides con carga negativa, fenómeno que no puede ser explicado de acuerdo con los modelos basados en la neutralización de cargas.

Este fenómeno es explicado, al menos cualitativamente, por la teoría del "puente" (La Mer y Hedy, 1963; Smells y La Mer, 1958).

La Fig. 4.7 describe gráficamente la teoría de La Mer.

Reacción 1: Muestra que un polímero tiene ciertos grupos que interaccionan en la superficie de las partículas coloidales, dejando que el resto de la molécula se extienda hacia la solución.

Reacción 2: Si una segunda partícula, con algunos sitios de adsorción vacíos, entra en contacto con los segmentos extendidos, puede realizarse una unión.

Reacción 3: El polímero sirve de puente en el complejo partícula-polímero-partícula. En el caso de no disponer de una segunda partícula, los segmentos dispersos eventualmente pueden absorberse en otros lados de la partícula original, haciendo de esta manera imposible que el polímero sirva de puente.

Reacción 4: El modelo de puente puede explicar cualitativamente la reestabilización, como resultado de la saturación de las superficies coloidales por el polímero, sin dejar lugar para la formación de puentes interparticulares.

Reacción 5 y 6: En algunos casos los sistemas coloidales desestabilizados, pueden ser reestabilizados por medio de intensa agitación debido a que se rompen las uniones polímero-superficie y se realiza una adsorción secundaria de los fragmentos de flóculos (9).

4.3.3 Tipos de Coagulación

Son dos los tipos de coagulación, los cuales se analizarán a continuación:

- a. Coagulación por adsorción: Este tipos de coagulación se presenta cuando existe en el agua una alta concentración de partículas coloidales. Las especies hidrolíticas solubles son adsorbidas por los coloides, formándose los flóculos en forma casi instantánea, en un tiempo de $(10)^{-4}$ - 1 seg.

Cuando existe una gran cantidad de coloides en el agua, la distancia entre ellos es más pequeña, incrementando de esta manera las fuerzas de atracción y facilitando la desestabilización de las mismas.

La Fig. 4.8 presenta lo que sucede cuando se agrega una solución de sulfato de alúmina a una agua con alta concentración de partículas en estado coloidal.

- b. Coagulación por barrido: Coagulación que se presenta cuando el agua es clara, es decir, cuando existe baja concentración de partículas coloidales.

Es este caso las partículas son entrampadas al producirse una sobresaturación de precipitado de sal metálica, Ver Fig. 4.9.

En este tipo de coagulación, generalmente se emplean dosis más elevadas de coagulante, y se recomienda la adición de partículas.

4.3.4 Factores que influyen en la coagulación

- a. Naturaleza del agua cruda

Las características del agua cruda que

mas influyen en la eficiencia del proceso son:

- Concentración de coloides

Generalmente una concentración grande de partículas permite una fácil floculación en los aglomerados, haciendo favorable este proceso. Es aquí en donde las sales metálicas, polímeros catiónicos, y los polímeros aniónicos y no iónicos, son efectivas.

En el caso tener bajas turbiedades, el tratamiento se ~~hace~~ más difícil, los polímeros que se utilizan no trabajan solos, requiriendo de turbiedad adicional, lo que se logra con el agregado de arcilla.

Se presenta cuatro situaciones diferentes, dependiendo de las condiciones del agua:

- a. Alta concentración de coloides-baja alcalinidad: este es el sistema más fácil ya que solo se debe determinar un parámetro químico, la dosis

óptima del coagulante. La desestabilización se realiza por medio de la adsorción de polímeros hidróxidos metálicos con carga positiva que se produce con niveles de pH ácidos (pH 4 a 6, dependiendo del coagulante).

- b. Alta concentración de coloides-alta alcalinidad: en este caso la desestabilización se realiza nuevamente por medio de adsorción y neutralización de la carga con niveles de pH neutrales o ácidos. La neutralización de la carga es más fácil debido a que el pH permanece generalmente en la región neutral donde los polímeros de hidróxidos metálicos no tienen cargas muy altas.

- c. Baja concentración de coloides-alta alcalinidad: la coagulación se realiza en este caso con una dosis de coagulante relativamente alta para capturar las partículas coloidales. Como alternativa se puede

agregar arcilla o bentonita, para aumentar la concentración coloidal y el contacto interparticular. La desestabilización se realiza luego por medio de adsorción y neutralización de la carga.

- d. Baja concentración de coloides-
alcalinidad baja.

En estos sistemas la coagulación es más difícil. La coagulación por medio de captura es más difícil, ya que el pH disminuye al agregar el coagulante y no permite la formación de hidróxidos. Así mismo, la coagulación por medio de adsorción es difícil ya que la concentración coloidal es demasiado baja para permitir el contacto interparticular. Para realizar una coagulación efectiva deberá agregarse alcalinidad adicional y/o bentonita o preferentemente arcilla.

- Temperatura

El efecto que produce la temperatura

en el proceso de coagulación es muy importante. Este efecto es apreciable en climas muy marcados en donde se alcanzan temperaturas de congelación.

Es sabido que la viscosidad del agua se incrementa al disminuir la temperatura, causando un decrecimiento de la eficiencia, en la agitación pericinéctica hasta llegar al punto de anularla. Todo esto trae como consecuencia una baja muy marcada en la eficiencia del proceso de coagulación y por ende en la floculación.

Es por estas razones que CAHILL y FITZ PATRICK, analizaron la influencia de este factor en un grupo de plantas de Chicago, estableciendo dos regiones de variación muy marcadas, entre 0 y 10 grados Centígrados, y la segunda entre 10 y 40 grados Centígrados. En la primera zona se encontró que los mecanismos dominantes eran viscosidad y temperatura; en la segunda zona se encontró que la eficiencia era cada vez mejor al incrementar

la temperatura, porque aumentaba la tasa de colisión entre partículas.

- Caudal

Los caudales pequeños son difíciles de tratar, puesto que se requieren equipos de dosificación de capacidad muy reducida y de gran exactitud, los cuales no existen comúnmente en el mercado, por lo que se debe utilizar equipos de fabricación local (9,11).

b. Variables químicas

- Dosis óptima

La Fig. 4.10 ilustra gráficamente la influencia de este factor en la eficiencia del proceso. En esta figura, se presentan cuatro curvas de variación de la turbiedad residual, en función de la dosificación de coagulante, con pH constante. Estas curvas están basadas en aguas naturales que contienen grandes concentraciones de material coloidal, las cuales fueron

tratadas con sales de aluminio, o hierro (III).

pH óptimo

Es otro factor importante en la coagulación. En general, el pH óptimo para la coagulación de agua con color es más bajo, este valor se encuentra entre 4 y 6, y para aguas con turbiedad entre 6.5 y 8.5.

Concentración óptima

La principal dificultad para la realización de una coagulación eficiente, consiste en aplicar de un modo uniforme, el coagulante al agua. El problema reside, en que las cantidades de coagulante son muy pequeñas en comparación con el volumen de agua a ser tratado.

Alcalinidad

Al agregar el coagulante al agua, éste se descompone y los iones metálicos de aluminio (Al^{+++}), se combinan con la alcalinidad presente en el agua, sea natural,

o agregada, para formar el precipitado de hidróxido de aluminio, precipitado insoluble que constituyen los flóculos.

c. Variables físicas

Dependen de las características del mezclador rápido. Esto quiere decir que la mezcla rápida constituye el aspecto físico de la coagulación, la cual influye en la eficiencia del proceso.

Las variables físicas representan el conjunto de características externas que deben influir en el proceso de coagulación, para que de esta manera se logren condiciones óptimas de operación y así se efectúen las reacciones químicas adecuadas que aseguren una buena y uniforme distribución del coagulante en toda la masa de agua (9, 11, 12).

Es importante conocer cuales son los parámetros operacionales de la mezcla rápida:

a. Gradiente de velocidad: Representa la Intensidad de Agitación que se debe impartir

a la masa de agua para que en ella se distribuya y disperse el coagulante en forma eficiente.

En el caso de utilizar polielectrolitos ya no es necesaria una mezcla instantánea porque sus cadenas poliméricas de alto peso molecular ya se encuentran previamente formadas antes de su adición al agua, y sus velocidades de adsorción son más lentas. Por otro lado, deben evitarse tiempos prolongados de mezcla, y gradiente de velocidad muy altas, con el fin de evitar la ruptura de las cadenas poliméricas. Los Gradientes de Mezcla Recomendados en estos casos son del orden de 300-400 Seg^{-1} .

- b. Tiempo de retención: Parámetro que depende del tipo de coagulación a considerar. Este tiempo varia de décimos de segundo a un segundo, cuando la coagulación es por Adsorción, pudiendo llegar a siete segundos cuando la coagulación es por Barrido.

4.4 FLOCULACION

De una manera general, la turbidez de las aguas naturales es provocada por arcillas (Caolinita, montmorillonita, illita, muscovita), en estado coloidal (partículas con diámetros entre 10^{-3} y 10^{-6} mm.).

La interacción entre esas partículas coloidales depende de las características físico-químicas de la solución y de las superficies coloidales en consideración.

Las suspensiones coloidales liofóbicas son termodinámicamente inestables, y consecuentemente, irreversibles con relación a la floculación y dispersión.

La estabilidad de esas suspensiones es afectada por la oportunidad de colisión y las interacciones entre las partículas coloidales.

La colisión entre partículas coloidales puede ser provocada por movimiento térmico (Difusión Browniana), o sedimentación diferencial, si el fluido está en reposo, y por cizallamiento, si el sistema está sometido a agitación (13).

4.4.1 Definiciones

Para tener más claros los conocimientos de lo que

es la teoría de la floculación, es necesario definir algunos conceptos de importancia primordial en este proceso.

- Floculación

Se dice que la floculación es el proceso por el cual, las partículas coloidales tienden a trasladarse dentro del líquido, para entrar en contacto unas contra otras, y aglutinarse promoviendo el crecimiento del microfloculo, hasta alcanzar el tamaño y peso necesarios para su posterior remoción mediante la sedimentación.

- Floculación pericinetica

Si la floculación de las partículas coloidales ocurre por efecto de la difusión Browniana, el fenómeno es llamado Floculación Pericinetica. Esta se basa en las colisiones debidas al movimiento de las moléculas, e inducidas por la energía térmica.

- Floculación ortocinetica

Cuando la colisión de partículas es provocada por agitación del líquido, la operación es

llamada Floculación Ortocinética. Esta se basa en las colisiones de las partículas debidas al movimiento del agua. Este movimiento es inducido por una energía exterior a la masa de agua y que puede ser de origen mecánico o hidráulico.

Medidas de eficiencia

La eficiencia de la floculación puede ser medida en términos de reducción de la densidad de sedimentos, volumen de sedimento, tasa de sedimentación de flóculos, tasa de filtración, o refiltración, turbidez residual, etc.

Una manera interesante y práctica que se adopta cuando se estudia la cinética, se refiere a la remoción de partículas primarias en suspensión (14).

Orden de adición de coagulantes

Cuando se utilizan simultáneamente alúmina y polielectrolitos, el orden de adición de esos coagulantes, ejerce un efecto considerable sobre la eficiencia de floculación.

En otras palabras, la alúmina, cuando es adicionada antes del polielectrolito, presenta mayor eficiencia que cuando se le usa sola, operando siempre dentro de los límites de pH óptimo, esto es, entre 5.5 y 9.0 abajo de 5.5 y encima de 9.0, el polielectrolito aplicado antes, presenta mayor eficiencia, porque en esos límites, el polielectrolito también es mas eficiente cuando es aplicado sólo.

De manera general, la mayor eficiencia de floculación fue obtenida en la zona de pH neutro, cuando la alúmina fue adicionada antes del polielectrolito. Este efecto deberá ser estudiado en la práctica, a fin de determinar el orden de adición para una agua a ser floculada, y el polielectrolito escogido como coagulante.

4.4.2 Mecánica de la floculación

Sabemos que existen dos tipos de floculación para promover el crecimiento de los flóculos: la floculación pericinética y la floculación ortocinética, siendo necesaria la intervención de ambas para

poder lograr los objetivos finales.

Al dispersarse el coagulante en la masa de agua, para que las partículas coloidales de tamaño menor a 1 micra empiecen a aglutinarse, se precisa de la floculación pericinéctica. Es el movimiento Browniano el que actúa dentro de este rango de tamaño de partículas, formando el microflóculo inicial. Recién cuando éste alcanza el tamaño de 1 micra, empieza a actuar la floculación ortocinéctica, promoviendo su mayor desarrollo. Este mecanismo, ha sido estudiado en lugares donde la temperatura baja alrededor de cero grados, rango dentro del cual, el movimiento Browniano se anula y, por consiguiente, también la floculación pericinéctica (9). En este caso, se comprobó que la floculación ortocinéctica, es totalmente ineficiente, ya que no puede actuar sobre partículas tan pequeñas.

Por otro lado, el proceso de floculación pericinéctica actuando solo, es sumamente lento, precisándose alrededor de 200 días para reducir a la mitad un contenido de 10,000 virus/ml. en una muestra de agua.

Por lo tanto, ambos mecanismos son complementarios, no pudiéndose obtener una buena eficiencia en ausencia de alguno de ellos.

4.4.3 Factores que influyen en la floculación

En el proceso de floculación existen ciertos factores que influyen en la eficiencia del mismo. Estos son:

- La naturaleza del agua
- La variación del caudal
- La intensidad de agitación
- El tiempo de floculación y el número de comportamientos.

A continuación se describirá la influencia de estos factores en el proceso de floculación:

- Naturaleza del agua

La coagulación y, por consiguiente, la floculación son extremadamente sensibles a las características del agua cruda, tales como la alcalinidad, el pH y la turbiedad, etc.

Algunos iones presentes en el agua pueden influir en el equilibrio físico-químico del

sistema, en la generación de cadenas poliméricas de los hidróxidos que se forman, o en la interacción de estos polímeros con las partículas coloidales, afectando el tiempo de floculación.

La concentración y la naturaleza de las partículas que producen la turbiedad también tienen una notable influencia en el proceso de floculación. Estos aspectos son generalmente confirmados en la práctica: por lo general es más fácil flocular aguas con elevada turbiedad y que presenta una amplia distribución de tamaños de partículas. En tanto, las partículas de mayor tamaño, que podrían ser removidas en tanques de sedimentación simple, tales como arena fina acarreada durante picos de elevada turbiedad, interfieren con la floculación, inhibiendo o impidiendo el proceso. Por este motivo, cuando la turbiedad del agua cruda fuera igual, o superior a 1,000 UJ, es indispensable la utilización de presedimentadores.

- Variación de caudal

Es conocido que al variarse el caudal de opera-

ción de la planta de tratamiento se modifican, en consecuencia, los tiempos de residencia y gradientes de velocidad en los reactores.

De lo anterior podemos decir que el gradiente de velocidad y el tiempo de residencia aumentan, o disminuyen de acuerdo a como varíe el caudal.

- Intensidad de agitación (Gradiente de velocidad)

Cuanto mayor es el gradiente de velocidad, más rápida es la velocidad de aglomeración de las partículas. Mientras tanto, a medida que los flóculos aumentan de tamaño, crecen también las fuerzas de cizallamiento hidrodinámico que ejercen sobre ellos, introducidos por el gradiente de velocidad. Los flóculos crecerán hasta un tamaño máximo, encima del cual las fuerzas de cizallamiento alcanzan una intensidad que las rompen en partículas menores.

La resistencia de los flóculos depende de una serie de factores que se indican a continuación:

a. De su tamaño, forma y compactación;

- b. Del tamaño, forma y naturaleza de las micropartículas;y
- c. Del número y forma de los ligamentos que unen a las partículas.

Los valores recomendados para floculación se encuentran dentro de un rango de 100 a 10 seg^{-1} . Naturalmente que es conveniente que se haga una compartimentalización con gradientes escalonados en forma decreciente.

- Tiempo de floculación. Compartimentalización

En todos los modelos propuestos para la floculación, la velocidad de aglomeración de las partículas, es proporcional al tiempo. Bajo determinadas condiciones existe un tiempo óptimo para la floculación, normalmente entre 20 y 40 minutos. A través de ensayos de pruebas de jarras, se puede determinar este tiempo. La permanencia del agua en el flocular por un tiempo inferior, o superior al óptimo, produce resultados inferiores, disminuyendo

la eficiencia del proceso.

4.4.4 Ecuaciones para la determinación de la eficiencia de floculación

En este trabajo se juzgó interesante realizar ensayos con el objeto de conocer los efectos de agregación y quiebre de flóculos, además de obtener datos, para la determinación de las constantes de agregación (K_A) y ruptura (K_B).

Fueron Argaman y Kaufman, (15) quienes propusieron una ~~de~~ ecuación lineal simplificada que describe la remoción de partículas primarias después de la floculación, combinando los efectos de agregación y ruptura de flóculos, la que es representada por:

$$\frac{d N_1'}{dt} = -K_A G N_1 + K_B G^2 N_1^{\circ} \quad (1)$$

donde:

N_0 = Número de partículas que ingresa al reactor

N_1' = Número de partículas primarias que salen del reactor

K_A = Constante de agregación

K_B = Constante de ruptura de flóculos

G = Gradiente de velocidad

El término $-K_A G N'_1$, indica la desaparición de partículas primarias para dar origen a los flóculos, y el término $+K_B G^2 N^{\circ}_1$, indica la aparición de partículas primarias por erosión de los flóculos.

Si integramos la ecuación (1), para un reactor estático obtenemos:

$$\frac{N'_1}{N^{\circ}_1} = \frac{K_B G + (1 - K_B G)^{-K_A GT}}{K_A} \quad (2)$$

La primera derivada parcial de la ecuación (1), con respecto a G, e igualada a cero, nos dá:

$$K_B = \frac{K_A^2 T e^{-K_A GT}}{1 + K_A GT e^{-K_A GT} - e^{-K_A GT}} \quad (3)$$

Sustituyendo los valores óptimos de G y T, y el valor máximo de N°_1/N'_1 , en el sistema formado por las ecuaciones (2) y (3), se obtienen los valores de KA y KB.

A través del balance de masas en un reactor, logramos:

$$\frac{N^{\circ}_1}{N'_1} = \frac{1 + K_A GT}{1 + K_B G^2 T} \quad (4)$$

La ecuación (4), nos proporciona la eficiencia de floculación teórica, en una estación de tratamiento para una misma agua y el mismo coagulante (o ayudante de floculación), ingresando los mismos valores de T , G , además de K_A y K_B , determinados en el laboratorio.

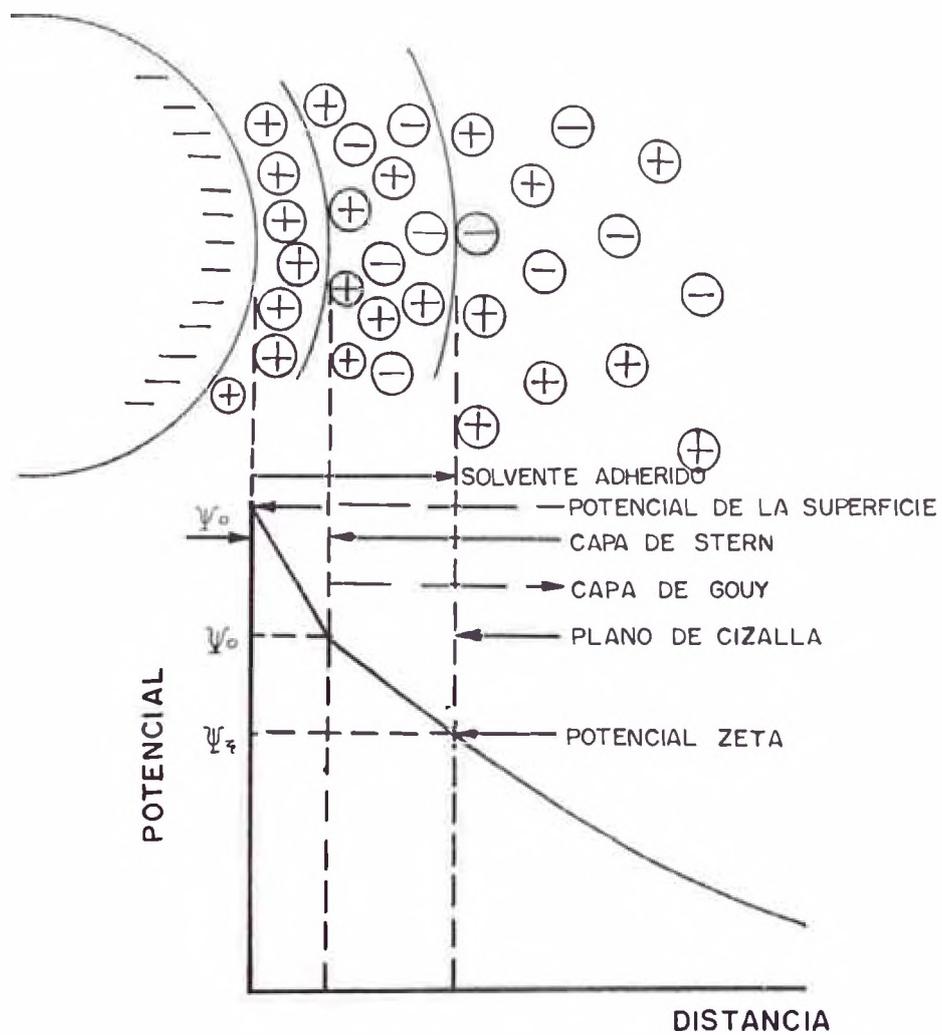
El parámetro K_C , determinado por el cociente: K_B/K_A , que representa la relación entre coeficiente de ruptura y el coeficiente de agregación de flóculos, pasa a tomar un significado importante, una vez que dá un orden de grandeza de la eficiencia de un determinado coagulante o ayudante de floculación. A medida que ese parámetro disminuye, mejores son las características del coagulante y/o ayudante de floculación probado, una vez que representa una mayor capacidad de agregación de partículas primarias, y mayor resistencia del flóculo a la abrasión.

4.4.5 Parámetros operacionales

En el proceso de floculación intervienen ciertos parámetros operaciones, los cuales son: el gradiente de velocidad (G) y el tiempo de retención (T), o alternativamente, el producto de ambos, que viene

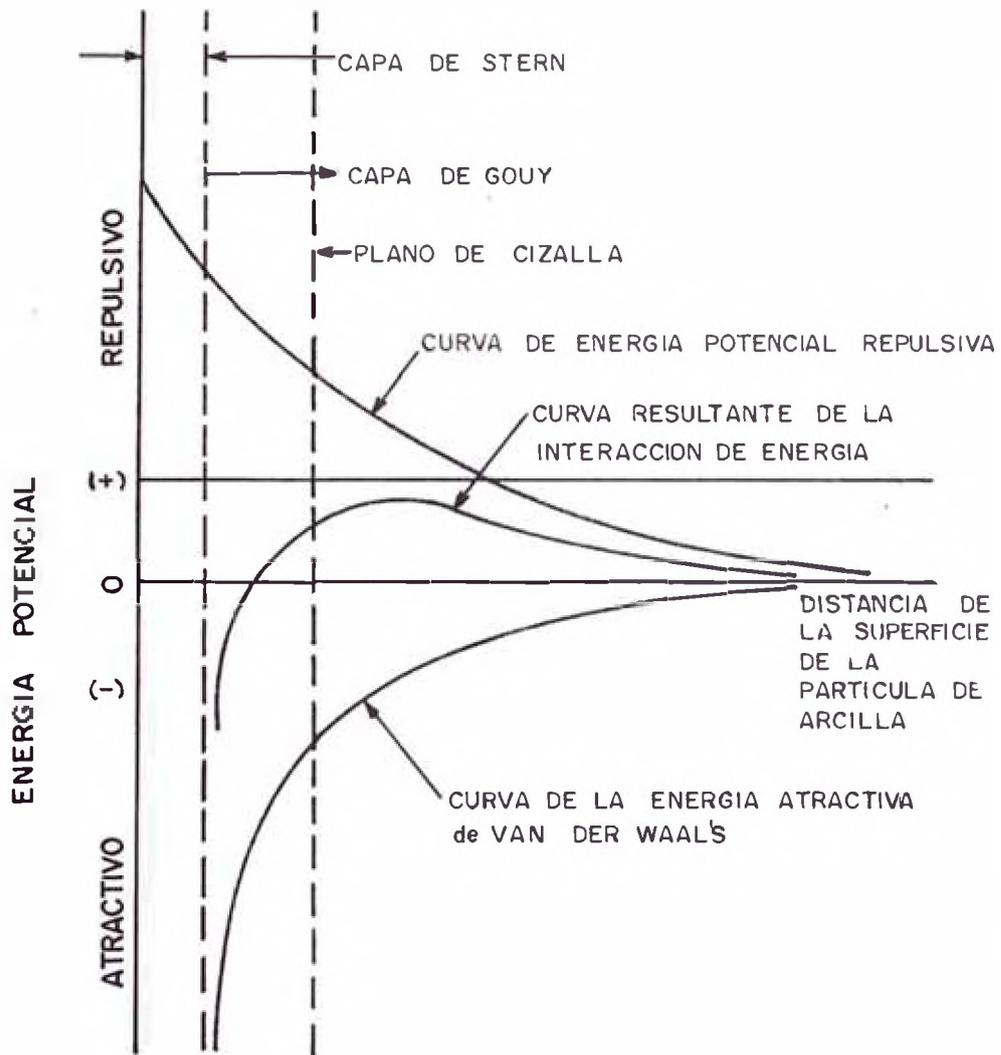
a ser Número de Campo (Nc). Los valores de estos parámetros según los estudios realizados por Villegas y Letterman son los que en forma conjunta van a producir la mayor eficiencia. A través de investigaciones realizadas, se ha determinado que el rango óptimo de gradientes de velocidad para floculación varia entre 20 y 75 seg^{-1} , y el de tiempos de retención entre 10 y 30 minutos, dependiendo de la calidad del agua a tratar.

Los valores de (GT) están normalmente comprendidos entre 20,000 y 200,000 (más comunmente entre 50,000 y 100,000).



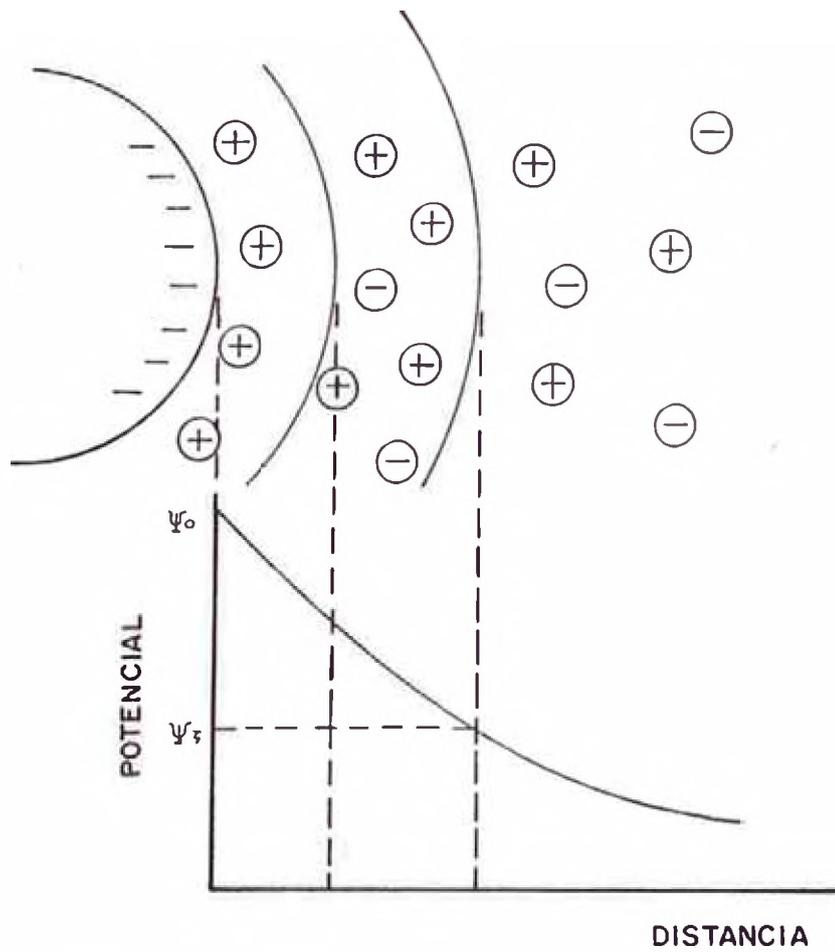
MODELO DE LA DOBLE CAPA DIFUSA DE STERN-
GOUY

Fig. 4.1



ENERGIA POTENCIAL DE INTERACCION DE LAS PARTICULAS COLOIDALES

Fig. 4.2



POTENCIAL DE UNA PARTICULA COLOIDAL,BAJA
CONCENTRACION DE IONES MONOVALENTES.

Fig. 4.3

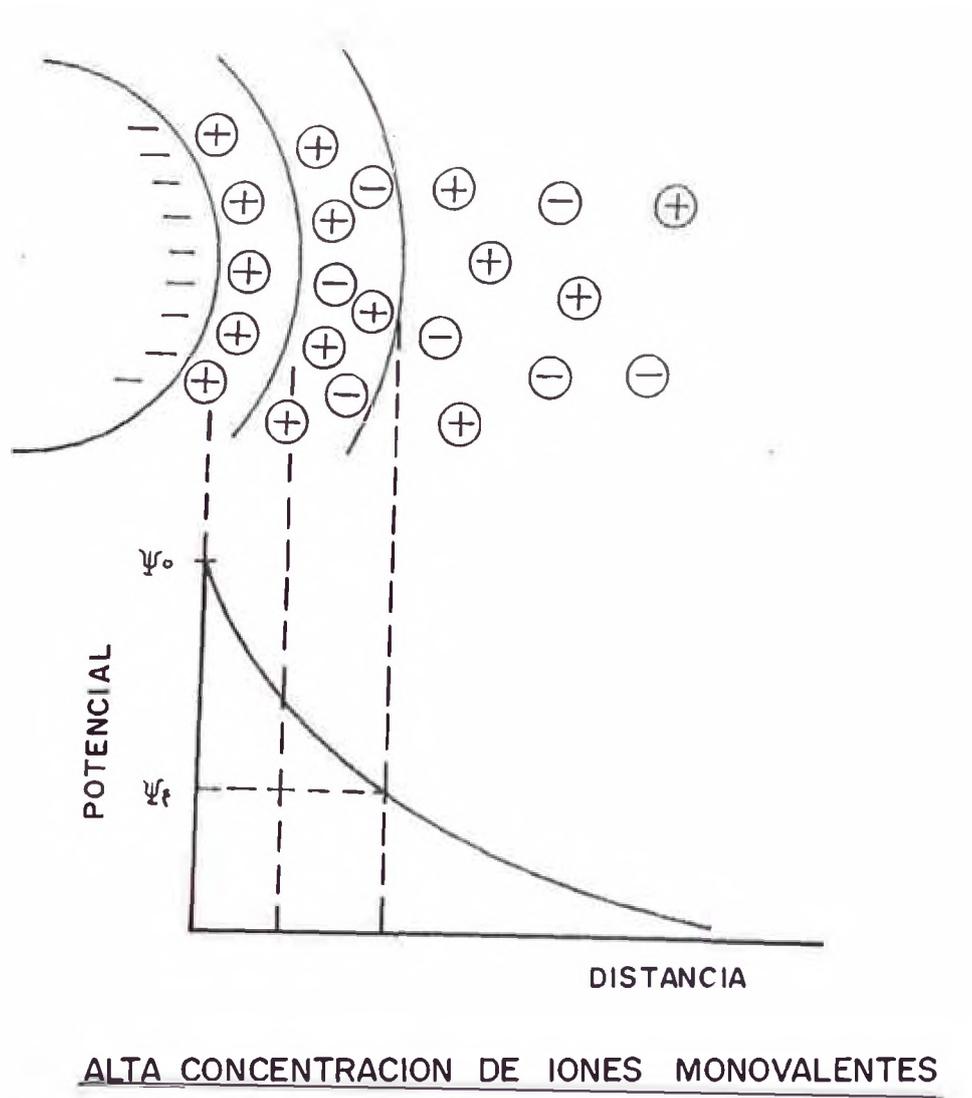
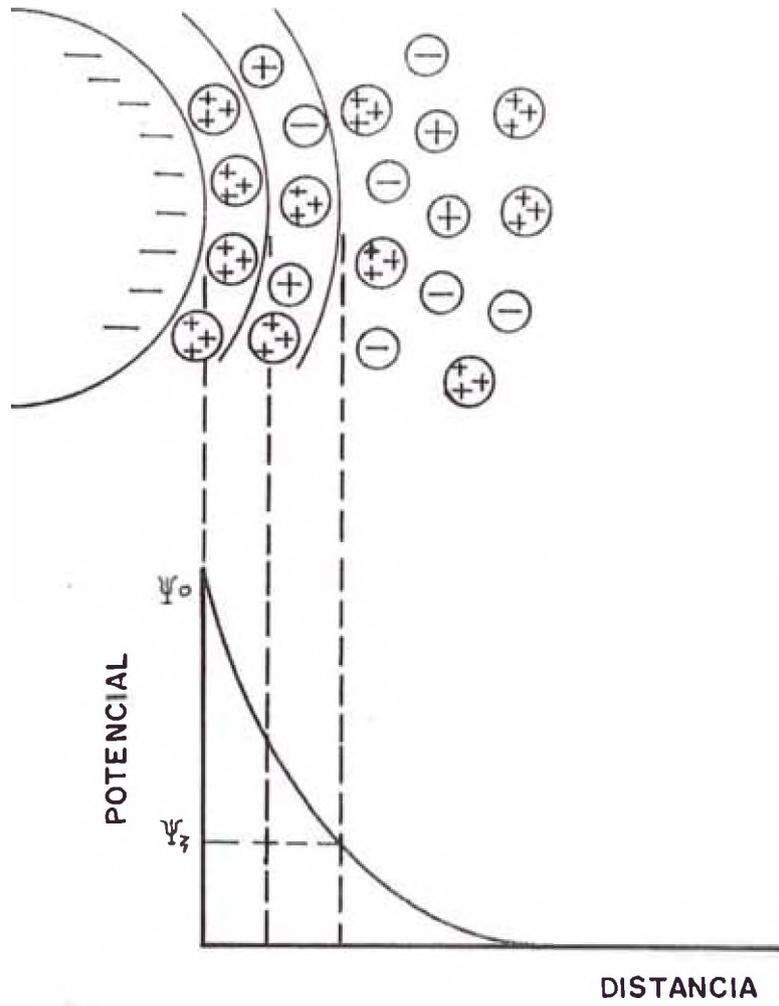
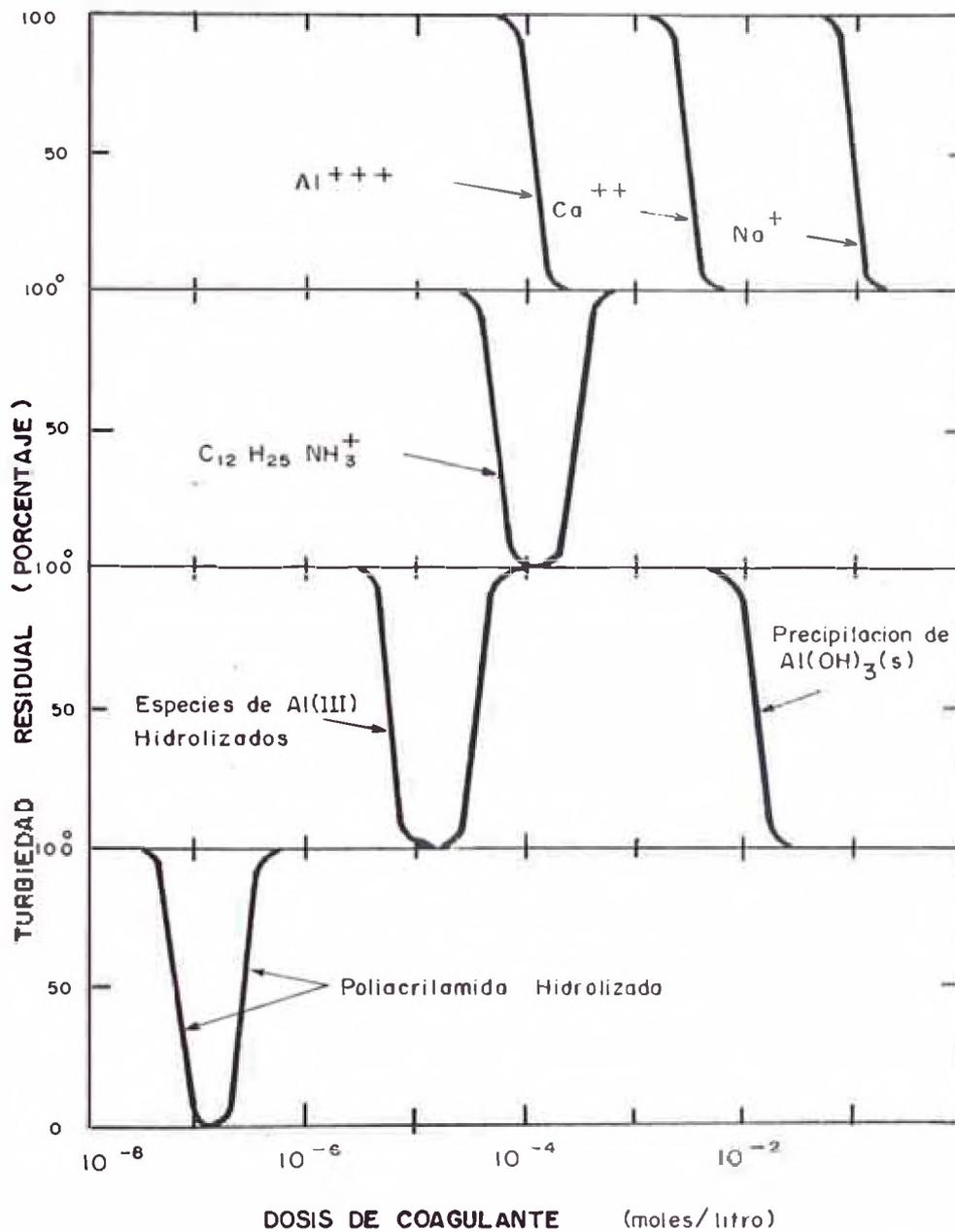


Fig. 4.4



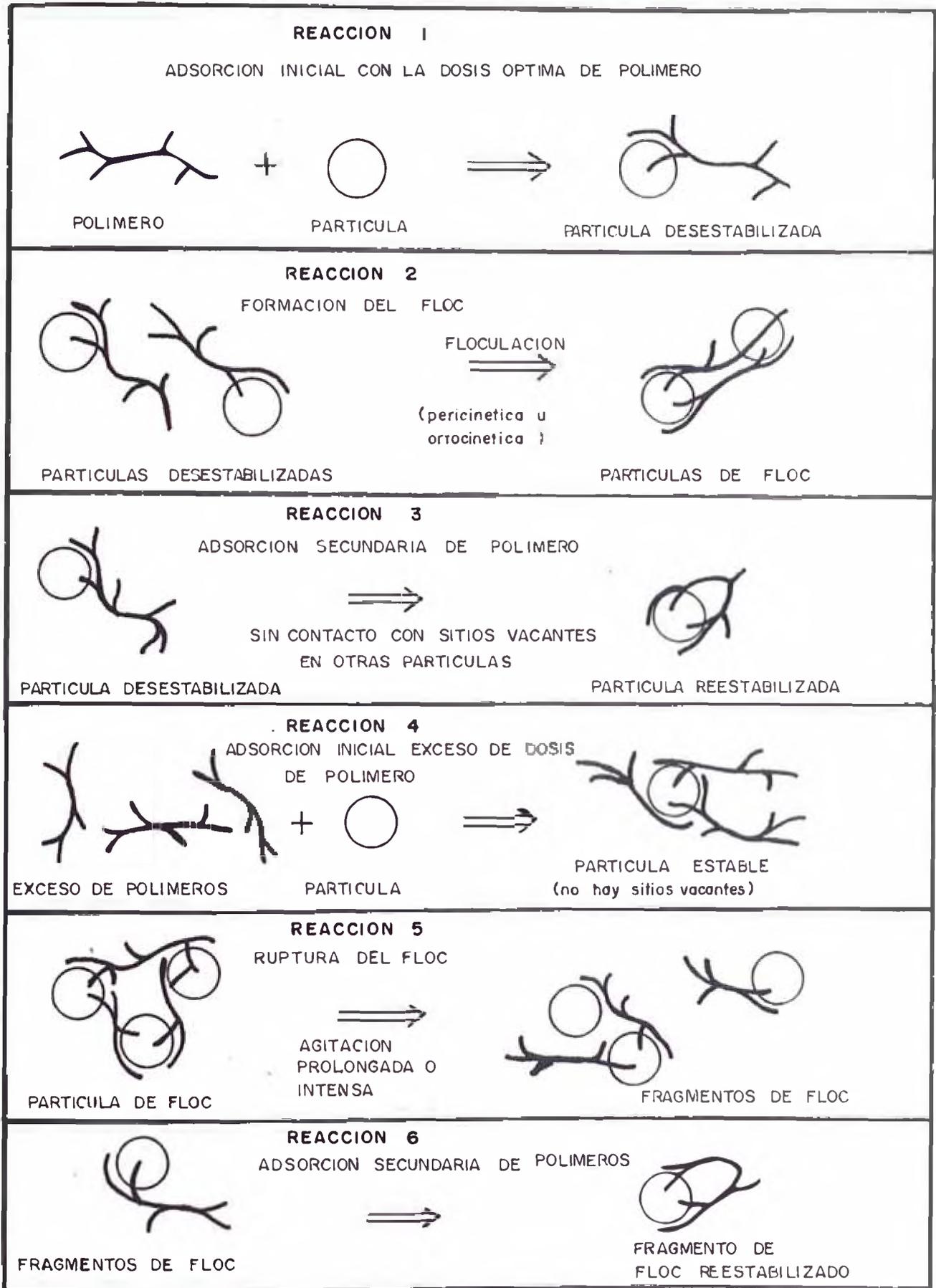
PRESENCIA DE IONES TRIVALENTES POSITIVOS

Fig. 4.5



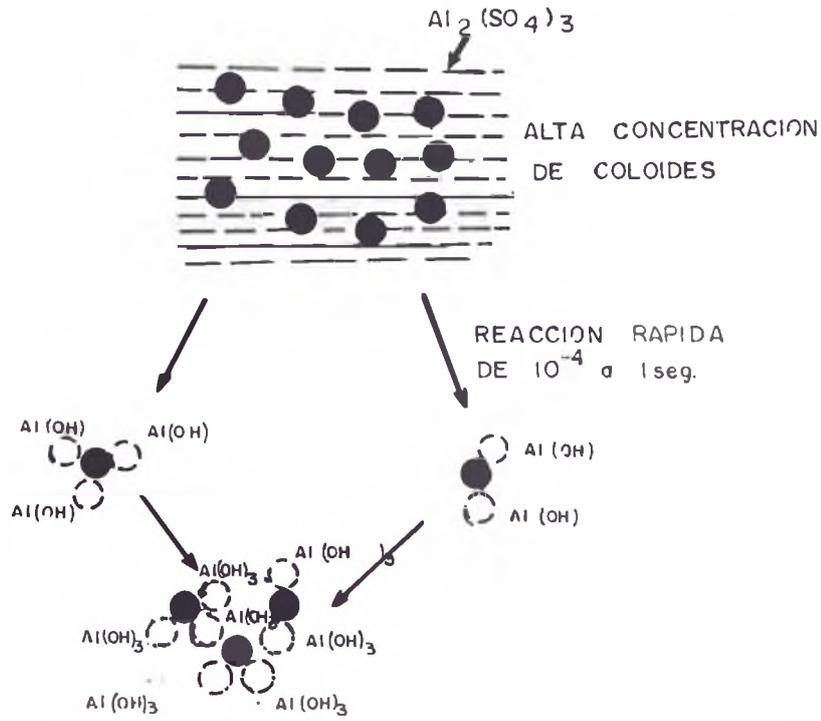
CURVAS ESQUEMATICAS DE COAGULACION PARA VARIOS COAGULANTES DISTINTOS

Fig. 4.6



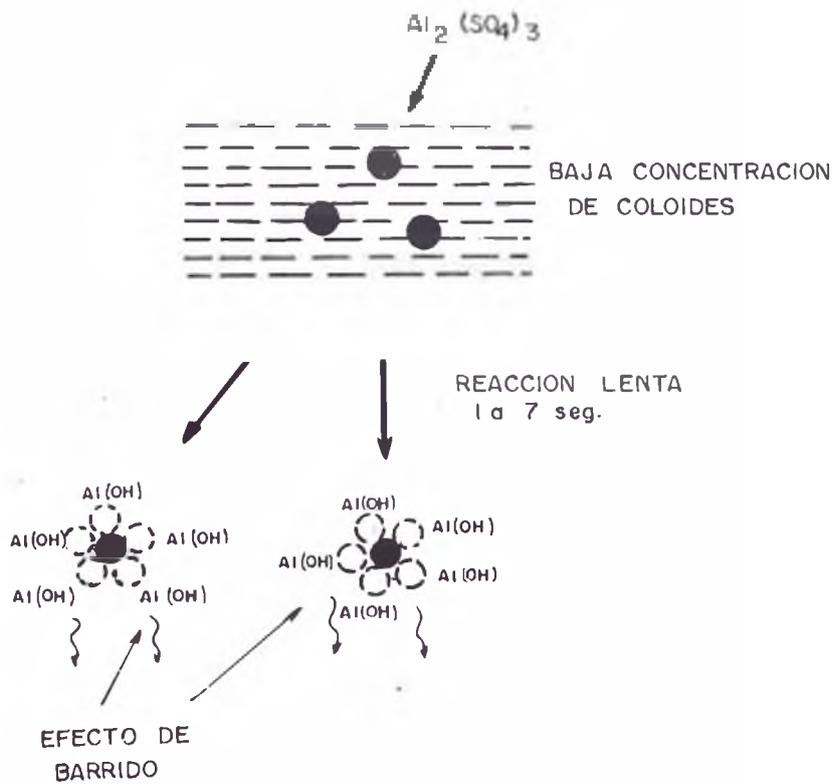
REPRESENTACION ESQUEMATICA PARA EL MODELO DE PUENTES EN LA DESESTABILIZACION DE COLOIDES POR POLIMEROS.

Fig. 4.7



COAGULACION POR ADSORCION

Fig. 4.8



COAGULACION POR BARRIDO

Fig. 4.9

5. POLIMEROS

5. POLIMEROS

5.1 El polímero es una gran molécula constituida por la repetición de pequeñas unidades químicas simples, llamadas monómeros, las cuales están constituidas por enlaces covalentes. En algunos casos la repetición es lineal, de forma semejante a como los eslabones forman una cadena. En otros casos, las cadenas son ramificadas, o interconectada, formando retículos tridimensionales.

La unidad repetitiva del polímero, es usualmente equivalente, o casi equivalente, al monómero, o material de partida del que se forma el polímero.

5.2 ESTRUCTURA DE LOS POLIMEROS

La longitud de la cadena del polímero viene especificada por el número de unidades simples que se repiten en la cadena.

El Grado de Polimerización está dado por el número de monómeros que conforman la cadena polimérica en su estructura molecular, y puede variar desde $(10)^4$ a $(10)^7$ unidades en su estructura química, y puede contener diversos tipos de unidades monoméricas en su cadena.

El peso molecular del polímero, es el producto del peso

molecular de la unidad repetitiva (monómero), por el Grado de Polimerización.

La policondensación en la formación de los polímeros, depende de la naturaleza de los grupos funcionales de las moléculas que interaccionan entre sí. Todos los monómeros capaces de formar polímeros deben tener, por lo menos, dos núcleos activos para que la nueva molécula formada conserve su configuración activa semejante a la original.

Cuando las cadenas poliméricas tienen múltiples grupos funcionales iónicos, sean libres o esterificados, se les denomina polielectrolitos (5, 16).

5.3 CLASIFICACION DE LOS POLIMEROS

5.3.1 Por su carga (5, 8, 17)

- a. Polímeros aniónicos: Aquellos que tienen carga negativa.

Los polielectrolitos aniónicos se caracterizan por su elevado peso molecular y por la coexistencia de grupos que permiten la adsorción de grupos ionizados negativamente (grupos carboxílicos o sulfúricos), cuyo papel consiste

en provocar la extensión del polímero.

Estos polímeros pueden adherirse directamente a las partículas coloidales sobre todo en aquellas que poseen en su estructura iones metálicos, o bien utilizando un mecanismo alternativo de unión entre partículas cargadas negativamente, y puentes catiónicos muy similares a los de sulfato de aluminio.

- b. Polímeros catiónicos: Aquellos que tienen carga positiva.

Son macromoléculas de peso molecular bajo (mucho menor a un millón); poseen en sus cadenas una carga eléctrica positiva, debido a la presencia de grupos funcionales, amino, imino, o de un amonio cuaternario.

- c. Polímeros no iónicos: Aquellos que no tienen carga eléctrica.

Son exclusivamente poliacrilamidas de elevado

peso molecular. Estos polímeros no iónicos, se unen a los sólidos en suspensión por medio de puentes de hidrógeno. Ver Fig. 5.1.

5.3.2 Por su origen

- a. Polímeros sintéticos: Son los compuestos orgánicos producidos mediante la transformación química del carbón y del petróleo, e incluyen a la mayoría de los polímeros de manufactura industrial que comúnmente se expenden en el comercio. Muchos se encuentran en forma de polvo seco, generalmente constituido por poliacrilamida (no iónico), o Poliacrilamida hidrolizada (aniónico).

Los polímeros catiónicos, son derivados de bases de amonio cuaternario o de imina de polietileno, que generalmente se expenden en solución acuosa, en concentraciones del 10% al 60% (Lo Sasso, 1972).

La toxicidad de los polielectrolitos sintéticos, debe investigarse y someterse a un exigente control de calidad, pues a veces, los monómeros

utilizados en la producción de polímeros sintéticos, no pueden usarse en el tratamiento de agua potable.

En el Cuadro N° 5.1 se presenta una lista de los polímeros para agua potable cuyo uso ha sido aprobado por la Agencia para la Protección del Ambiente de los Estados Unidos, EPA (Coagulant Aids for Water Treatment - EPA Report, Aug. 1975) (18).

La Organización Mundial de la Salud, también ha publicado el informe de un grupo de consultores sobre aspectos de salud relacionados al uso de polielectrolitos en el tratamiento de agua potable, en el que se destaca la necesidad de controlar la toxicidad de los monómeros usados en la preparación de polímeros (OMS, 1973).

- b. Polímeros naturales: Son aquellos que se producen debido a las reacciones bioquímicas naturales en animales y plantas, y que muchas veces no tienen una sola composición química bien definida, ya que están constituidos principalmente por varios tipos de polisacáridos

tales como el almidón, celulosa, glucósidos, etc.; y proteínas como son la caseína, olieratina, gelatina, etc.

El Cuadro N° 5.2 incluye algunos de los productos naturales más conocidos que poseen propiedades coagulantes, o floculantes. Cabe aclarar que existen otros productos procedentes de distintas regiones de América Latina y del mundo que podrían ser ~~empleados~~ para este propósito. La toxicidad de estos polímeros es, por lo general, mínima o nula, puesto que son usados como comestibles o como aditivos en diversos productos alimenticios.

5.4 MODO DE ACCION DE LOS POLIMEROS

La coagulación ha sido definida como la desestabilización eléctrica de las partículas, y la floculación, como la unión de las mismas para formar el flóculo o grumo (La Mer, 1963). Teniendo en cuenta esta definición, los polímeros pueden ser añadidos al agua de tres maneras distintas:

- a. Como coagulantes: En este caso el polímero es agregado al agua como único coagulante, en reemplazo

del coagulante metálico.

- b. Como ayudantes de coagulación: En este caso el polímero es agregado antes que el coagulante metálico.
- c. Como ayudante de floculación: En este caso el polímero es agregado después del coagulante metálico.

Aunque existe una tendencia generalizada a no hacer distinciones entre ayudantes de coagulación y ayudantes de floculación, es probable que el mecanismo de coagulación/floculación sea diferente, según se agregue el polímero antes o después del coagulante metálico.

En la Fig. N° 5.2 se ilustran las tres formas de acción de los polímeros.

En la práctica, la mayoría de los polímeros se usan como ayudantes de floculación, puesto que éstos son agregados de 30 a 60 seg. después del coagulante (generalmente una sal de aluminio o hierro), cuando las partículas ya se encuentran desestabilizadas. En esta forma, se evita que parte de las partículas producidas por los coagulantes metálicos, sean absorbidas por los sitios disponibles en las cadenas poliméricas y pierdan así su capacidad

de desestabilización de los coloides causantes de la turbiedad. Sin embargo, no existe manera para conocer de antemano si un determinado polímero puede ser mas efectivo como ayudante de coagulación, o de floculación. Esto sólo puede conocerse mediante cuidadosos ensayos de laboratorio, utilizando el agua con la cual se va a trabajar. (19, 20).

5.5 IMPORTANCIA DE LOS POLIELECTROLITOS EN EL PROCESO DE FLOCULACION

5.5.1 Teoría de floculación con polielectrolitos

El mecanismo de formación y ruptura de flóculos, cuando se utilizan polielectrolitos como coagulantes o como auxiliares de coagulación, es un fenómeno bastante complejo, ya que envuelve una gran cantidad de parámetros y variables, cuyos efectos no son aún completamente comprendidos.

Concentración en solución, grupos iónicos, peso molecular, grados de hidrólisis, presencia de electrolitos, pH, fuerza iónica, estado físico y químico de las superficies envueltas, tiempo y energía de mezcla, segregación en la mezcla rápida, son

algunos de los principales parámetros que aún no pueden ser relacionados en una teoría única, para explicar el comportamiento de los polielectrolitos, en presencia de suspensiones coloidales (13).

Reuhwein y Ward (21), fueron de los primeros en investigar el "mecanismo" de floculación con polielectrolitos. Ellos utilizaron dos polielectrolitos catiónicos y un aniónico.

Posteriormente, Michaelis Morello (22, 23), trabajaron con poliacrilamidas de sodio y poliacrilamida, con diferentes grados de hidrólisis, y concluyeron que la floculación fue obtenida a través de la adsorción, por formación de ésteres o "puentes de hidrógeno".

Sin embargo en estos experimentos y algunos otros, publicados entre 1952 y 1956, fueron utilizadas suspensiones de arcilla altamente concentradas y, ninguna referencia fue hecha con relación a las características de los reactores utilizados y las intensidades de mezcla empleados.

El efecto de la intensidad de mezcla, fue tomado

en cuenta apenas después de 1957, permitiendo la obtención de resultados reproducibles (24).

Reconociendo que la desestabilización de partículas coloidales por polielectrolitos, no puede ser caracterizada únicamente por el modelo de la doble capa, La Mer y sus colaboradores (25), desarrollaron la teoría de "puente químico", que proporciona un modelo racional para explicar la floculación de las suspensiones coloidales.

Los aspectos cualitativos de las reacciones que ocurren entre partículas coloidales y polielectrolitos fue visualizada por O'Mellia (26):

"La adsorción inicial ocurre, cuando una parte de la cadena del polielectrolito se adhiere a la superficie coloidal, en uno o más "sitios" de adsorción, quedando la porción restante de la cadena, extendida en la solución".

Cuando el sistema es sometido a gradientes de velocidades elevadas, puede ocurrir la ruptura de los flóculos estabilizados, estando los flóculos resultantes de menor tamaño, sujetos a una reestabiliza-

ción, debido a la adsorción de segmentos extendidos, en los propios fragmentos de flóculos (adsorción secundaria).

Es importante considerar, que la adsorción de las partículas coloidales, no es provocada únicamente por fuerzas electrostáticas y que un cambio iónico, el "puente de hidrógeno" y otras interacciones químicas, pueden ser significativas. En muchos casos, la atracción de Coulomb puede ser superada por adsorción química.

5.5.2 Parámetros de importancia y sus efectos en la Tasa de Flocculación

La floculación con polielectrolitos es un fenómeno extremadamente complicado, en el cual algunas de las variables más importantes actúan competitivamente entre sí.

Una de las variables más importantes es la intensidad de mezcla Impuesta al sistema, de manera que promueva una difusión efectiva, o transporte del absorbido a la superficie del adsorbente.

Ese paso inicial al fenómeno de adsorción es un

factor limitante, para que las fases siguientes (difusión en los poros y adsorción propiamente dicha), no sean efectuadas, si el paso inicial no ocurre correctamente.

1. Efecto de la concentración del polielectrolito

La eficiencia de la floculación de suspensiones coloidales, no aumenta indefinidamente en función del polielectrolito. Cuando el sistema ha pasado de disperso a floculado, la concentración del polímero aumenta, el sistema volverá a la condición dispersa.

Con la dosis óptima, prácticamente casi todo el polielectrolito adicionado será absorbido en la fase sólida, no restando prácticamente nada en solución. Si la concentración fuese mayor que la dosis óptima, y si el proceso de agitación es mantenido, puede ocurrir la ruptura de los flóculos, haciendo que el exceso de polielectrolito en solución, sea readsorbido en la superficie recientemente expuesta.

En esas condiciones, los nuevos flóculos formados, jamás tendrán las características de los flóculos originales, porque las moléculas

posteriormente absorbidas, tenían saturadas las porciones de la superficie de las partículas, que antes habían actuado como "zonas", de adsorción, para la formación de "puentes" entre los flóculos.

Ese es un proceso competitivo, que puede ser explicado en términos de fracción de superficie, recubierta por segmentos de polielectrolitos.

La mayor floculación, ocurre cuando el 50% de la superficie está cubierta por segmentos de polímeros, y el otro 50%, está libre para establecer los "puentes" interflóculos (13).

Para realizar una relación matemática, entre el área de la partícula que es recubierta, y una dosis de polielectrolitos, Simhe, Frish y Eirich (27), hicieron que cada segmento de polímero, sea igual en tamaño, a un "sitio" en la superficie, llegando a la siguiente relación:

$$\theta = \frac{Po}{\frac{1+bm/Sa}{b} + \frac{Po}{1+bm/Sa}} \quad (5)$$

donde:

- θ = fracción de "sitios" superficiales descubiertos.
- P_0 = concentración del polielectrolito adicionado.
- b = constante de Langmuir (relación entre la tasa de desadsorción).
- m = constante, depende del área específica de las partículas de caolín.
- S_a = número medio de segmentos por moléculas de polielectrolitos.

Esta ecuación muestra que la fracción de la superficie cubierta, está relacionada a la concentración del polielectrolito, así como a la concentración de la suspensión a ser floculada, expresada en términos de (m) .

La condición de $\theta < 0.50$ (o tendiendo a cero), significa que no hay polielectrolito suficiente para proporcionar buena cobertura, y la suspensión tiende a permanecer dispersa.

Por otro lado, si $\theta > 0.50$ (o tendiendo a

uno), no habrá espacio disponible para la adsorción de los segmentos extendidos. El efecto de "puente" será reducido y la eficiencia de floculación también será sustancialmente reducida.

2. Efecto del peso molecular

El peso molecular aquí considerado, es el peso molecular absoluto, estimado a través de medidas de la viscosidad intrínseca.

Un incremento en el peso molecular provoca un aumento de θ .

Para compensar, entonces, el exceso de cobertura correspondiente, que podría perjudicar la coagulación, la dosis óptima deberá ser reducida.

Link y Booth (28) demostraron que, cuando mayor es el peso molecular, mayor es la cantidad absorbida en los flóculos, permitiendo una dosis menor para la floculación óptima, y que una eficiencia elevada de floculación, no puede ser lograda utilizándose polielectrolitos de bajo peso molecular.

Entre tanto, la eficiencia de floculación no puede ser aumentada indefinidamente, aumentándose el peso molecular de los polielectrolitos utilizados como coagulantes.

La Mer y Healey (29), mostraron como la eficiencia de floculación de una dispersión de fosfato de calcio alcanzó el máximo, cuando el peso molecular de la poliacrilamida utilizada como coagulante, fue aproximadamente de 3×10^6 . Aumentando el peso molecular sobre ese valor, la eficiencia de floculación decreció acentuadamente. Este efecto es debido, probablemente, al hecho de que los segmentos extendidos en solución se encuentran tan comprimidos, que permiten la ocurrencia de estabilización estérica, causada por la adsorción de compuestos no ionizados con elevado peso molecular, reduciendo las interacciones de Van der Waals entre las partículas coloidales que entran en colisión (30).

3. Efecto del grado de hidrólisis

La "forma dinámica" de las moléculas de polie-

lectrolitos en solución, dependen del grado de ionización correspondiente (31).

En el caso de las poliacrilamidas, por ejemplo, el grado de hidrólisis representa la fracción de la cadena molecular que es ionizada, a través de la sustitución de grupos amida, por grupos carboxilatos.

Consecuentemente, el grado de hidrólisis, es prácticamente equivalente al grado de ionización (32).

Cuando se flocula una suspensión de caolín, el grado de hidrólisis necesario en la molécula de polielectrolito es equivalente a medio grupo de carboxilato por grupo amida, (es decir la proporción de 1 a 2).

Esta consideración, no es contraria, como podría parecer, a los efectos electrostáticos, porque los grupos iónicos, tienen una actuación indirecta en el "mecanismo" de floculación, a través de la alteración de las propiedades de la propia molécula del polielectrolito.

Eso, porque la capacidad de flocular de una molécula de polielectrolito, depende en parte, de cuanto es capaz la cadena de extenderse en la solución.

Ese "estiramiento", puede ser obtenido a través de la introducción de grupos iónicos, a intervalos conveniente, en la molécula del polímero.

La introducción de esos grupos, debe ser dosificada, de manera que produzca un "desdoblamiento" y "estiramiento" de la molécula en solución, pero sin permitir interferencias electrostáticas significativas, entre las partículas de arcilla y los grupos carboxilatos, ambos poseedores de cargas negativas.

4. Efecto de la fuerza iónica

La fuerza iónica, ejerce un efecto considerable sobre la eficiencia de la floculación, cuando los polielectrolitos son utilizados como coagulantes.

Ese efecto, parece ser el resultado de dos interacciones antagónicas, causada por la presencia de cargas iónica, tanto en la suspensión coloidal como en las moléculas de polielectrolito.

El primero de esos factores, que favorece a la floculación, es la reducción del potencial zeta de las partículas en suspensión, debido a un aumento de la concentración de contraiones y iones no reactivos, en la superficie de las partículas, causando como consecuencia una compresión de la doble capa.

Un fuerte aumento de la fuerza iónica, provoca una compresión de la doble capa a un tercio del valor original (13).

La variación de la fuerza iónica, provoca la reducción del potencial zeta, ésto provocaría una considerable mejora en la eficiencia de la floculación, debido al decrecimiento en la energía electrostática de repulsión, entre las partículas de arcilla.

El segundo efecto, causado por el aumento

de la fuerza iónica, es debido al aumento de la concentración de iones, alrededor de las moléculas del polielectrolito.

Conforme se ha discutido anteriormente, las moléculas de polielectrolito en solución pueden "estirar", si grupos ionizados fueran colocados a intervalos convenientes, en la cadena orgánica.

El exceso de iones en la solución, causados por el incremento de la fuerza iónica, neutralizan los grupos iónicos, provocando un "enroscamiento" de las cadenas de polímeros sobre sí misma, y la consecuente reducción de las posibilidades del efecto de "puente" y reducción de la adsorción.

Ese segundo efecto, parece ser más fuerte que el primero, porque mientras la adsorción desempeña un papel importante en la floculación con polielectrolitos, la reducción del potencial zeta a valores muy bajos (próximos al punto isoeléctrico), no es extremadamente significativa.

No hay dudas, que a concentraciones elevadas

de fuerza iónica, no solamente la adsorción es limitada, sino que también los llamados "segmentos extendidos", tendrán longitudes menores, lo que podrá llegar a ser un factor limitante para la "teoría del puente".

5. Efecto del pH

El pH puede ser considerado como un parámetro de mucha importancia en lo que concierne a la cinética de floculación. Con excepción de la fuerza iónica, que puede ser mantenida relativamente constante a diferentes valores de pH, todas las otras variables, tales como la viscosidad, potencial zeta, grado de hidrólisis, solubilidad de las especies químicas envueltas y concentración óptima de polielectrolitos, son dependientes del pH de la suspensión coloidal.

Las suspensiones de arcilla, por ejemplo, alcanzan su punto isoeléctrico con un pH de alrededor de 3.5, siendo el potencial zeta positivo cuando se tiene un $\text{pH} < 3.5$ y negativo para $\text{pH} > 3.5$ (valores aproximados).

Generalmente, las suspensiones de arcilla

se tornan más difíciles de flocular, conforme el pH aumenta (33).

Este efecto, es más significativo, conforme el polielectrolito considerado se torna aniónico. Inversamente, cuanto mayor es la característica catiónica de un polielectrolito, menor su sensibilidad a las alteraciones de pH.

6. Efecto de los grupos iónicos

Diversos autores han intentado relacionar el comportamiento de los polielectrolitos catiónicos, aniónicos y no iónicos en suspensiones coloidales, con sus grupos iónicos, además de las demás variables previamente consideradas (13).

El "mecanismo" de la floculación es obviamente dependiente de las características de los grupos iónicos.

Consecuentemente, el conocimiento de las interacciones que ocurren entre los diferentes grupos iónicos y las suspensiones coloidales

podrá auxiliar, considerablemente en la selección de los polielectrolitos más eficientes.

Los polielectrolitos catiónicos son considerados bastante efectivos en la reducción de turbidez de suspensiones diluidas, estabilizadas y negativamente cargadas, tales como las de las arcillas caolinita y montmorillonita.

Esos polímeros catiónicos, actúan primeramente como coagulantes a través de la reducción del potencial zeta y, posteriormente como floculante, a través del efecto "puente", envolviendo las partículas suspendidas con los segmentos extendidos de las moléculas de los polímeros, que fueron absorbidos.

Un polielectrolito catiónico, con elevada densidad de carga, es bastante eficaz en la comprensión de la doble capa, de las partículas en suspensión.

La máxima desestabilización de las suspensiones de caolinita, ocurre cuando la movilidad

electroforética está entre -0.7 y 0.0 u.cm/volt.seg (34).

Ese aspecto demuestra que la mejor floculación no es obtenida exactamente en el punto isoelectrico, sino a valores negativos del potencial zeta, y que la energía envuelta en el fenómeno de "adsorción-efecto puente", puede superar en el efecto electrostático de repulsión entre las partículas de arcilla. Hespanhol y Selleck (35), también abordaron esos aspectos, verificando que, para diversos tipos de polielectrolitos catiónicos y suspensiones de caolinita, las dosis óptimas eran obtenidas para movilidades electroforéticas muy próximas a -1.0 u.cm/vol.seg.. Esos autores consideraron que la proximidad de las partículas de arcilla en el punto isoelectrico no daban posibilidad a la ejecución del "efecto-puente", en cuanto que el distanciamiento, provocado por una repulsión relativamente pequeña, permita el espaciado adecuado, para la actuación de las cadenas extendidas en la solución.

También verificaron que la movilidad eletro-

forética de + 1 u.cm/volt.seg (que, evidentemente, permitiría el mismo espaciamento entre partículas que la movilidad de -1 u.cm/volt.seg), obtenida a través del incremento de dosis, sobre la óptima, hasta ser ultrapasado al punto soelétrico, no permitía una buena floculación. Eso fue explicado, considerando que el exceso de dosis utilizado, causaría una cobertura excesiva de la suspensión de caolinita ($\theta > 0.50$), lo cual podría inhibir el "mecanismo" de "puente".

La adición de un electrolito a la suspensión (Calcio, por ejemplo) provocará una compresión de la doble capa, reduciendo la cantidad de polímero catiónico necesario para la floculación óptima (36).

Esta consideración está de acuerdo con la idea generalizada de que el sulfato de aluminio debe ser aplicado antes de los polielectrolitos, cuando ambos son utilizados en la floculación de aguas turbias (37).

En este caso, el sulfato de aluminio reduciría

el potencial zeta a través de la compresión de la capa doble y formaría sus propios polímeros a través de las reacciones producidas, en cuanto que el polielectrolito ejercería el efecto de "puente" y aumentaría la resistencia de los flóculos formados.

Los polielectrolitos aniónicos, por otro lado, no pueden provocar coagulación por reducción del potencial zeta, por el hecho de poseer cargas del mismo signo, que los coloides electronegativos.

AYUDANTES DE COAGULACION SINTETICOS PARA TRATAMIENTO DE AGUA
 REPORTE EFA

Cuadro 5.1

Fabricante y distribuidor	Producto	Max. Conc. Rec. mg/l
Allied Colloids, Inc. One Robinson Lane Ridgewood, N.M.J. 07410	Fercol LT-20	1
	Fercol LT-21	1
	Fercol LT-22	1
	Fercol LT-24	5
	Fercol LT-25	5
	Fercol LT-26	1
	Fercol LT-28	1
	Fercol LT-29	1
	Fercol LT-30	1
	Allstate Chemical Co. Box 3040 Euclid, Ohio 44117	ALLSTATE No 2
ALLSTATE No 6		1
Allyn Chemical Co. 2224 Fairhill Rd. Cleveland, Ohio 44106	Claron	1.5
	Claron 207	2
American Cyanamid Co. Berdan Ave. Wayne, N.J. 07470	Superfloc 127	1
	MAGNIFLOC513C	25
	MAGNIFLOC515C	50
	MAGNIFLOC517C	40
	MAGNIFLOC521C	20
	MAGNIFLOC570C	10
	MAGNIFLOC571C	10
	MAGNIFLOC573C	10
	MAGNIFLOC575C	20
	MAGNIFLOC577C	10
	MAGNIFLOC579C	10
	MAGNIFLOC581C	10
	MAGNIFLOC843A	1
	MAGNIFLOC845A	1
	MAGNIFLOC846A	1
	MAGNIFLOC847A	1
	MAGNIFLOC848A	1
MAGNIFLOC860A	1	
MAGNIFLOC971N	1	
MAGNIFLOC972N	1	
MAGNIFLOC985N	1	
MAGNIFLOC990N	1	
Atlas Chemical Div. ICI America Inc. Wilmington, Del. 19899	SORBO	20
Berdell Industries 28-01 Thomson Ave. Long Island City, N.Y., 11101	Berdell N-489 Flocculant	1
	Berdell N-821 Flocculant	1
	Berdell N-902 Flocculant	1

Fabricante y distribuidor	Producto	Max. Conc. Rec. mg/l
Betz Labs., Inc. Somerton Rd. Trevose, Penn. 19047	Betz Polymer 110	1
	Betz Polymer 111	1
	Betz Polymer 112	1
	Betz Polymer 113	1
	Betz Polymer 114	1
	Betz Polymer 115	1
	Betz Polymer 116	1
	Betz Polymer 119	10
	Betz Polymer 120	1
	Betz Polymer 120	1
	Betz Polymer 121	1
	Betz Polymer 122	1
	Betz Polymer 123	1
	Betz Polymer 124	1
	Betz Polymer 125	1
	Betz Polymer 126	1
	Betz Polymer 129	10
	Betz Polymer 610	10
	Poly-Floc 4D	25
	Bond Chemicals, Inc. 1500 brookpark Rd. cleveland, Ohio 44109	Bond Flocc No 1-1
Brennan Chemical Co. 704 N.First St. St. Louis, Mo.63102	BRENCO 879	100
	BRENCO 880	100
The Burtonite Co. Nutley, N.J. 07110	Burtonite #78	5
Calgon Corp. Box 1346 Pittsburgh, Pa. 15222	Coagulant Aid #2	1
	Coagulant Aid #1	15
	Coagulant Aid #2	1
	Coagulant Aid #2	1
	Coagulant Aid #2	1
	Coagulant Aid #9	5
	Cat-Floc	7
	Cat-Floc	7
	Cat-Floc B	10
	Cat-Floc T	5
Polymer M-502	5	
Commercial Chemical 11 Patterson Ave. Midland Park, N.J.07432	Coagulant Aid speedifloc #1	10
	Speedifloc #2	5
Dearborn Chemical Div. W.R. Grace & Co. Merchandise Mart Plaza Chicago, Ill.60654	Aquafloc 408 (liquid)	50
	Aquafloc 409	1
	Aquafloc 411	2
	Aquafloc 422	1
Dow Chemical USA Barstow Bldg. 2020 dow Center Midland, Mich. 48640	Dowell M-143	5
	PEI-600	5
	PEI-1090	5
	Purifloc A-22	1

Fabricante y distribuidor	Producto	Max. Conc. Rec. mg/l
	Purifloc A-23 (PNB)	1
	Purifloc C-31	5
	Purifloc H-17	1
	Separan AP-30	1
	Separan AP-273 Premium	1
	Separan NP-10 Potable Water Grade	1
	Purifloc N-20	1
	AD 7B17	1
Drew Chemical Corp. 701 Jefferson Rd. Parsippany, N.J. 07054	AMERFLOC2	10
	AMERFLOC265	1
	AMERFLOC275	1
	AMERFLOC307	1
	AMERFLOC420	10
	Drewfloc 1	1:5 Alum; 0.5:10 Lime*
	Drewfloc 3	5
	Drewfloc 4	5
	Drewfloc 21	5
	Drewfloc 922	10
	Himoloc SS-100	1
	Himoloc SS-120	1
	Himoloc SS-500	1
DuBois Chemicals Div. of W.R. Grace & Co. 3630 E. Kemper Rd. Sharonville, Ohio 45241	FLOCCULITE550	2
	GOP-16A-LT	4
	Split	19
E.I. Dupont de Nemours and Co. Eastern Lab. Sibbstown, N.J. 08027	Carboxiaethyl- cellulose	1
Environmental Pollution Investigation and Control, Inc. 9221 Bond St. Overland Park, Kan. 66214	Dynafloc 631	5
	Dynafloc 632	1
	Dynafloc 633	1
	Dynafloc 634	1
	Dynafloc 661	1
	Dynafloc 662	5
	Dynafloc 664	5
	Dynafloc 691	1
	Dynafloc 692	1
	Dynafloc 693	5
Fabcon Intl. 1275 Columbus Ave. San Francisco, Calif. 94133	Zuclar 110 PW	0.5
	Fabcon	0.5

Fabricante y distribuidor	Producto	Max. Conc. Rec. mg/l	
Henry W. Fink & Co. 6900 Silverton Ave. Cincinnati, Ohio 45236	No 102	1	
	No 109 Kleer-Flo	1	
	No 116 Kleer-Flo	1	
	No 119 Kleer-Flo	1	
	No 730 Kleer-Flo	1	
Fuel Economy Engrg. Co. 3094 Rice St. St. Paul, Minn. 55113	No 735 Kleer-Flo	1	
	Feecolite # 201	1	
Gamlen sybron Corp. 321 Victory Ave. S. San Francisco Calif. 94080	Gamlose W	5	
	Gamlen Wisprofloc 20	5	
Garret-Callahan 111 Rollins Rd. Millbrae, Calif. 94031	Gamafloc NI-702	4	
	Coagulant Aid 72	50	
	Coagulant Aid 74	30	
	Coagulant Aid 76	40	
	Coagulant Aid 76	50	
	Coagulant Aid 78	50	
	Formula 70A	50	
	Formula 73	50	
General Mills Chemicals 4620 N. 77th St. Minneapolis, Minn. 55435	Formula 74E	20	
	Supercol Guar gu	10	
	Guartec F	10	
	Fuarterc SJ	10	
	W.R. Grace & Co. Research Div. 7379 Route 32 Columbus, Md. 21044	FD-107	1
		FD-115	1
		GR-962	1
		GR-963	1
		Copolymer GR-989	1
		Copolymer GR-996	1
Copolymer GR-997		1	
Homopolymer GR-999		1	
Hercules, Inc. 910 Market St. Wilmington, Del. 19899		Carboxymethyl- cellulose	1
		Hercofloc 818 (Potable Water Grade)	1
	Hercofloc 821 (Potable Water Grade)	1	
Frank Herzl Corp. 299 Madison Ave. New York, N.Y. 10017	Perfectanyl A5114/2	10	

Fabricante y distribuidor	Producto	Max. Conc. Rec. mg/l
ICI America, Inc. Wilmington, Del. 19899	ATLASEP-PWG-11	1
	ATLASEP-PWG-44	1
	ATLASEP-PWG-77	1
	ATLASEP-PWG-11	1
	ATLASEP-PWG-255	1
	ATLASEP-PWG-1010	1
Illinois Water Treatment Co. 840 Cedar St. Rockfor, Ill. 61102	Illco IFA 313	10
Kelco Co. 8225 Aero Dr. San diego, Calif. 92123	Kelgin W	2
	Kelcosol	2
Key Chemicals 4346 Tacony Philadelphia, Pa. 19124	Kev-Floc-W	25
Matalene Chemical Co. bedford, Ohio 44014	Metalene Coagula P-6	5
The Mogul Corp. Chagrin Falls, Ohio 44042	Ecco Suspension Catalyzer 146	
	MOGUL-CO-940	10
	MOGUL-CO-941	10
	MOGUL-CO-980	2
	MOGUL-CO-983	1.5
	MOGUL-CO-984	50
	MOGUL-CO-985	50
	MOGUL-CO-986	3.5
	MOGUL-CO-9003	5
	MOGUL-CO-9007	10
	MOGUL-CO-9013	1.5
	(Revised)	125
	MOGUL-CO-9016	1
	MOGUL-CO-9020P	1
	MOGUL-CO-9021P	1
Nalco Chemical Co. 6216 W. 66th Place Chicago, Ill. 60638	Nalcolyte 110A	5
	Nalcolyte 607	40
	Nalcolyte 671	1
	Nalcolyte 7870	1
	Nalcolyte 8101	10
	Nalcolyte 8113	10
	Nalcolyte 8114	10
	Nalcolyte 8170	1
	Nalcolyte 8171	1
	Nalcolyte 8172	1
	Nalcolyte 8173	1
	Nalcolyte 9174	1
	Nalcolyte 8175	1
	Nalcolyte 8180	1
Nalcolyte 8182	1	
Nalcolyte 8184	1	

Fabricante y distribuidor	Producto	Max. Conc. Rec. mg/l
	12006	10
	BX-50	25
Narvon Mining & chemical Co., Affiliate of Irl Dafflin assoc.	Sink-Floc Z3 & AZ3	10
	Sink-Floc Z4 & AZ4	10
	Sink-floc Z5	10

* One part of Drewfloc to eight parts of alum when used simply as an aid in alum coagulation and 0.5 mg/l of Drewfloc to 10 mg/l of lime when use in connection with lime softening.

POLIMEROS NATURALES QUE TIENEN PROPIEDADES COAGULANTES O FLOCULANTES

Nombre común	Parte de donde se extrae	Parte de donde se obtiene
Alginato de sodio	Algas parda marinas (Phaeophyceae)	Toda la planta
Goma de tuna	Tuna o nopal (Opuntia ficus indica)	Hojas o pencas
Almidones solubles en agua fría (pregelatinizados)	Maíz, papa, yuca o mandioca, trigo	Grano o tubérculo
Goma de semillas de Nirmai *	Nirmai (Strychnos potatorua linn)	Semillas
Pulpa de algarrobo	Algarrobo (Ceratonia sicilia)	Corteza de árbol
Gelatina común	Animales	Huesos y residuos animales
Carboximetil celulosa	Arboles	Corteza del árbol
Goma de guar	Arbusto de Guar (Cyanopsis psoraloides)	Semillas
Goma de "red sorrela" **	"Red sorrela" (Hibiscus sabdariffa)	Semilla
Silice activada	Silicato de sodio	Activación con un ácido
Floccotan ***	Quebracho (schinopsis lorentzii)	Corteza del árbol
Lentejas **	Lens esculenta Gajanus indicus Phassolus roxborghii	Semillas
Tamarindo **	Arbol de fruto tropical	Semillas
Fenogracó, alholva	Trigonella focramaracum	Semillas

* Sen, A.K. y bulusu, K.
Bulusu, KR. y sharma,
Rao, M.N. y Sastry, c.

** Bulusu, K.R. y Pathak, B.N.
1974

*** Nombre comercial

Figura 5.1

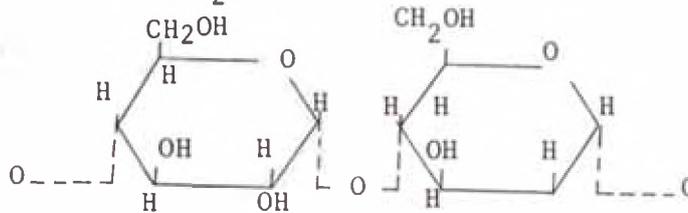
CLASIFICACION Y EJEMPLOS DE ALGUNOS POLIMEROS

1- POLIMEROS NO IONICOS

a. Oxido de Polietileno: $(-\text{CH}_2 - \text{O} -)_n$

b. Poliacrilamida: $(-\text{CH}_2 - \underset{\substack{\text{C} = \text{O} \\ | \\ \text{NH}_2}}{\text{CH}} -)_n$

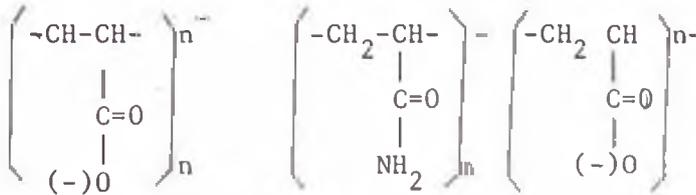
c. Almidón



2. POLIMEROS ANIONICOS

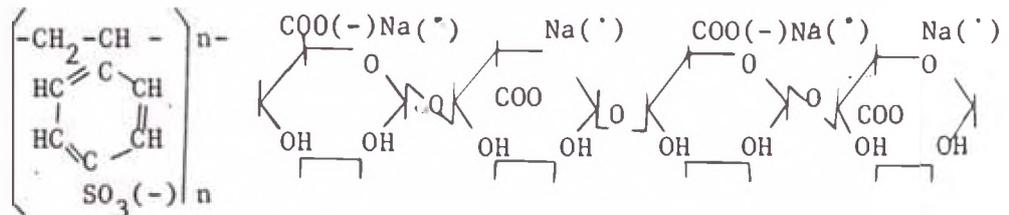
a. Acido Poliácrico

b. Poliacrilamida Hidrolizada



c. Sulfato de Poliestireno

d. Alginato de Sodio



3. POLIELECTROLITOS CATIONICOS

a. Cat flocc (Polidialildimetiamonio)

b. Imina de polietileno

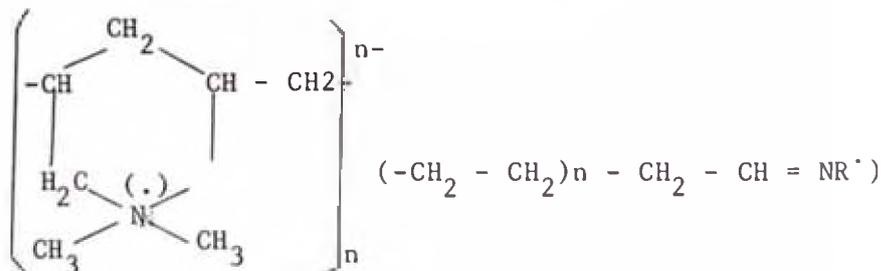


Figura 5.2

MODO DE ACCION DE LOS POLIMEROS

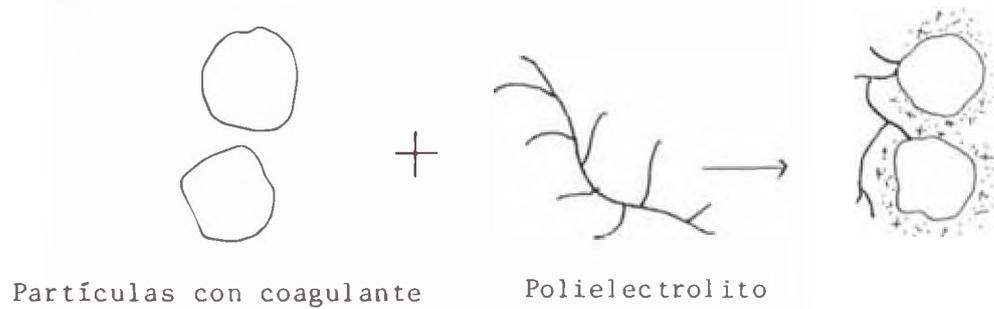
COAGULANTE



AYUDANTES DE COAGULACION



AYUDANTES DE FLOCULACION



6. ALMIDONES

6. ALMIDONES

El almidón nativo no es un polímero homogéneo, puesto que está constituido por dos tipos de compuestos: la amilosa, fracción lineal de peso molecular relativamente bajo; y la amilopectina, formada por moléculas muy ramificadas y de peso molecular elevado. A continuación se presenta las explicaciones del caso:

6.1 COMPOSICION DE LOS ALMIDONES

Se conoce desde hace mucho tiempo que el almidón está constituido por dos componentes principales que presentan propiedades sensiblemente distintas.

En primer lugar, el almidón $(C_6H_{10}O_5)_x$, se forma en los cloroplastos de las plantas verdes por influencia de la luz solar, a expensas de CO_2 y H_2O , y está formado por una mezcla molecular de polímeros de glucosa anhidra (anhidro glucosa), unidos al anillo en 1.4 y 1.6. Básicamente consta de dos fracciones: la amilopectina, que es menos soluble en agua y contiene ésteres de ácido fosfórico; y la amilasa, que es más soluble, no contiene fósforo y no produce en grupo. La Fig. 6.1 muestra las diferencias entre la amilosa y la amilopectina.

En los polímeros lineales de amilosa las unidades de anhidroglucosa están ligadas por la configuración alfa (α), a través de las posiciones 1.4.. Los polímeros complejos de amilopectina difieren de la amilosa en que,

además de uniones 1.4 tienen uniones 1.6 cada 26 o más unidades 1.4 tienen uniones 1.6 cada 26 o más unidades de glucosa (5, 8, 38).

La bibliografía indica además que La amilosa tiene un peso molecular que varía entre 10,000 (n=60) y 1'000,000 (n=6,000); (n) es un valor que depende del vegetal del que se extrajo el almidón y del tratamiento aplicado para separar la amilosa.

La amilosa es un polímero lineal de la glucosa, con el carbono 1 de una unidad, al carbono 4 de la unidad adyacente (39).

La amilopectina en cambio, presenta una estructura muy ramificada con peso molecular que oscila entre 50,000 y 10'000,000 (300 a 60,000 unidades de glucosa). Precisamente es el entrecruzamiento de enlaces, y la hidrósilis del almidón, los que permiten que la solución gelificada del mismo, pueda ser en plantas de tratamiento, como coadyudantes de origen orgánico (16, 40).

6.2 CARACTERISTICAS DE LOS ALMIDONES

El empleo de polímeros naturales, ~~inocuos~~ inocuos a la salud, ha sido tema de investigación desde tiempos atrás, de tal

manera que la utilización de productos sintéticos potencialmente peligrosos, puedan ser sustituidos, o reemplazados, por aquellos que representan un riesgo mínimo o ningún riesgo para la salud. De esta manera, es que se ha considerado al almidón, como alternativas, en el tratamiento del agua, y para tal efecto, es necesario conocer cuales son sus características.

6.2.1 El almidón se puede encontrar en abundancia en el reino vegetal y es extraído con relativa facilidad. Entre los polisacáridos formados por un sólo tipo de unidad estructural, se encuentra el almidón, cuya función biológica principal, es la de reserva alimenticia de las planta y animales.

El almidón, constituido por hidratos de carbono, se almacena en forma gránulos microscópicos de raíces, semillas y tubérculos, pudiéndose obtener de éstos últimos un rendimiento del 30%, (39).

6.2.2 Los almidones pueden obtenerse de una variedad grande de productos vegetales como la papa, el maíz, la yuca, el trigo y el camote, y su composición varia según el caso. El almidón de papa, por ejemplo, está compuesto por 83% de anilopectina y 17% de

amilosa (39).

En agua caliente, los almidones se separan en sus dos fracciones principales: la soluble (10-20%), que es la amilosa, y la insoluble (80-90%), que es la amolpectina (5,8,39).

El peso molecular de la amilosa es del orden de 10,000 a 50,000 (60 a 300 unidades de glucosa), (16, 40).

6.2.3 Debido a su alto peso molecular y cadenas lineales ramificadas, el almidón es altamente eficaz como auxiliar de coagulación, especialmente con mediana concentración de sólidos en suspensión (39).

Reduce notablemente el tiempo de sedimentación, con el consiguiente aumento de rendimiento de las instalaciones de una planta de tratamiento. Esta mayor velocidad de decantación es una consecuencia directa de la formación de coágulos de mayor tamaño y cohesión, que resulta del agregado del almidón como coadyudante.

Por su naturaleza se comporta como un polielectrolito

no iónico, no modifica el pH del agua tratada, la alcalinidad, dureza ni ningún parámetro físico.

- 6.2.4 La desventaja de usar almidones en plantas de tratamiento, es la insolubilidad de éstos en agua fría.

El almidón en polvo se puede conservar por largos períodos, sin deterioro apreciable, pero cuando se encuentra en forma de engrudo se descompone con mucha facilidad. Por tanto es necesario utilizar en estaciones de tratamiento de aguas almidones pretratados y solubles en agua fría.

- 6.2.5 En sistemas de tratamiento de agua para consumo humano y aguas residuales, los almidones van demostrando también, una gran eficiencia en las operaciones de coagulación floculación, y como acondicionadores de lodos resultantes del ablandamiento de aguas subterráneas.

Los almidones de papa son los que han demostrado tener un mejor desempeño, en lo que se refiere a la tratabilidad de aguas y lodos, de una manera general.

Esa característica es atribuida, principalmente a la presencia de fósforo, en la forma de grupo de éster de ácido fosfórico ($OP(O)(OH)_2$), en la amilopectina del almidón de papa (ver Fig. 6.2).

6.2.6 Los almidones pueden ser convertidos en una gran variedad de compuestos derivados, los cuales son utilizados comúnmente como aditivos alimenticios, siendo muy conocidos y disponibles en el mercado.

El carácter alimenticio de los almidones, hacen que éste se comporte como un polímero no tóxico, lo que lo pone en ventaja sobre sus similares sintéticos utilizados actualmente, en plantas de tratamiento.

6.3 CARACTER ELECTRICO DE LOS ALMIDONES

Generalmente los almidones son polielectrolitos no iónicos, pero en algunos casos, dependiendo de la procedencia del almidón, y bajo ciertas condiciones, se comportan como polielectrolitos aniónicos.

La carga negativa del grupo éster de los fosfatos le imparte un carácter de polielectrolito. Algunos almidones (como

el de papa), presentan un mejor desempeño de manera general, en tratamiento de aguas, lo que es atribuido a la presencia de fósforo, en la siguiente forma $(OP(O)(OH)_2)$.

La Mer y Smille sugieren que las interligaciones específicas entre esos radicales fosfatos insolubles, son responsables por el poder floculante del almidón de papa. Esos grupos éster de ácido fosfórico no están uniformemente distribuidos, existiendo en promedio uno de ellos a cada 200 unidades de anhidroglucosa.

Cuando está completamente ionizado, el radical éster presenta dos cargas negativas. Para un almidón de papa, con peso molecular medio de 200,000, se encuentran 6 radicales fosfato, lo que equivale a 12 cargas negativas por molécula.

Para que la carga iónica no sea elevada, la repulsión de cargas iguales, en solución, provoca el extendimiento de las moléculas, aumentando, si las demás condiciones fueran satisfechas, la probabilidad de ocurrencia del "efecto puente".

Los almidones que no poseen grupos ésteres de ácido fosfórico, pueden comportarse como polielectrolitos aniónicos, solamente a valores de pH elevados (mayores de 11), debido

a la ionización de los grupos hidroxilos que son frecuentemente ácidos.

Es de esperar por tanto, que esos almidones (como por ejemplo los procedentes del maíz), no presenten floculación significativa cuando son utilizados como coagulantes o ayudantes de floculación en aguas naturales, cuyos valores de pH están muy por debajo de 11.

6.4 SELECCION DEL METODO DE APLICACION Y ALMACENAMIENTO DE ALMIDONES EN PLANTAS DE TRATAMIENTO

La desventaja más resaltante que presentan los almidones, es su insolubilidad en agua fría.

Existe una gran variedad de métodos que nos permiten obtener almidones "solubles", como por ejemplo por calentamiento en solución con agua, por fraccionamiento en seco por acción del calor, por hidrólisis ácida o básica, etc.

El método seleccionado para su aplicación en plantas de tratamiento de aguas, será aquel que se ajuste a los requerimientos técnicos más adecuados, y sobre todo, aquel que se acomode a las exigencias de bajos costos, tanto de inversión, como de operación y mantenimiento.

Si bien es cierto, el almidón se adquiere en forma de polvo; su manipuleo no implica riesgo alguno y las cantidades a manejar son pequeñas, en comparación a los productos químicos utilizados.

El almacenamiento de una "solución" de almidón trae como consecuencia, la precipitación de una parte de almidón. Este fenómeno se conoce como "retrogradación". La retrogradación se asocia casi exclusivamente con la fracción lineal del almidón, ya que por ser lineal, tiene mayores probabilidades de asociarse con moléculas vecinas mediante puentes de hidrógeno.

En consecuencia, por razones prácticas, es necesario utilizar en las plantas de tratamiento, almidones pretratados y solubles "en agua fría" o "solubilizarlo" in situ por acción de un compuesto químico.

El almacenamiento del almidón en polvo, utilizado en plantas de tratamiento para su solubilización en ella, debe hacerse en lugares secos, preferentemente, aislado del suelo y fuera del posible contacto con insectos y roedores.

Las "soluciones" a preparar para usar en plantas, deben

ser de concentraciones adecuadas y relativamente altas (hasta 2%). Para facilitar la dosificación de este producto, se aconseja que la concentración sea menor del 1% para lo cual se requiere de una dilución preliminar a concentraciones de alrededor del 0.2%, 0.5%, con lo que se obtendrían mejores resultados.

6.5 PRODUCCION Y PROCEDENCIA DE ALMIDONES

Como ya se mencionó el almidón puede ser extraído con relativa facilidad de diversos vegetales como: maíz, camote, papa, yuca, etc., siendo los más abundantes y comunes en nuestro medio, la papa y el maíz.

Actualmente no existe una estadística exacta sobre la producción de almidones, debido a que estos son elaborados actualmente en las zonas rurales. Con respecto a la producción comercial, son pocas las industrias productoras de almidón.

En el cuadro N° . 6.1 se presenta los últimos datos sobre producción de papa y maíz en el Perú, (mostrada en la figura N° 6.3), que hasta la fecha ha procesado la Oficina Sectorial de Estadísticas (OSE), del Ministerio de Agricultura (41).

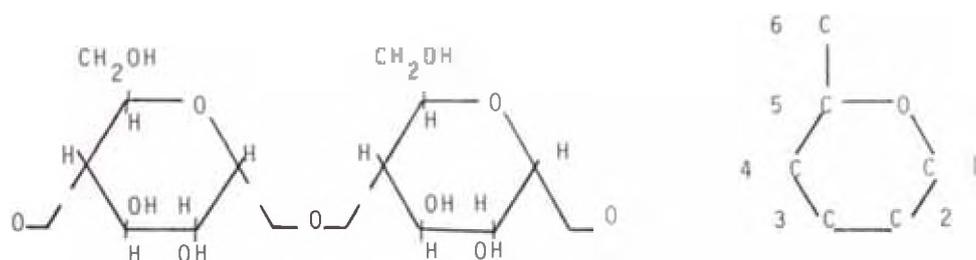
Asegurando la producción de papa y maíz se puede producir almidón.

Cuadro 6.1 ESTADISTICA DE PRUDUCCION DE PAPA Y MAIZ
Años 1980 - 1984

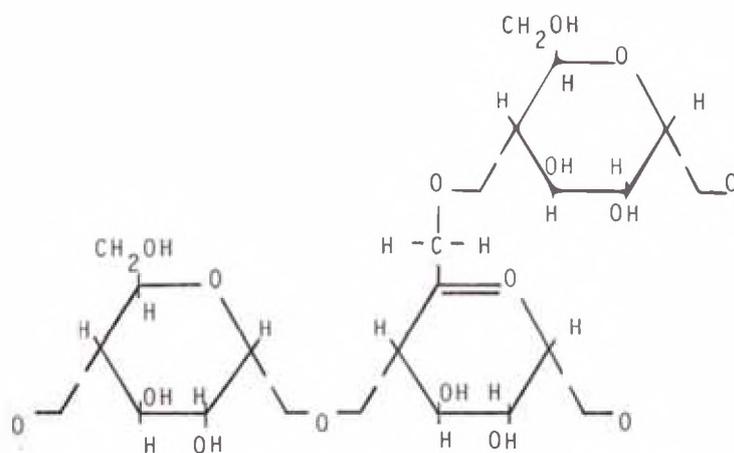
PRODUCTO AGRICOLA PROGRAMADO	MILES DE TONELADAS METRICAS				
	1980	1981	1982	1983	1984
Consumo Humano					
Maiz amiláceo	989	1.135	1.146	992	1.031
Papa	7.106	8.454	8.292	7.683	6.500
Consumo Industrial:					
Maiz amarillo duro	2.476	2.735	2.754	2.477	2.671

Figura 6.1

DIFERENCIAS ENTRE AMILASA Y AMILOPECTINA

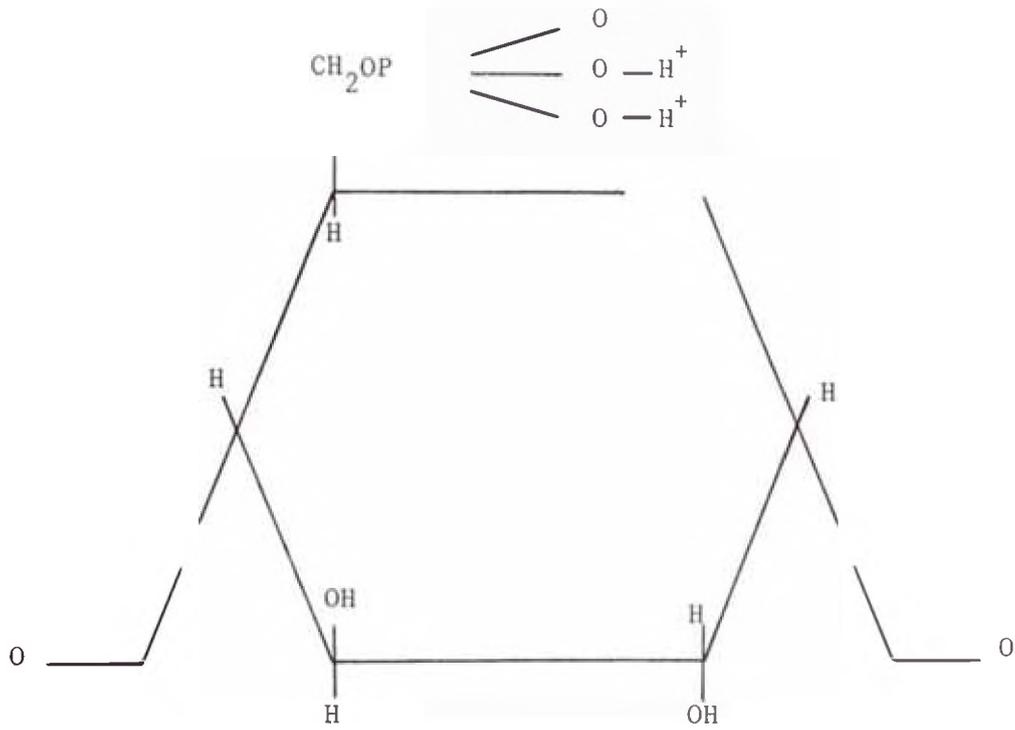


AMILASA



AMILOPECTINA

Figura 6.2



AMILOPECTINA DE ALMIDON DE PAPA

PRESENTANDO EL GRUPO ESTER DE ACIDO FOSFORICO

ESTADISTICA DE PRODUCCION DE PAPA Y MAIZ

AÑOS: 1980 - 1984

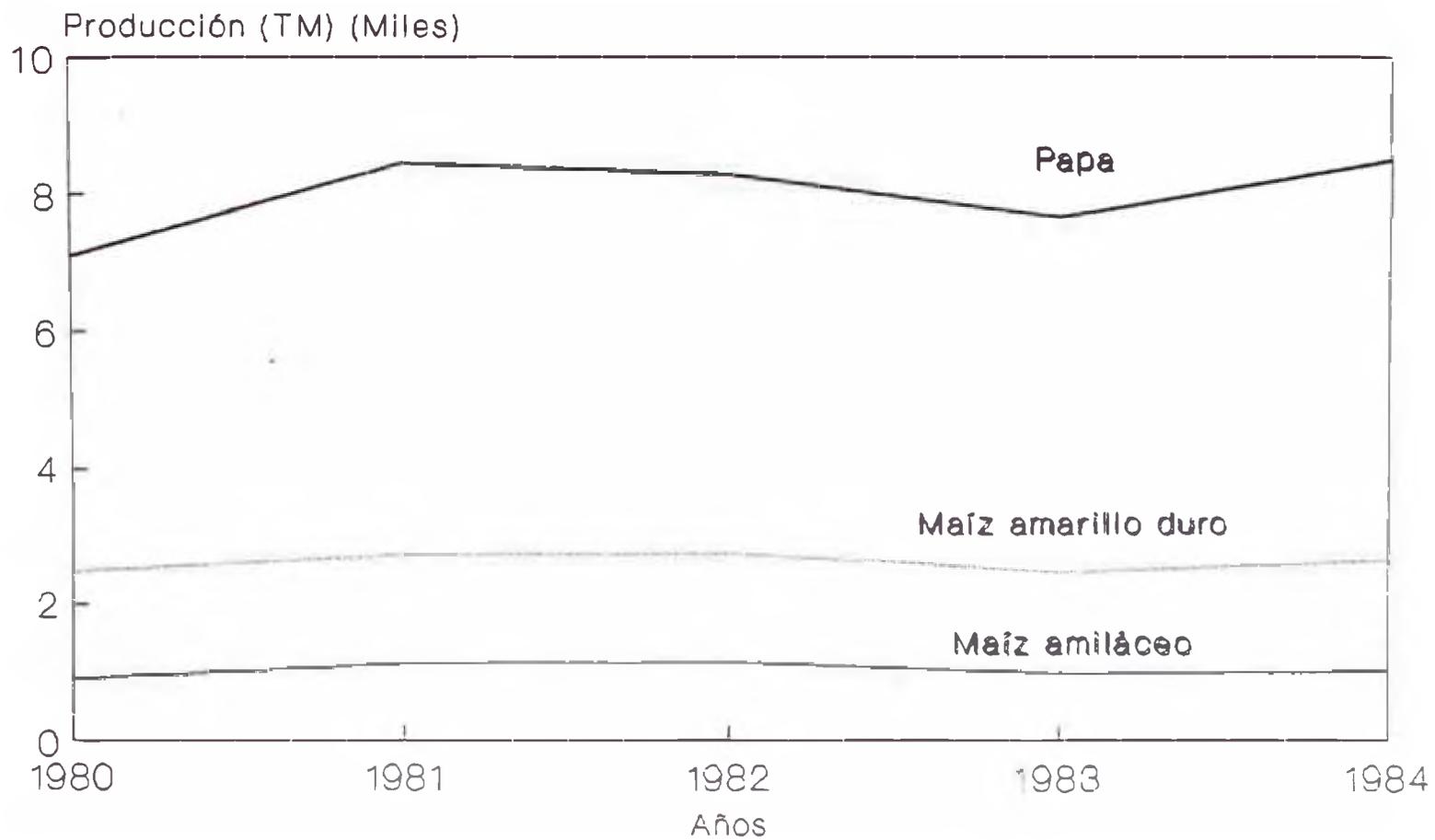


Figura 6.3

7. DESCRIPCION DEL EQUIPO Y DE LA METODOLOGIA DE TRABAJO

7. DESCRIPCION DEL EQUIPO Y DE LA METODOLOGIA DE TRABAJO

7.1 DESCRIPCION DEL EQUIPO (42)

La coagulación es un proceso utilizado en plantas de tratamiento de agua de filtración rápida, como parte inicial de una serie de procesos que incluyen coagulación, floculación, decantación 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 empleados es el equipo de "Prueba de Jarras" como el elemento de control del proceso de coagulación. Esta prueba es la representación en laboratorio de los procesos que intervienen en una planta de tratamiento de agua.

7.1.1 Descripción del Equipo de Prueba de Jarras

Aunque no es indispensable, estas pruebas en la mayoría de los casos son conducidas en equipos comerciales y uno de los más conocidos es el equipo de prueba de jarras de velocidad variable fabricado por Phips y Bird.

Normalmente estos equipos constan de:

- Un agitador mecánico provisto con tres a seis paletas, capaz de operar a velocidades de 0 a 100 revoluciones por minuto .
- Un iluminador de flóculos localizado en la

base del agitador de laboratorio.

- Vasos de precipitados, de 1,500 a 2,000 ml., en forma baja, de cristal refractario (como se aprecia en la Fig. 7.1).

7.1.2 a. Sistema de dosificación

Las unidades de agitación múltiple usadas en las pruebas de coagulación, 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 existe en el tiempo de adición de los reactivos químicos de las soluciones a los diferentes vasos, pueden afectar significativamente los resultados, particularmente cuando se usan ayudantes de coagulación. También pueden alterar los resultados de 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 una pipeta graduada, tiene sus dificultades,

puesto que la velocidad de adición del reactivo químico es muy lenta y pueden presentarse diferencias considerables en el tiempo de adición y en la rapidez requerida para avanzar con la dosificación.

Una manera simple 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 o mantenido en la mano, 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 enjuagues deben ser adicionados a los vasos de coagulación.

Esta práctica es particularmente útil cuando se van a adicionar más de un reactivo químico (por ejemplo coagulante y ayudante de coagulación), de esta manera se podrá controlar las adiciones con precisión.

La técnica usada en el laboratorio del Centro

Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), consiste en colocar en seis vasos pequeños por medio de una pipeta o bureta, las dosis de coagulantes que se va a agregar. El contenido de cada vaso se succiona con una jeringa hipodérmica provista de su aguja. Se retira dicha aguja de la jeringa y esta última, con su dosis completa, se coloca 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 agujas hipodérmicas. Cuando se quieren inyectar los coagulantes, todos los émbolos de las jeringas bajan manualmente, lo más rápido posible (máximo de un lapso de 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 para que la dispersión sea más rápida.

En general se recomienda aplicar las dosis

de coagulante en un punto fijo localizado en, o cerca del eje impulsor, durante una mezcla rápida a alta velocidad.

b. Sistema de agitación

La variable que más importancia tiene 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 del agua, se utilizan paletas o rotores, accionados en forma mecánica o magnética. En la Fig. 7.2 se esquematizan los sistemas de agitación mecánica y magnética. En la Fig. 7.3, se indican las paletas, asimismo, en el Cuadro N° 7.1 se detallan las características de las paletas.

Al utilizar únicamente paletas, es necesario elevar la velocidad a valores superiores a los que normalmente operan los equipos, produciendo por inercia, al detener el motor luego del ensayo de floculación, un movimiento helicoidal, del cual emanan resultados erróneos en el ensayo posterior de sedimentación, por

lo que se recurre al uso de estatores o defletores fijos de tipo continuo o discontinuo, tales como los indicados en la Fig. 7.3.

c. Descripción de las jarras:

Las jarras o vasos a usarse, deben tener de 1,500 a 2,000 ml. de capacidad; en caso de no tenerse vasos de ese tamaño, podría optarse por vasos de 1,000 ml.. Se debe evitar usar vasos más pequeños debido a la dificultad en la adición de pequeños volúmenes de coagulantes y ayudantes de coagulación y al resago de extraer los lodos cuando se toman varias muestras del agua sedimentada. Podrían usarse botellas cuadradas, pero antes deben determinarse las modificaciones producidas por el cambio de sección para el cálculo de gradientes.

En lo posible debe evitarse el lavado de las jarras con detergentes, ya que muchos de éstos tienen compuestos aniónicos que son fuertemente adsorbidos por las paredes de las jarras de vidrio. Si estos no son completamente removidos, pueden afectar los resultados de las pruebas en forma significativa. En la Fig. 7.4 se

detallan las características de los vasos.

d. Sistema de toma de muestra

Después de la mezcla rápida y floculación, se tiende a sedimentar en condiciones adecuadas. Los deflectores ayudan a minimizar la rotación persistente del agua dentro del vaso durante el período de sedimentación. Luego se succiona el sobrenadante, con una pipeta volumétrica de 50 ml., a la misma profundidad en todos los vasos o por medio de un sifón de 3mm. de tubo de vidrio, como se muestra en la Fig. 7.5. Este sifón debe ser torcido en dirección horizontal en el punto de muestreo para que ésta sea representativa en una profundidad determinada. El sifón debe ser construido como para dar iguales velocidades de flujo en cada vaso y así disminuir la posibilidad de arrastre de sedimentos. El flujo puede ser regulado mediante una pinza de presión. El sifón está sostenido por un flotador de tecnoport, el cual va a ayudar a mantener constante la altura de la toma de la muestra y el nivel del agua, como se aprecia en la Fig. 7.5.

e. Iluminación

Para observar el flóculo formado en los vasos, es conveniente una buena iluminación.

Idealmente, los vasos deben estar provistos con una base blanca y una iluminación en ángulo recto a la dirección del observador. Se deben evitar fuentes de luz que generen mucho calor y que tengan un efecto significativo en la coagulación y sedimentación, ocasionando diferencias de temperaturas entre el agua del modelo y la realidad, lo cual redundaría en la obtención de resultados erróneos, Ver Fig. 7.6.

f. Equipo auxiliar

Además de la unidad de agitación, es necesario un cronómetro para controlar el tiempo que demoran las diferentes operaciones que comprenden la prueba de coagulación. También se requieren medidores de turbiedad, pH y color.

7.1.3 Precauciones - limitaciones

Con la prueba de jarras se trata de simular las

condiciones en las cuales se producen los procesos de floculación y sedimentación en una planta de tratamiento de agua.

Sin embargo, dado el pequeño volumen (1 a 2 lt.), que los vasos de precipitado contienen, en comparación con el gran volumen de los tanques de floculación reales, la prueba de jarras constituye una reproducción parcial del proceso que se efectúa en el prototipo.

Las razones para esto son de orden físico y químico y corresponden a las siguientes, entre otras:

- a. En los reactores existe un flujo continuo, en cambio en las jarras no hay flujo. Esto hace que en los primeros la masa de agua sufra un tratamiento desigual, debido a que parte de ella queda retenida durante largo tiempo, mientras que otra parte pasa casi de inmediato. En cambio, en la prueba de jarras el agua queda retenida durante todo el tiempo que dura el ensayo.
- b. La escala de las jarras no guarda relación

con la escala del flóculo, por cuanto éste se produce a escala natural y, en cambio, las jarras son cientos de veces más pequeñas que los floculadores. Por tanto, la proporción entre la escala de la turbulencia que se produce en uno u otro caso, y el tamaño del flóculo es diferente, lo cual afecta la velocidad de aglutamiento de las partículas.

- c. La dosificación de los coagulantes y la agitación de la masa de agua, pueden ser mucho mejor controlados en la prueba de jarras, que en la planta de tratamiento.

No obstante estas deficiencias, la prueba de jarras sigue siendo el método más usual del que hasta ahora disponemos, para controlar los factores químicos involucrados en los procesos de coagulación y floculación.

Hay que tener en cuenta, sin embargo, que el hecho que la prueba de jarras sea un ensayo rutinario en la operación de las plantas, no significa que pueda ejecutarse descuidadamente, lo que por desgracia suele ser bastante común.

7.1.4 Consideraciones generales para la ejecución de ensayos en la prueba de jarras

En los ensayos experimentales se imponen ciertos controles que sirven para evaluar los efectos que se producen al variar el valor del parámetro que está siendo medido. Cuando los ensayos se efectúan con el equipo de prueba de jarras se debe tomar en cuenta, según sean requeridos los siguientes aspectos:

1. Equipo usado para la prueba
2. Análisis de laboratorio requeridos.
3. Dosis de coagulante.
4. Concentración del coagulante.
5. Sistema de adición del coagulante.
6. Dosificación del ayudante de floculación.
7. Sistema de adición del ayudante de floculación.
8. Tiempo de duración y gradiente de velocidad de mezcla rápida.
9. Tiempo de duración y gradiente de velocidad de la mezcla lenta.

10. Sistema de toma de muestra.

Entre las observaciones generales que se deben tener en cuenta al ejecutar el ensayo de jarras, tenemos:

- a. El tiempo y secuencia de dosificación: Cuando son usados ayudantes de coagulación, es inefectivo adicionar el coagulante a cada vaso (muestra), a diferentes tiempos según turno, debido a que el intervalo de tiempo entre la adición del coagulante y el ayudante, es siempre crítico.
- b. En todos los casos, después de dosificados y mezclados los coagulantes con el agua, se deben tener en cuenta las siguientes observaciones:
 - Soluciones químicas empleadas.- Las soluciones de coagulantes, ayudantes de coagulación y otros productos químicos a usarse en las pruebas de coagulación, deben ser preparadas en concentraciones tales, que puedan ser medidas de manera conveniente.

- Tamaño del flóculo producido.- Se observa el tamaño del flóculo producido y se le evalúa cualitativamente según sus características. Puede expresarse su tamaño en mm., de acuerdo con el comparador desarrollado por el Water Research Institute de Inglaterra, o según el índice de Willcomb, que se incluyen en el Cuadro N° 7.2 y la Fig. 7.7. Se escoge como dosis óptima la de la jarra que produce el flóculo más grande, aunque no siempre los flóculos más grandes, producen la mayor velocidad de asentamiento ni dejan ver el agua más cristalina entre los flóculos.

- Tiempo inicial de formación del flóculo.- Determinar, en segundos, el tiempo que tarda en aparecer el primer inicio de formación de flóculo, es uno de los métodos para cuantificar la velocidad de la reacción. La iluminación de la base del agitador ayuda en esta determinación, que ni aún así suele ser fácil, pues el flóculo cuando recién se forma, suele

ser incoloro. Por otra parte, el flóculo que se forma más rápido, no necesariamente es el mejor.

En esta evaluación debe tenerse en cuenta la diferencia de tiempo con que se agregaron los coagulantes a los vasos de precipitado. Si no se dispone de un sistema de aplicación simultánea, que vierta la solución en las seis jarras al mismo tiempo, el coagulante tiene que agregarse con intervalos de 1 a 30 segundos en cada vaso y debe marcarse en los mismos, con lápiz de cera, el tiempo de aplicación en la forma siguiente: $t=0$ s (para el vaso N° 1), $t=10$ s (para el vaso N° 2), $t=20$ s (para el vaso N° 3), etc.. El tiempo de aparición del primer flóculo, será igual al tiempo inicial de aplicación del coagulante a la primera jarra, hasta que se notó el primer indicio de flóculo, menos el tiempo que tardó en hacerse la aplicación a la jarra considerada.

y turbiedad y/o color residuales.- La determinación de estos parámetros se hace 10 a 20 minutos después de suspendida la agitación. Se extraen las paletas del agitador, se deja sedimentar el agua durante este tiempo y se succiona la muestra por medio de un sifón como el que se muestra en la Fig. 7.5.

A la muestra extraída se le determina:

- a. el pH,
- b. la alcalinidad total,
- c. la turbiedad y/o color, y
- d. el contenido de coagulante residual, si fuera necesario.

No siempre, sin embargo, se obtiene la más baja concentración de coagulante residual con la dosis que produce la más baja turbiedad, en especial cuando se usan pequeñas cantidades de coagulante. Debe tenerse presente además que el aluminio es soluble en proporción de un 0.2 a 0.4 mg/lt., según sea el pH del agua.

Forma de registrar los datos: los datos anteriores pueden tomarse para el agua sedimentada y para el agua sedimentada y filtrada, en papel de filtro Whatman N° 40, o similar. Los resultados se anotan en una hoja como la que se adjunta.

En dicha hoja deben colocarse inicialmente todos los datos referentes al agua cruda que tengan relación con el problema que propone estudiar, tales como: nombre de la fuente, fecha del ensayo, temperatura del agua, dureza total, pH, color, turbiedad, alcalinidad total y hierro, si éste es significativo.

En la casilla correspondiente deberán anotarse también:

- a. Tiempo de mezcla rápida o de dispersión, para el coagulante y el ayudante de coagulación.
- b. Velocidad de rotación de las paletas

PRUEBA DE JARRAS

AGUA CRUDA			DOSIFICACION mg/lt			OBSERVACIONES VISUALES		AGUA SEDIMENTADA					AGUA FILTRADA			
JARRA No.	Color:.....U.C.	Dureza total:.....mg/lt	MEZCLA RAPIDA			VOLUMEN DE JARRAS		FLOCULACION		SEDIMENTACION			Marca papel:			
	Turbiedad:.....U.J.		Tiempo:..... min	Velocidad:..... rpm ml.	Tiempo de floc:..... min	Tiempo de sed.:..... min	Velocidad:..... rpm			Número:					
	pH	Alcalinidad total mg/lt	Coagulante Nombre:	Alcalinizante Nombre:	Ayudante Nombre:	Tiempo de formación del floc	Indice de Willcomb	pH	Color U.C.	Turbiedad residual U.J.	Alcalinidad residual mg/lt	Coagulante residual mg/lt	pH	Color U.C.	Turbiedad residual mg/lt	Alcalinidad residual mg/lt
1																
2																
3																
4																
5																
6																

OTRAS OBSERVACIONES:

Orden de aplicación de los productos químicos:

Temperatura del agua: °C

INDICE DE WILLCOMB

- 0 - Floc coloidal. Ningún signo de aglutinación.
- 2 - Visible. Floc muy pequeño, casi imperceptible para un observador no entrenado.
- 4 - Disperso. Floc bien formado pero uniformemente distribuido. (Sedimenta muy lentamente o no sedimenta).
- 6 - Claro. Floc de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud.
- 8 - Bueno. Floc que se deposita fácil pero no completamente.
- 10 - Excelente. Floc que se deposita todo, dejando el agua cristalina.

durante el proceso anterior.

c. Tiempo de mezcla lenta.

d. Velocidad de rotación de las paletas durante el proceso anterior.

e. Tiempo de sedimentación.

f. Nombre de los productos químicos empleados por orden de adición.

Si se toman residuales después de la filtración, debe además consignarse la marca y el nombre del papel de filtro que se usó.

7.1.5 Equipo adicional utilizado en los ensayos de floculación

Además del equipo de prueba de jarras, fueron utilizados equipos adicionales para la elaboración de productos químicos y almidón de papa, así como para la medición de algunos parámetros.

Para el caso de la preparación de una solución

de sulfato de aluminio, se utilizó una Balanza Analítica Electrónica, Marca "Fisher Scientific" (Modelo XA-200), la misma que fue empleada para el pesado del almidón nativo.

Durante la elaboración y activación del almidón de papa, se mantuvo éste en agitación continua mediante el agitador magnético, Marca "Magnetic 9 x 9" (Modelo 4815), con sus respectivas cápsulas de agitación.

Durante los ensayos de solubilización del almidón, se efectuaron mediciones de viscosidad, las que fueron realizadas en un viscosímetro Marca "Haaker-Viscotester", (Modelo VT-02), de nacionalidad alemana. Estos ensayos fueron ejecutados en el Laboratorio de Fisico-Química de la Facultad de Ingeniería de Petróleo, de la Universidad Nacional de Ingeniería, en Lima-Perú.

El pH fue medido a través de un Potenciómetro marca "CORNING", (Modelo 7; de la Scientific Instrument), equipado con un electrodo combinado de Calomel saturado.

Este instrumento era calibrado constantemente con

zación de los ensayos de laboratorio, en las pruebas de solubilización y de "Jart Test", fueron los siguientes:

7.2.1 ALMIDONES

Fueron utilizados una variedad de almidones, generalmente de aquellos que se encuentran comunmente en el mercado. Todos fueron adquiridos en seco para su posterior "solubilización".

El almidón de papa usado, fue conseguido en forma comercial, razón por la cual su composición, de amilosa y amilopectina, no se conoce con exactitud. Este almidón es un producto orgánico en polvo. Disuelto sólo con agua, produce una mezcla lechosa que precipita en corto tiempo.

Además del almidón nativo de maíz, fueron probados almidones de maíz Catiónico y Pregelatinizado. En el caso del almidón de maíz catiónico, este se presenta en forma de polvo de origen orgánico y es muy pesado; combinado con el agua, forma una lechada blanca cuando está en agitación, precipitando rápidamente cuando se deja de agitar.

El almidón de maíz pregelatinizado, presenta un

aspecto granuloso, de muy bajo peso, que al mezclarse con el agua parte precipita y el resto queda flotando en la superficie.

La mayor cantidad de los almidones fueron proporcionados por la Fábrica "DERIVADOS DEL MAIZ S.A. (DEMSA)".

7.2.2 HIDROXIDO DE SODIO

Conocido comunmente como "soda cáustica", cuya fórmula química es el Na OH .

El producto utilizado, tiene por finalidad el provocar la solubilización del almidón, combinado con cantidades proporcionales de agua y almidón.

Presenta un aspecto de "Pellets", es decir, en grajeas cuando está seco; al contacto con el medio ambiente fluídifica. Es de color blanco lechoso y al disolverse en agua origina una solución incolora, con producción de energía calorífica: Reacción exotérmica.

Debe mantenerse en fracos de plástico, muy cerrados, su almacenamiento en frascos de vidrio no es recomendado, porque le causa deterioro.

La composición de este producto es la siguiente:

- Impurezas	Máx.
Pb	0.0005 %
Fe	0.0005 %
Al	0.001 %
Cl°	0.0005 %
N	0.0003 %
SO ₄ ⁼	0.0005 %
Fosfatos	0.0005 %
SiO ₂	0.005 %
- Ca ₂ CO ₃	1.0000 %
- Na OH	99.0000 % (alta pureza)

El hidróxido de sodio utilizado es producido por la Fábrica Alemana "RIEDEL-DE HAENSELZE-HANNOVER.

7.2.3 SULFATO DE ALUMINIO

Fue utilizado Sulfato de Aluminio Tipo "B" comercial (granulado), cuya descripción, características y composición son las siguientes:

7.2.3.1 Descripción

Sulfato de aluminio granulado, manufacturado

de Bauxita y Acido Sulfúrico producido por proceso de contacto, debidamente clasificado por proceso granulométrico.

7.2.3.2 Características

a) Sólido granulado, color crema, disuelto con agua produce una solución de aspecto lechoso, que se aclara por decantación.

b) <u>Ana. Químico</u>	<u>Expresado</u>	<u>UN</u>	<u>Normal</u>	<u>Máx.</u>	<u>Min.</u>
Aluminio	Al_2O_3	%	16.2	16.5	16.0
Basicidad	SO_3	%	-0.5	-1.0	0.0
Pierro	Fe_2O_3	%	0.2	0.5	-.-
Insolubles	-.-	%	2.5	5.0	-.-

c) Granulometría

Pasa la malla N° 15---- 100 %

7.2.3.3 Manejo y almacenamiento

- a. Bolsa de papel de 4 pliegos
Peso neto = 50 Kg/bolsa.
- b. Almacenar en lugar seco a cubierta de lluvia.
- c. Las rumas deben hacerse en parihuelas,

con altura máxima de 10 bolsas.

Las características arriba mencionadas cumplen, en forma general, con la norma para sulfato de aluminio B-403-70 de la AWWA Standard, en la cual es establecido un límite mínimo de Al_2O_3 de 17% (± 0.5 %), para el sulfato granulado o en terrones y un máximo de 0.75% de fierro, expresado como Fe_2O_3 .

Para los materiales insolubles, la norma especifica un límite máximo de 10%, para sulfato de aluminio no purificado y fija también, un límite mínimo de 0.05% de aluminio libre (o alúmina básica, basicidad), expresado en términos de sulfato de aluminio seco, SO_3 .

El sulfato de aluminio es producido por "Rayón Industrial S.A."

7.2.4 AGUA DESIONIZADA

Para la preparación de las muestras de agua artificial, se utilizó agua desionizada, proporcionada por la Compañía de Tratamiento de Aguas "AQUECTA

S.R.L.", agua que era pasada por una batería de cuatro columnas de desionización, con sus respectivas resinas de intercambio iónico (2 catiónicas y 2 aniónicas).

Las características del agua desionizada utilizada en el presente trabajo, fueron las siguientes:

pH = 5.2 upH

Alcalinidad = 5-6 ppm como CaCO_3

Conductividad específica < 5.0 moh^5 .

Dureza total \approx 0.00 ppm como CaCO_3

Sales = 0.0%

7.3 METODOLOGIA DE TRABAJO

La metodología a seguir comprende las siguientes etapas:

7.3.1 Selección de almidones a estudiar

Esta selección se hizo basándose en la facilidad de obtención de estos productos naturales en el comercio, determinándose los siguientes tipos:

- a. Almidón de papa (nativo)
- b. Almidón de maíz (nativo)
- c. Almidón de maíz (catiónico y pregelatinizado).

7.3.2 Solubilización de almidones

La mayor desventaja del uso de almidones en plantas de tratamiento de aguas para consumo humano, es su insolubilidad en agua fría. Si se le mezcla con ésta se obtiene una lechada de almidón que sedimenta en corto tiempo. Por otra parte, si bien el almidón en polvo puede conservarse por largos períodos sin deterioro apreciable, el engrudo se descompone rápidamente. En consecuencia, por razones prácticas es necesario utilizar en las plantas de tratamiento almidones pretratados y solubles en agua fría, o en todo caso, solubilizarlo mediante la acción de un compuesto químico.

Para solubilizar el almidón se ensayarán diversos métodos, de los cuales se seleccionará aquel o aquellos, que nos proporcionen los mejores resultados.

A continuación se presentan los Métodos a ensayarse:

1. Hidrólisis ácida al ambiente

Se resume en las siguientes etapas:

- Se pesa cada almidón en cantidad adecuada.
- Se coloca el almidón en un vaso.

- Se adiciona el ácido, hasta que cubra al almidón.
- Se deja secar al ambiente durante 24 horas..

2. Hidrólisis térmica

- Pesar cada almidón en cantidad adecuada.
- Diluir el almidón en agua destilada.
- Lo anterior se calienta hasta que empiece a hervir (aproximadamente a 100 grados centígrados).

3. Hidrólisis ácida térmica

- Pesar cada almidón en cantidad adecuada.
- Colocar el almidón en un vaso.
- Adicionar el ácido hasta que cubra todo el almidón.
- Secar a baja temperatura (aproximadamente 40 grados centígrados).

4. Hidrólisis alcalina térmica

- Se pesa el almidón en cantidad adecuada.

- Colocar el almidón en un vaso.
- Adicionar el alcali, hasta que cubra al almidón.
- Secar a baja temperatura (40 grados centígrados).

5. Almidón calcinado en seco

- Se pesa cada almidón en cantidad adecuada.
- Se coloca el almidón en un vaso.
- Se deja calcinar en la mufla, a 210 grados centígrados, hasta que tome una coloración parda.
- Se diluye el almidón calcinado, mediante agitación mecánica.

6. Método Químico (en frío)

La gelatinización por este método, en laboratorio, es efectuada según la metodología siguiente:

- Se coloca en un vaso, la cantidad de agua necesaria para que el almidón a ser adicionado se mantenga en suspensión y se inicia la agitación mecánica o magnética.

- Se adiciona el almidón cuidadosamente, de modo que no se aglomere.
- Cuando todo el almidón está en suspensión, se adiciona la cantidad de soda calculada, manteniendo la agitación hasta obtenerse la completa gelatinización del almidón.

7.3.3 Acondicionamiento de las muestras de agua artificial para los ensayos de floculación

De acuerdo a los objetivos trazados en el presente trabajo, quedó establecido que se estudiaría la capacidad de los almidones (como polímeros naturales), en flocular aguas con las características que a continuación se describen:

MUESTRA I : Alta Alcalinidad - Alta Turbiedad

MUESTRA II : Alta Alcalinidad - Baja Turbiedad

MUESTRA III : Baja Alcalinidad - Alta Turbiedad

MUESTRA IV : Baja Alcalinidad - Baja Turbiedad

Para tal efecto fue necesaria la preparación de las muestras de agua, en el laboratorio, de manera que los principales parámetros relacionados con los procesos de Coagulación-Floculación, fueran

razonablemente conocidos y fáciles de acondicionar.

Es por ello que se ha considerado a la turbiedad y alcalinidad como parámetros variables, siendo el pH fijado a un valor casi neutral, con el propósito de reducir el número de ensayos a ejecutar.

7.2.3.1 Acondicionamiento de la Alcalinidad

Con la finalidad de acondicionar la alcalinidad de cada muestra, fueron utilizados conjuntamente agua desionizada y agua potable de la red de servicio público, siendo las características de las mismas, las siguientes:

<u>Agua de la Red Pública</u>	<u>Agua Desionizada</u>
$A_o^I = 125 \text{ ppm, como CaCO}_3$	$A_o^II = 5-6 \text{ ppm, como CaCO}_3$
$\text{pH}_o^I = 7.7$	$\text{pH}_o^II = 5.2 \text{ upH}$
$C_o^I = 600 \text{ mohs}$	$C_o^II < 5.0 \text{ mohs}$
$D_o^I = 115 \text{ ppm, como CaCO}_3$	$D_o^II \approx 0.00 \text{ ppm, como CaCO}_3$

Para el cálculo de la alcalinidad se utilizó la siguiente expresión:

$$A_m = \frac{A_d V_d + A_r V_r}{V_0}$$

Donde:

A_m = Alcalinidad media deseada (ppm, como CaCO_3)

A_d = Alcalinidad del agua desionizada (ppm, como CaCO_3)

A_r = Alcalinidad del agua de la Red (ppm, como CaCO_3)

V_m = Volumen medio final de muestra (Lt)

V_d = Volumen de agua desionizada (Lt)

V_r = Volumen de agua de la Red (Lt).

Durante el acondicionamiento se debe trabajar en agitación continua.

7.3.3.2 Acondicionamiento de la Turbiedad

Para producir la turbiedad de cada muestra, se utilizó tierra orgánica tratada adecuadamente:

- Se pesó una cantidad conocida de tierra orgánica, después de haber sido cernida y pasada por la Malla N° 200, de la serie TAYLOR de la ASTM.

- Dicha tierra fue colocada en cápsulas

de porcelana e introducida en una Mufla por un tiempo aproximado de 20 minutos, y a una temperatura de 300-400°C, con la finalidad de eliminar toda materia orgánica capaz de deteriorarla posteriormente.

- En cada caso se preparó una solución madre de tierra tratada, dejándola reposar por un tiempo conveniente, y tomando el sobrenadante para obtener la turbiedad deseada. El agua utilizada para este fin, fue aquella cuya alcalinidad se acondicionó al paso anterior.

Adoptándose el mismo criterio para la determinación de la alcalinidad, se obtuvo la siguiente expresión:

$$Nm = \frac{Ns \ Vs + Na \ Va}{V_T}$$

En donde:

Nm = Concentración media de partículas, deseada.

Ns = Concentración de partículas de la solución

madre.

N_a = Concentración de partículas de alcalinidad acondicionada.

V_a = Volumen de muestra de alcalinidad recondicionada (Lt).

V_s = Volumen de solución madre (Lt)

V_t = Volumen total final (Lt).

Para que la turbiedad pueda considerarse como medida de concentración, debe existir un alto grado de dispersión de las partículas. Por tanto, para que la expresión antes mostrada sea válida, debe agitarse fuertemente la muestra antes de medir la turbiedad.

En la Fig. N° 7.8 , se muestra el Flujoograma que presenta la preparación de las Muestras de agua artificial.

7.3.4 Ensayos de floculación

Los ensayos de floculación, para cada muestra de agua, serán realizados de modo a caracterizar, tres etapas distintas: determinación de las dosis ópti-
ma de sulfato de aluminio y almidón, obtención

de parámetros de floculación, y sedimentabilidad.

La primera etapa tendrá como objetivo la determinación de la dosis óptima de sulfato de aluminio y también la dosis más conveniente de cada almidón a estudiar.

Esta etapa será realizada a través de ensayos de floculación en los cuales serán considerados las siguientes condiciones:

Mezcla rápida

- Volumen de cada reactor: 2000 ml.
- Velocidad en la cual se realizará la mezcla rápida que será de 100 rpm, velocidad máxima que permite el equipo a utilizar.
- Gradiente de velocidad durante la mezcla rápida, corresponderá en cada caso a la velocidad de 100 rpm y a la temperatura del agua.
- Tiempo total de mezcla rápida: 60 seg.

Esta determinación se adoptó considerando que en este tiempo se logra una mezcla homogénea del coagulante agregado con la masa de agua tratada.

Floculación

Los siguientes parámetros serán determinados en laboratorio:

- Tiempo total de floculación.
- Gradientes óptimos de velocidad durante la floculación.

Sedimentación

Profundidad de toma de muestra de sobrenadante en cada reactor: 6 cm.

Procedimiento para el caso de almidones

- El sulfato de aluminio será adicionado en el instante en que se inicie el conteo del tiempo de mezcla.
- El almidón será adicionado 30 seg. después de la adición de sulfato de aluminio.

Después de la determinación de la dosis óptima de sulfato de aluminio, serán realizados ensayos de floculación con estas dosis.

Con la dosis óptima de sulfato de aluminio agregado

a los reactores, se determinará la dosis óptima de almidón.

Manteniendo constante la dosis óptima de sulfato de aluminio, se procederá a determinar la dosis óptima de almidón siguiendo la metodología descrita.

Una vez determinada la dosis óptima de almidón, se repiten las pruebas manteniendo a esta constante y variando la de sulfato nuevamente, con la finalidad de analizar si se produce alguna reducción en la dosis de sulfato de aluminio.

7.3.5 Parámetros estudiados en los ensayos de floculación

Una manera de cuantificar, directa e indirectamente, el desempeño de los polielectrolitos probados, es estudiando en forma detallada la influencia de ciertos parámetros, los cuales se presentan a continuación.

a. Turbiedad

Son variados los métodos que han sido propuestos para la medición de la eficiencia de floculación, en estudios de laboratorio.

Entre los métodos más conocidos podemos citar

los siguientes:

- Volumen sedimentado: cuanto mejor es la floculación, mayor es el volumen de sedimentos.

- Tasa de sedimentación: Se produce la mayor tasa de sedimentación cuando el proceso de floculación es mejor.

- Tasa de filtración: se dice que la eficiencia de la floculación se relaciona estrechamente con la tasa de filtración, es decir, el tiempo utilizado en el proceso de filtración depende de la eficiencia de floculación.

- Turbiedad: cuanto menor es la concentración de coloides residuales, la eficiencia de floculación es mayor. En base a la turbiedad residual, es que se pueden determinar los porcentajes de turbiedad residual y removida.

De los métodos anteriormente descritos, es que se ha escogido a la turbiedad como medida

de la eficiencia de floculación, debido a su simplicidad de lectura y a su amplia utilización en estudios pilotos y estaciones de tratamiento.

Para el presente trabajo, las medidas de turbiedad se hicieron empleando instrumentos con sistemas Nefelométricos, con desvío de luz a 90° , lo que es común en ingeniería sanitaria. Se relacionó los valores de turbiedad residual con la concentración de partículas primarias, con el propósito de determinar el porcentaje de turbiedad residual $(TR/To) \times 100$, porcentaje de turbiedad removida $[(To-TR)/To] \times 100$ y eficiencia de floculación, (To/TR) . En donde To es el valor de turbiedad inicial y TR el valor de turbiedad residual.

b. Gradiente de velocidad

Es sabido que el concepto de gradiente de velocidad, es aplicado fundamentalmente a las operaciones unitarias de mezcla rápida y floculación, y es por ende un parámetro determinante tanto en los ensayos de laboratorio, como en plantas de tratamiento.

Los gradientes de velocidad empleado en los ensayos de prueba de jarras, se han obtenido en función de la velocidad de giro de las paletas, para vasos de 2000 cc., utilizando en todos los casos deflectores.

La Fig. 7.9, presenta la correlación existente entre el gradiente de velocidad y velocidad de giro de las paletas. Dicha correlación está basada en la teoría de Ruey, Hudson, Singley y Camp.

c. Tamaño del flóculo producido

El tamaño del flóculo formado se convierte muchas veces en un parámetro indicador de una mayor eficiencia del proceso de floculación. Generalmente, se escoge como dosis óptima aquella jarra que produce una partícula mas grande, aunque no siempre la mayor velocidad de sedimentación es producida con el mayor tamaño de flóculos; además no siempre ocurre que para el mayor tamaño de flóculo se produce una mínima turbiedad residual al final del proceso de sedimentación.

El índice considerado en este trabajo para determinar en forma subjetiva el tamaño del flóculo, es el de Willcomb, y se presenta en la Tabla 7.2.

d. Constante de agregación y ruptura de flóculos

La determinación de la constante de aglomeración global de floculación (K_A), y la constante de ruptura de flóculos (K_B), son efectuados mediante el empleo de las Ecuaciones (2) y (3), propuestas por Argaman y Kaufman.

e. Orden de adición del almidón

La influencia del orden de adición y tiempo de adición de polímero y sulfato de aluminio es de suma importancia en los procesos de coagulación-Floculación. La determinación de este parámetro se hizo mediante ensayos de laboratorio, para las siguientes situaciones:

- Adición de polímero (almidón soluble), 30 segundos antes de la adición del sulfato de aluminio.
- Adición conjunta de sulfato de aluminio

y polímero natural.

- Adición de polímero natural a los 20, 30, 40, 60 y 90 segundos después de la adición de sulfato de aluminio.

d. pH y alcalinidad

La concentración de iones de hidrógeno de la mezcla final de agua y sulfato de aluminio, es de fundamental importancia en el proceso de floculación, sobre todo en el proceso de floculación, sobre todo en la formación del flóculo, ésta es la razón por la cual se debe dar especial atención a la medida del valor inicial del pH.

Las reacciones de catión Al^{+3} , del sulfato de aluminio, con la alcalinidad ocurren con más facilidad que las reacciones con el agua. Al reaccionar con la alcalinidad presente en el medio, son consumidos los iones hidróxilos, variando el valor del pH del agua tratada, promoviendo la disminución del pH más lenta con la alcalinidad que cuando se produce la reacción con el agua.

Se estudió también, la influencia de la variación del pH inicial sobre la eficiencia de floculación.

El valor óptimo del pH fue considerado aquel que para los valores óptimos de dosis de sulfato de aluminio, producía la mayor remoción de turbiedad (mayor T_o/T_f).

CUADRO 7.1 CARACTERÍSTICAS DE AGITADORES

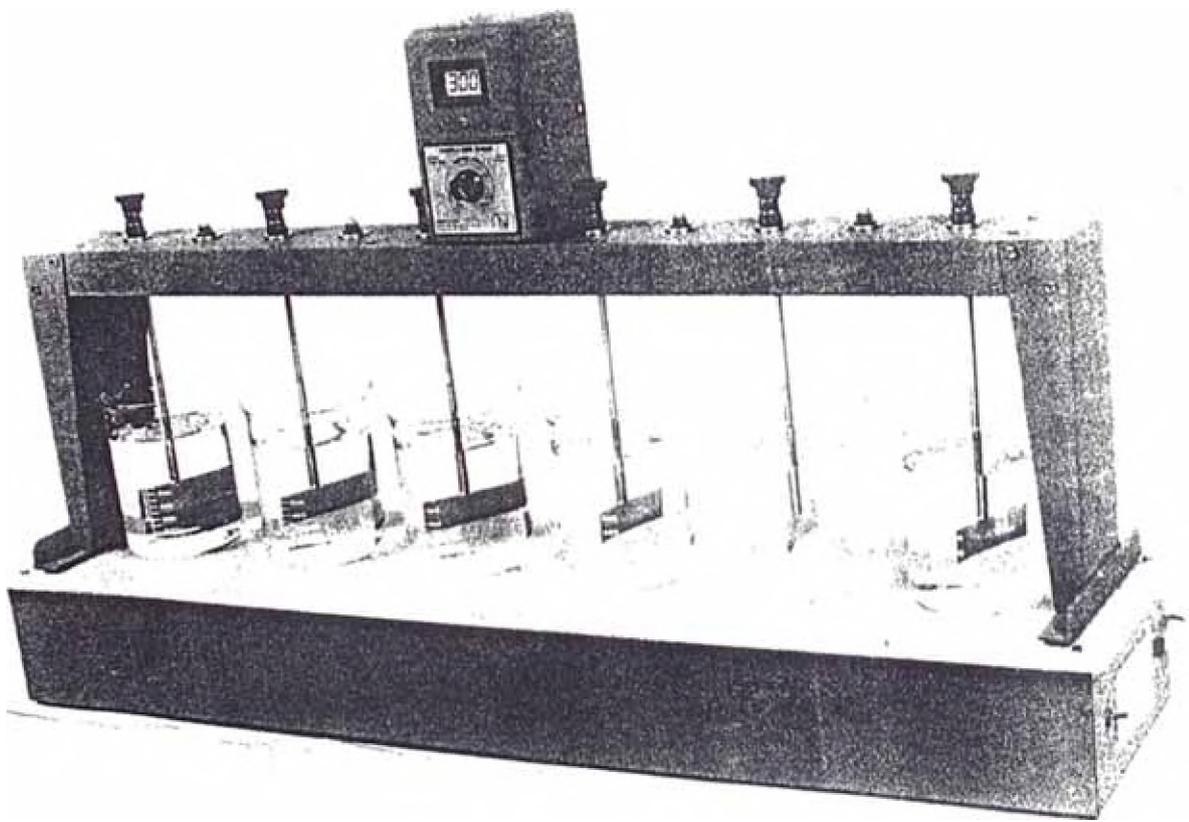
TIPO DE PALETA	Nº DE PALETA	DIAMETRO (D-cm)	ÁREA PROYECTADA (a-cm)	OBSERVACIONES
Plana-1	2	7 y 6	17.5	a
Plana-2	2	7.2	28.6	b
Plana-3	2	7.2	18.4	c
Hélice	3	5.0	4.5	d
Doblada	2	5.0	2.8	

- a) utilizada en Modelo Phipps and Bird
 b) tipo impulsor marino
 c) utilizada por Florida 1- Environmental specialities
 d) utilizada por Florida 2- Environmental specialities

CUADRO 7.2 INDICE DE FLOCULACION DE WILLCOX

Nº DEL INDICE	DESCRIPCION
0	Floc coloidal. Ningún signo de aglutinación.
2	Visible. Floc pequeño, casi imperceptible para un observador no entrenado.
4	Disperso. Floc bien formado pero uniformemente distribuido. (Sedimenta muy lentamente o no sedimenta)
6	Claro. Floc de tamaño relativamente grande pero que se precipita con lentitud.
8	Bueno. Floc que se deposita fácil pero completamente.
10	Excelente. Floc que se deposita todo dejando el agua cristalina

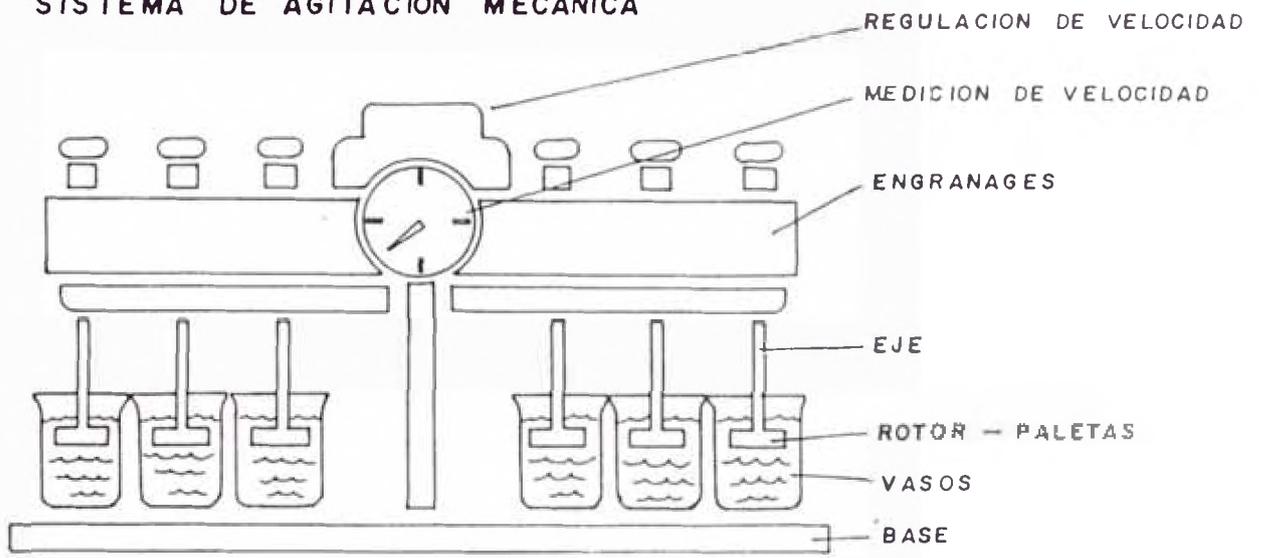
Esta determinación es bastante subjetiva y depende del criterio del observador.



EQUIPO DE PRUEBA DE JARRAS

Figura 7.1

(a) SISTEMA DE AGITACION MECANICA



(b) SISTEMA DE AGITACION MAGNETICA

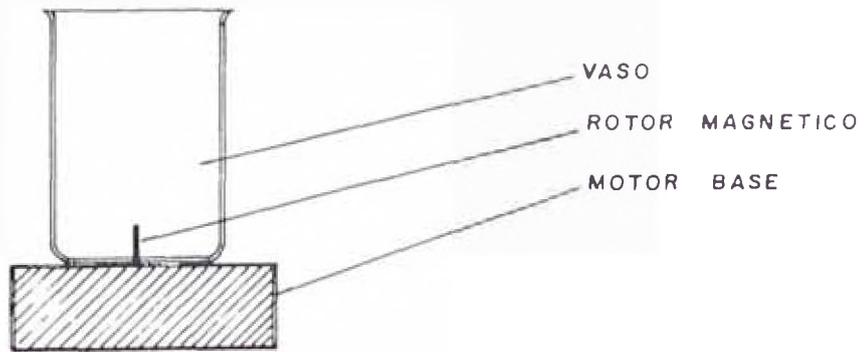
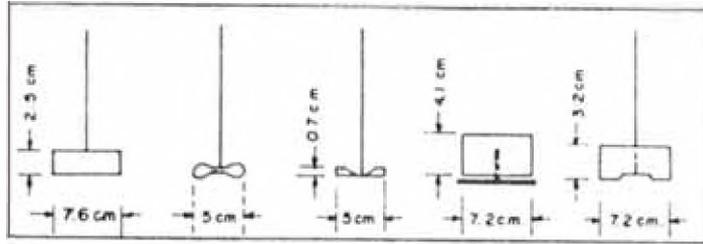
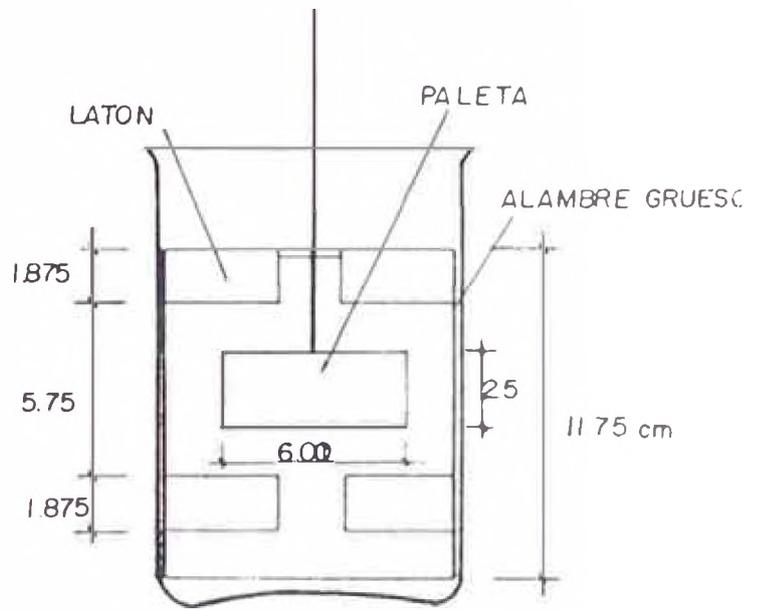
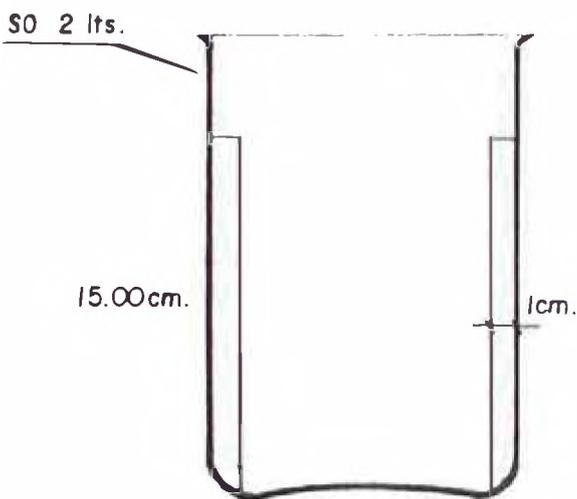


Figura 7.2



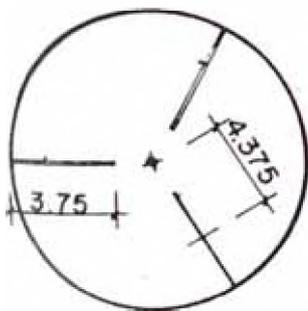
TIPO NORMALIZADO DE PALETAS PARA EQUIPO DE PRUEBA DE JARRAS



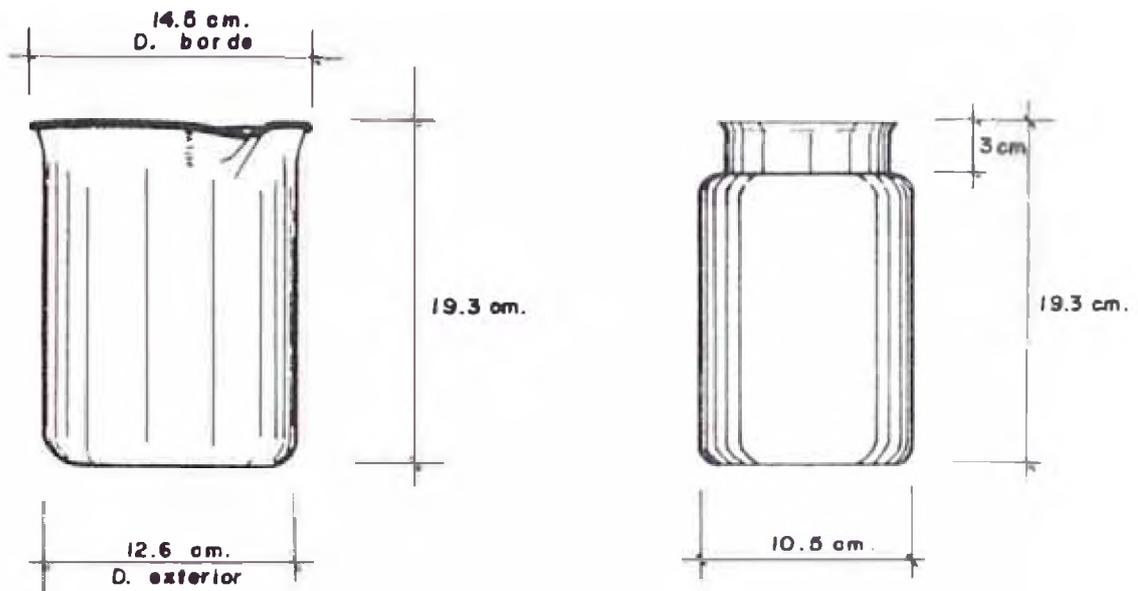
CORTES

TIPOS DE DEFLECTORES

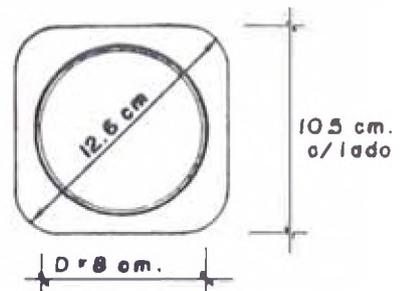
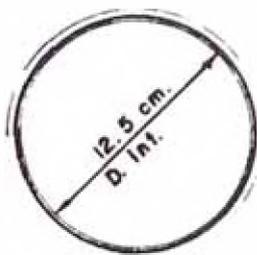
Figura 7.3



PLANTA



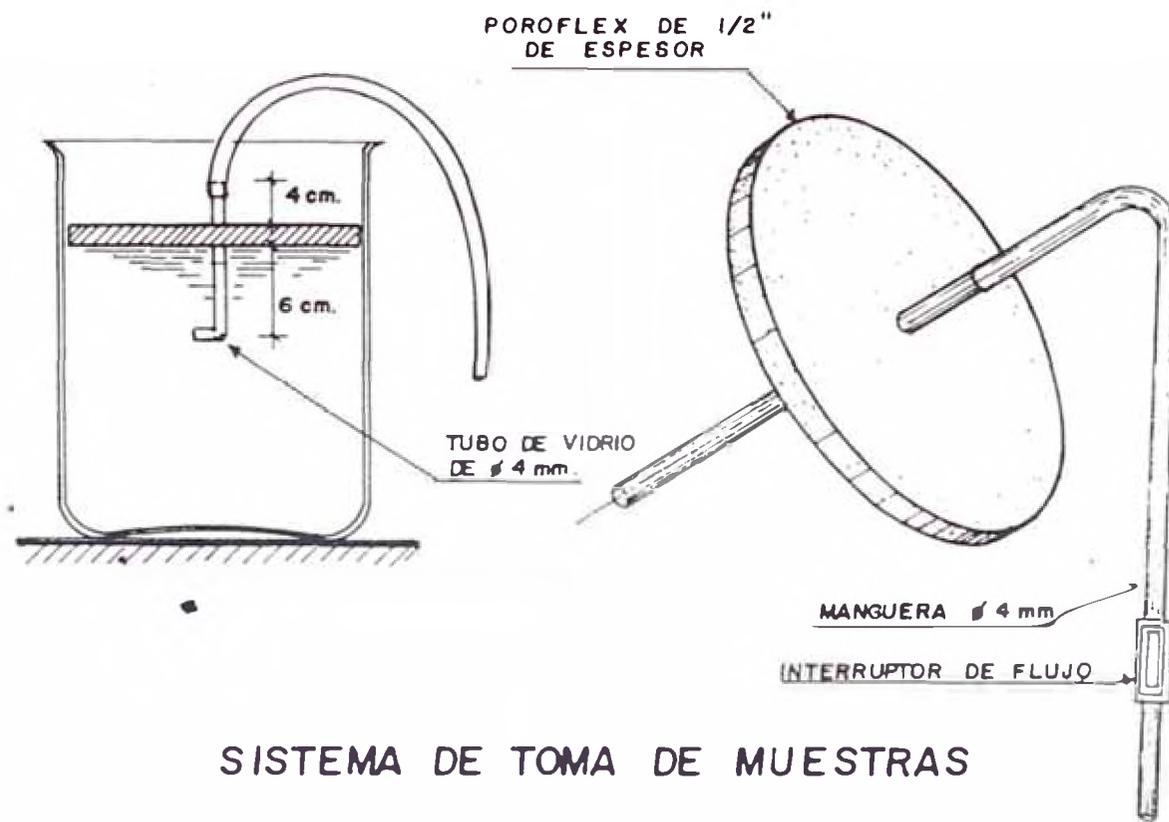
ELEVACIONES



PLANTAS

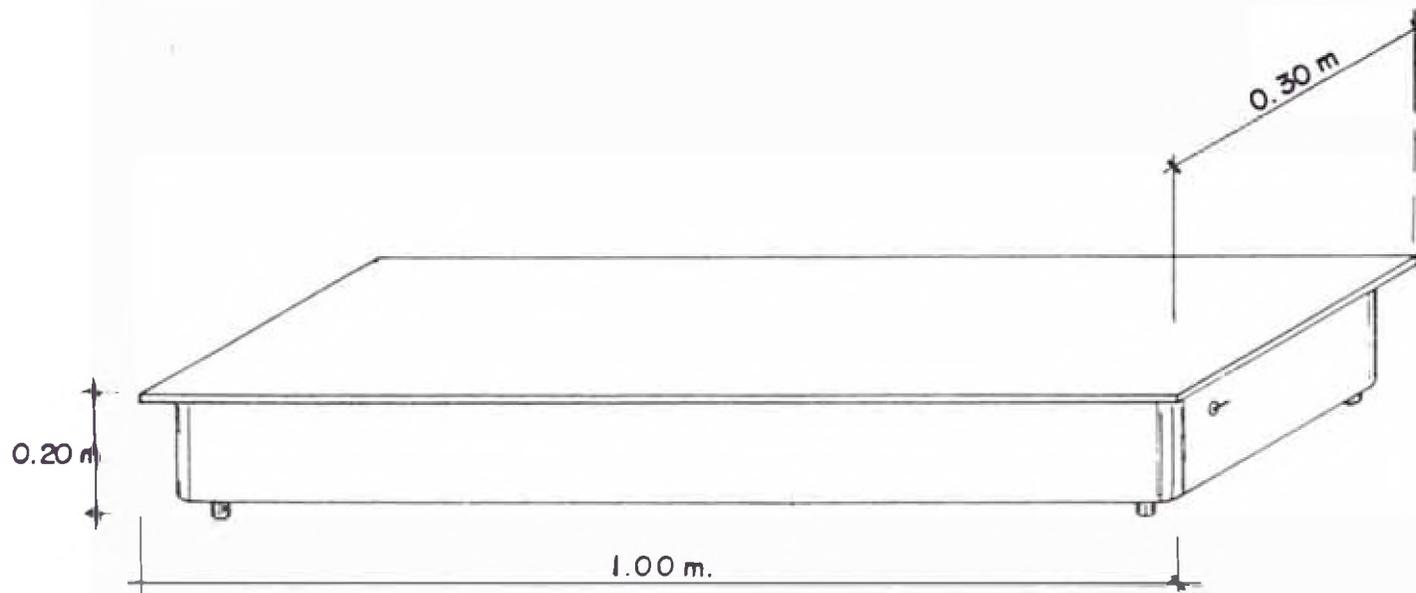
CARACTERISTICAS DE LOS VASOS

Figura 7.4



SISTEMA DE TOMA DE MUESTRAS

Figura 7.5



BASE ILUMINADA ENCIMA DE LA CUAL SE
COLOCA EL EQUIPO DE PRUEBA DE JARRAS

Figura 7.6

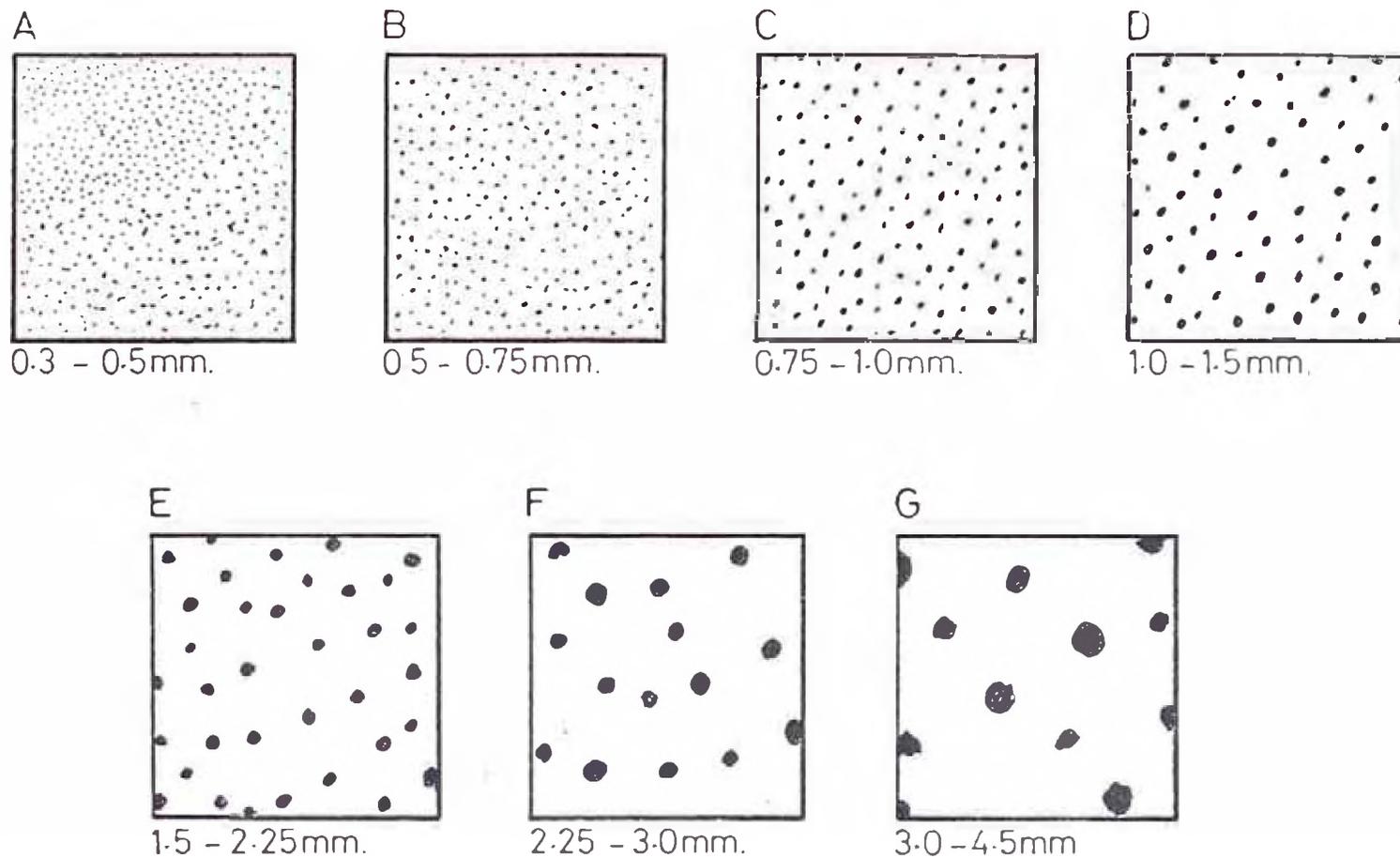
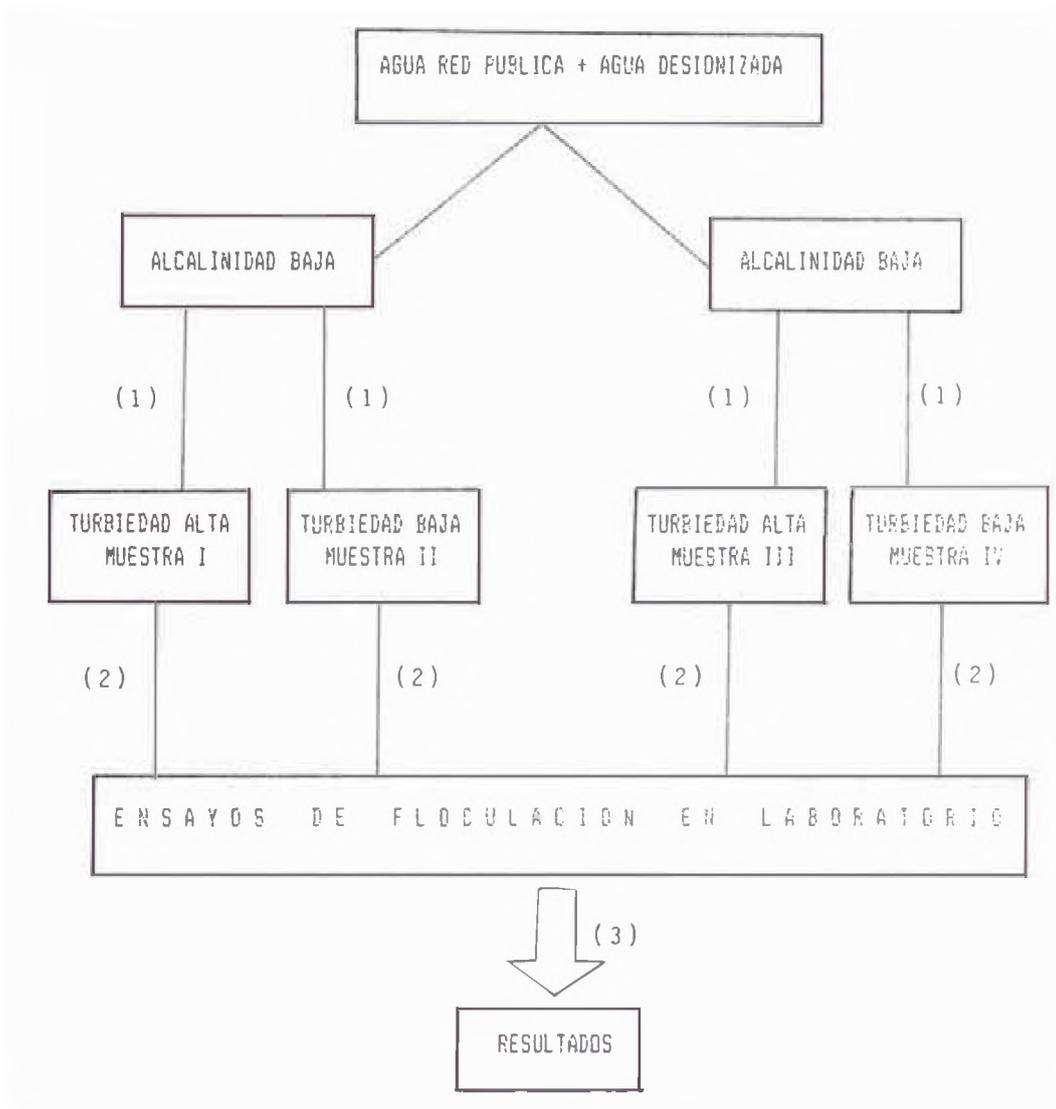


Figura 7.7

COMPARADOR PARA ESTIMAR EL TAMAÑO DEL FLOC
 PRODUCIDO EN LA COAGULACION (SEGUN EL WRA)



- 1 Turbiedad producida con tierra orgánica tratada
- 2 Prueba de jarras
- 3 Procesamiento de la información

DIAGRAMA DE FLUJO

Figura 7.2

GRADIENTE DE VELOCIDAD PARA UN VASO DE FRECIPITADO DE 2 LTS. CON O SIN DEFLECTORES

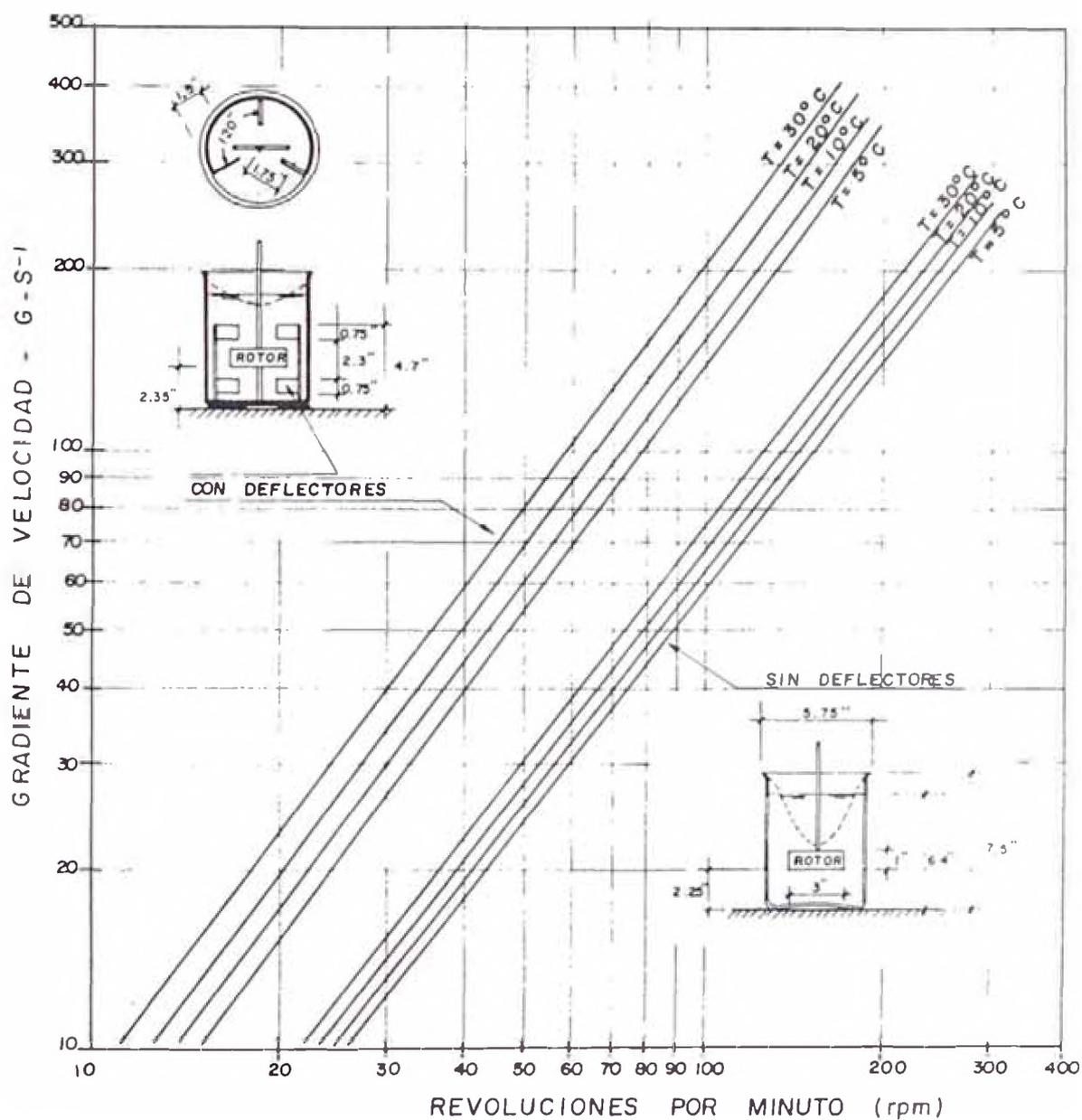


Figura 7.9

8. SOLUBILIZACION DEL ALMIDON

8. SOLUBILIZACION DEL ALMIDON

Existe una gran variedad de procesos que pueden ser empleados para la solubilización del almidón. Como ya se ha explicado, el almidón es poco soluble en agua fría, para lo cual es necesario el uso de ciertos procesos físicos y químicos que pueden dar como resultado un producto soluble de almidón. La eficiencia del proceso a elegir, se hará desde el punto de vista técnico y de su aplicabilidad en una Planta de Tratamiento de Aguas.

A continuación, se muestran en forma concreta los resultados obtenidos en cada proceso, y se enfatizará en aquél o aquellos, que proporcionen una mayor eficiencia.

8.1 Hidrólisis ácida al ambiente

En el presente proceso se utilizó como solución ácida, el ácido sulfúrico al 10%.

Se utilizaron los siguientes almidones, nativo de papa, nativo de maíz, pregelatinizado de maíz y catiónico de maíz.

En los tres casos se obtuvieron productos muy difíciles de manejar, notándose la presencia de grumos y masas gomosas. Por estas razones se descarta este proceso.

8.2 Hidrólisis térmica

Siguiendo la metodología de este proceso, se procedió a calentar, a 100 grados centígrados, la mezcla de almidón en agua, y ayudado mediante agitación, se obtuvo un producto muy soluble de almidón:

- En el caso del almidón de papa, se formó una solución muy viscosa y homogénea, con muchas posibilidades de utilización en los ensayos de pruebas de jarras.
- En el caso del almidón pregelatinizado de maíz, al ser calentado mostró una solución viscosa que a los pocos minutos produjo un precipitado en el fondo del recipiente, comprobándose de esta manera su poca eficiencia, debido a que no mantuvo las características homogéneas y viscosas mencionadas.
- En el caso del almidón catiónico, se formó una solución que al poco tiempo se dispersó y tomó una coloración lechosa, siendo ésta poco eficiente.

En conclusión, el almidón de papa, es el más eficiente utilizando este proceso, y mostró posibilidades de ser utilizado en los ensayos siguientes de floculación.

8.3 Hidrólisis térmica-ácida

En este proceso se utilizó como solución ácida el H_2SO_4 al 10%. Se calentaron las muestras a 40°C, y se obtuvieron los siguientes resultados:

- Con el almidón de papa, a los 5 minutos de calentado, se obtuvo un polvillo muy fino que al tratar de ser disuelto en agua no dió buenos resultados.
- Con el almidón pregelatinizado de maíz, se formó una mezcla muy espesa de coloración blanca opaca, no siendo eficiente su reutilización.
- Al emplear almidón catiónico de maíz se obtuvo una masa en forma de engrudo muy difícil de manejar, no siendo eficiente su utilización en los ensayos de floculación.

8.4 Hidrólisis térmica-alkalina

Este proceso fue desechado, debido a que en todos los casos los productos obtenidos fueron una masa de aspecto gomoso en forma de engrudo, siendo muy difícil su maniobrabilidad, y su solubilidad en agua.

8.5 Almidón calcinado en seco

En este proceso se calcinó el almidón sin necesidad de

Verificándose la expresión determinada por Hesphanol-1975.

Los análisis realizados en laboratorio (*), con el almidón de papa arrojaron como resultado que la soda cáustica libre debe ser de 0.80% y que la cantidad de soda absorbida es de 1.8 gr. por cada 100 gr de almidón.

Matemáticamente las expresiones de solubilización son las siguientes:

$$\text{Almidón de Maíz : } C = \frac{0.75 B_m + 1.60 A_{nm}}{100}$$

$$\text{Almidón de Papa : } C = \frac{0.80 B_m + 1.80 A_p}{100}$$

Donde :

C = Peso de NaOH utilizado en la activación de cada caso (gr.)

A_{nm} = Peso de Almidón Nativo de Maíz (gr).

A_p = Peso de Almidón Nativo de Papa (gr).

B_m = Peso de Agua en cada caso (gr).

8.7 Presentación y discusión de resultados

El Cuadro N° 8.1, presenta los resultados de solubilización

(*) Laboratorio Central del Servicio Nacional de Abastecimiento de Agua Potable y Alcantarillado (SENAPA).

del almidón de papa para diferentes proporciones en peso de almidón y agua (1:5, 1:10, 1:50 ó 1:100).

Los resultados muestran que a mayor cantidad de agua, el gasto de soda cáustica es mayor (elevando de esta manera los costos de producción del almidón soluble). Así mismo, se observa que la viscosidad disminuye.

El pH mantiene valores altos, facilitando de esta manera la conservación del producto.

La densidad de la muestra se mantuvo muy cercana a la del agua.

En cuanto a la solubilidad en agua fría, todas las muestras demostraron ser solubles en todas las proporciones.

Tomando en cuenta que los costos del producto se incrementan al aumentar el peso de soda cáustica (por efecto de su reacción con mayor cantidad de agua), se seleccionó aquella relación en la cual la activación del almidón fue rápida, y su maniobrabilidad adecuada. La proporción seleccionada fue de 1:10.

8.8 Conclusiones

Los métodos que mejor resultados dieron fueron los siguien-

tes:

- Método térmico, y
- Método químico (en frío)

Teniendo en cuenta su aplicabilidad en Plantas de Tratamiento de Aguas, el método térmico implica tener instalaciones adicionales y un procedimiento complejo, para solubilizar el almidón in situ. Además de la desventaja de que el engrudo producido se deteriora rápidamente.

En el caso del método químico la aplicación en planta será más simple y menos costosa en la proporción de 1:10. Y como la emulsión obtenida tiene un pH alto, contribuye a la conservación de la misma.

CUADRO B.1 SOLUBILIZACION DEL ALMIDON DE PAPA

$$C = \frac{0.80 E_m + 1.80 A_p}{100} \quad (*)$$

MUESTRA	PESO DE ALMIDON DE PAPA (gr)	PESO DE SODA CAUSTICA (NaOH) (gr)	VELOCIDAD DE AGITACION (rpm)	PH DE LA EMULSION (pH)	DENSIDAD (gr/ml)	VISCOSIDAD (Paises)	OBSERVACIONES
1	10	50	10.0	13.5	---	250	Reacción de activación muy lenta. Exageradamente viscosa. Coloración amarillo opalescente. Difícil maniobrabilidad. Solubilidad en agua muy lenta.
2	10	100	8.5	13.5	1.0520	70	Reacción de activación rápida. Coloración blanco-amarillo opalescente. Maniobrabilidad adecuada. Solubilidad en agua adecuada.
3	10	500	8.0	13.5	1.0240	2.1	Reacción de activación casi instantánea. Coloración blanco-amarillo opalescente. Fácil maniobrabilidad en agua adecuada.
4	10	1000	10.0	13.5	1.0072	0.2-0.3	Similar a la muestra No 3
5	10	1000	10.0	13.6	1.0490	70-80	Similar a la muestra No 2

(*)

A_p = Peso de almidón nativo de papa (gr.)

E_m = Peso de agua (gr.)

C = Peso de soda caústica, NaOH (gr.)

9. EMPLEO DEL ALMIDON SELECCIONADO CON AGUA ARTIFICIAL

9. EMPLEO DEL ALMIDON SELECCIONADO CON AGUA ARTIFICIAL

Los ensayos de solubilización, proporcionaron resultados positivos en cuanto al almidón de papa, mientras que los resultados que se obtuvieron con el almidón de maíz, concluyeron en el abandono de este producto como ayudante de floculación. La razón es que el almidón de maíz, no cuenta en su configuración, con el grupo éster de ácido fosfórico [OP(O) (OH.)], que es el caso del almidón de papa.

9.1 CARACTERISTICAS DE LAS MUESTRAS DE AGUA ARTIFICIAL

De acuerdo a los objetivos a ser atendidos en el presente trabajo, se prepararon cuatro muestras de agua artificial, con el propósito de comprobar la viabilidad de la utilización del almidón de papa como auxiliar de floculación.

En el siguiente Cuadro son presentadas las características de las muestras estudiadas:

PARAMETRO	UNIDAD	MUESTRA			
		I	II	III	IV
Turbiedad	UNT	420	15	420	15
Alcalinidad	ppm como CaCO ₃	80	80	16	15
Conductividad Específica	μmohS	550	365	550	365
Dureza Total	ppm como CaCO ₃	138	126	12	10
pH	UpH	7.7	7.5	7.6	7.7

La turbiedad y alcalinidad consideradas fueron acondicionadas siguiendo la metodología descrita en el ítem 7.2.3, del presente trabajo.

El pH por encontrarse dentro del rango donde la floculación se realiza en forma eficiente, no fue modificado.

9.2 RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS DE FLOCULACION

Los resultados que serán presentados en este ítem, serán los correspondientes a los ensayos de floculación para las muestras de agua artificial establecidas, utilizando sólo sulfato de aluminio, y luego conjuntamente con almidón de papa, con el propósito de comparar el efecto de los polielectrolitos naturales como ayudantes de floculación.

9.2.1 MUESTRA I: $T_0 = 420$ UNT, $A_0 = 80$ ppm como CaCO_3

La Fig. 9.I.1, presenta los valores de turbiedad en función de la dosis de sulfato de aluminio, habiéndose obtenido un valor óptimo de 35 mg/l, correspondiente a una turbiedad final de 2.6 UNT. En este caso la alcalinidad, de 80 ppm como CaCO_3 , ejerce un efecto amortiguador en el pH (manifestándose en el pH final del agua decantada, Cuadro del Anexo 1), permitiendo utilizar dosis más elevadas de coagulante, pues hay alcalinidad suficiente para

reaccionar con los cationes Al^{+3} .

La concentración del coagulante es un parámetro destinado a mejorar la eficiencia del proceso de coagulación. La Fig. 9.I.2, muestra que para la mínima turbiedad final, 2.8 UNT, se produce una concentración óptima de 1%, indicando que el coagulante se distribuye mejor en la masa de agua, originando la desestabilización de las partículas coloidales de manera más efectiva.

Para la muestra estudiada, las condiciones óptimas de floculación fueron obtenidas para el rango de pH en donde la coagulación se efectúa adecuadamente, (6.5-8.0), no requiriéndose modificar el pH, Fig. 9.I.3.

Las curvas de la Fig. 9.I.4, representan los tiempos óptimos de floculación para distintos valores de gradiente de velocidad, habiéndose producido la mejor situación para un tiempo de floculación de 15 minutos, y una gradiente de 52 seg^{-1} , en donde se obtuvo la mayor remoción de partículas (Tf 3.8 UNT).

La Fig. 9.I.5, elaborada con la dosis óptima de sulfato de aluminio (35 mg/l), y el tiempo de floculación óptimo (15 min.), permitió determinar los siguientes parámetros cinéticos, para la Muestra I y el sulfato de aluminio empleado:

$$G^* = 62 \text{ seg}^{-1}$$

$$(T_o/T_f) = 93$$

$$G^* \times t \text{ floc.} = 55,000$$

$$K_A = 1.75 \times 10E-04$$

$$K_B = 3.04 \times 10E-08 \text{ sg}$$

$$K_C = 1.73 \times 10E-04 \text{ sg}$$

De la Fig. 9.I.6, fue determinada la correlación existente entre el tiempo de floculación y los valores óptimos de gradiente de velocidad, cuando el sulfato de aluminio es empleado solo y para la muestra ensayada. En este caso la ecuación de correlación fue la siguiente:

$$G^{7.94} \times t = 10^{15.5}$$

Siendo el coeficiente de correlación muy aceptable:

$$r = 0.96$$

La Fig. 9.I.7, ha sido ploteada con los resultados

obtenidos de la aplicación conjunta de 35 mg/l de sulfato de aluminio y dosis variables de almidón de papa, llegándose a 0.2 mg/l como dosis óptima del almidón. Se puede apreciar en el Cuadro del Anexo 1, que el pH del agua decantada va en aumento conforme se va incrementando la dosis de almidón de papa, haciéndola menos corrosiva que cuando el sulfato de aluminio actúa solo.

Idealmente con la dosis óptima de sulfato de aluminio, todo el coagulante será absorbido en la fase sólida, por tanto, si agregamos almidón de papa se podría originar una saturación de la superficie de las partículas, ocupando los "sitios" de adsorción para la formación de "puente" entre los flóculos. Es por esta razón que se prevé una reducción en la dosis óptima de sulfato de aluminio, determinándose una reducción del 10% (31.5 mg/l), equivalente a una turbiedad final de 3.6 UNT. Este porcentaje puede ser mayor si se entiende que los filtros aceptan afluentes de hasta 10 UNT.

La Fig. 9.I.9, presenta los valores de turbiedad final en función del tiempo de floculación, cuando son aplicados sulfato de aluminio y almidón de

papa conjuntamente. En este caso, la situación más favorable correspondió a un tiempo de 20 minutos, mayor al que se obtuvo solo con sulfato de aluminio y para una misma gradiente, 52 sg-l.

La Fig. 9.I.10, elaborada utilizando 31.5 mg/l de sulfato de aluminio y 0.2 mg/l de almidón de papa, permitió los siguientes parámetros cinéticos de floculación:

$$G^* = 63 \text{ sg-l}$$

$$t \text{ floc.} = 20 \text{ min.}$$

$$G^* \times t \text{ floc.} = 75,600$$

$$(T_o/T_f) = 82$$

$$K_A = 1.26 \times 10E-04$$

$$K_B = 2.44 \times 10E-08 \text{ seg}$$

$$K_C = 1.94 \times 10E-04 \text{ seg.}$$

Si comparamos estos resultados con los obtenidos de la aplicación aislada de sulfato de aluminio, notamos que los valores de gradiente de velocidad permanecen casi invariables, mientras que el período de floculación es mayor cuando se utiliza almidón de papa, necesitando una energía de floculación más elevada, significando posibles modificaciones

en las unidades de floculación en el momento de su aplicación.

Se puede apreciar también, que la eficiencia de floculación mejora cuando se aplica almidón de papa, llegándose a un valor menor de $T_o/T_f = 82$.

Con respecto a los coeficientes de aglomeración (KA) y de ruptura (KB), vemos que ambos disminuyen indicando una menor capacidad de aglomeración y una mayor resistencia del flóculo a la ruptura, respectivamente, cuando se utilizan en forma combinada sulfato de aluminio y almidón de papa.

La ecuación de correlación, cuando se utiliza almidón de papa es la siguiente (Figs. 9.I.11 y 9.I.12):

$$G^{9.167} \times t = 10^{8.8}$$

siendo $r = 0.96$

Comparando las ecuaciones de correlación, vemos que para un mismo tiempo de floculación se requiere utilizar gradientes de velocidad mayores, cuando se usa el almidón de papa como auxiliar de flocula-

ción, demostrando la necesidad de energía de floculaciones mayores que cuando el sulfato de aluminio es empleado aisladamente.

Se ha dicho que cuanto mejor es la floculación, mayores y más elevadas deberían ser las velocidades de sedimentación. Las Figs. 9.I.13 y 9.I.14, presentan las curvas de eficiencia de sedimentabilidad en función de la velocidad de sedimentación de los flóculos. Se aprecia que la mayor velocidad de sedimentación fue obtenida para el caso en que se utilizó el almidón de papa como ayudante de floculación y llegándose a valores de hasta 1.25 (25%) veces la velocidad de sedimentación, cuando el sulfato de aluminio actúa sólo.

De esto se deduce que el tratamiento con almidón de papa produce flóculos más densos y pesados, siendo la máxima remoción de turbiedad de 99.4%.

La eficiencia remocional resulta ser mejor durante los primeros 7 minutos, para el caso del almidón de papa, para luego ser mejor cuando se utiliza solo sulfato de aluminio. Esto demuestra que los resultados no son estimulantes para este tipo de

agua, siendo los costos de aplicación quienes decidan su aplicación en planta (Fig. 9.I.15).

9.2.2 MUESTRA II: To - 15 UNT, Ao - 80 ppm como CaCO_3

En la Fig. 9.II.1 se aprecia que la dosis de sulfato de aluminio que produce la más rápida desestabilización de las partículas coloidales fue de 22.5 mg/l (dosis óptima), correspondiéndole una turbiedad final $T_f = 1.6$ UNT. En este caso, como en la Muestra I la alcalinidad fue alta lo que evitó el brusco descenso del pH.

La concentración de sulfato de aluminio que dió las condiciones óptimas fue 0.5%, con una turbiedad final de 1.2 UNT. Esta concentración permite aplicar de un modo uniforme el sulfato de aluminio haciendo eficiente la coagulación. Ver Fig. 9.II.2.

En la Fig. 9.II.3, se observa que el rango de pH, donde la coagulación es más efectiva es de 6.5 a 8.0. Como el pH de la muestra era de 7.5, no fue necesario modificarlo.

La Fig. 9.II.4, presenta los tiempos óptimos de floculación con las gradientes estudiadas (utilizando

sulfato de aluminio como único coagulante): 20, 52, 90 y 130 seg-1, apreciándose que la mejor condición presentada fue para la gradiente de 52 seg-1 con un tiempo de floculación de 15 minutos. La gradiente de 90 seg-1 presentó una condición similar a la de 52 seg-1 con un tiempo aproximadamente 14 minutos, razón por la cual se seleccionó la primera opción.

La Fig. 9.II.5, presenta la curva de eficiencia de floculación en función de la gradiente (actuando sólo el sulfato de aluminio). Esta curva fue confeccionada con la eficiencia de las gradientes a 15 minutos. De esta curva se observa que la mejor eficiencia de floculación se presenta a los 15 minutos con una gradiente de 60 seg-1 y con una eficiencia de 6.8, los parámetros cinéticos determinados son los siguientes:

$$\begin{aligned} G^* &= 60 \text{ seg}^{-1} \\ (T_0/T_f)_{\max} &= 6.80 \\ G^* t_{\text{floc}} &= 54,000 \\ K_A &= 8.74 \times 10^{-5} \\ K_B &= 2.14 \times 10^7 \text{ seg.} \\ K_C &= 2.45 \times 10^{-3} \text{ seg.} \end{aligned}$$

La Fig. 9.II.6, presenta las gradientes óptimas de floculación con los tiempos: 5, 10, 15, 20 y 25 minutos, apreciándose que la condición óptima fue obtenida con 15 minutos y con una gradiente de 61.5 seg^{-1} .

La dosis óptima de almidón de papa (Fig. 9.II.7), fue de 0.5 mg/l, correspondiéndole una turbiedad final $T_f=1.4$ UNT. Así mismo, se observa que al incrementar las dosis de almidón de papa se incrementa el pH del agua decantada.

La Fig. 9.II.8, muestra las dosis de sulfato de aluminio reducidas en: 0, 10, 20, 30, 40 y 50%, con la dosis óptima de almidón. De esta Fig. se aprecia que la reducción del coagulante fue del 20% con una turbiedad final de 1.3 UNT. Este porcentaje puede incrementarse incluso hasta un 50% ya que la turbiedad final obtenida fue de 4.8 UNT, considerando que los filtros aceptan hasta 10 UNT.

La Fig. 9.II.9, muestra los tiempos de floculación, al utilizar conjuntamente sulfato de aluminio y almidón. Para 20 seg^{-1} , el tiempo fue de 50 min.; para 52 seg^{-1} y 15 minutos; para 90 Seg^{-1} , 10 min;

y para 130 seg^{-1} , 15 minutos. Luego la mejor condición presentada fue con 52 seg^{-1} y 15 minutos.

La curva de eficiencia de floculación en función de la gradiente utilizando el almidón como ayudante de floculación se muestra en la Fig. 9.II.10. De esta curva se aprecia que la mejor situación se presenta a los 15 minutos con una gradiente de 61 seg^{-1} , habiéndose determinado los siguientes parámetros cinéticos:

$$\begin{aligned} G^* &= 61 \text{ seg}^{-1} \\ G^* t_{\text{floc}} &= 54,900 \\ (T_o/T_f)_{\text{máx}} &= 6.5 \\ K_A &= 8.45 \times 10^{-5} \\ K_B &= 2.13 \times 10^{-5} \text{ seg.} \\ K_C &= 2.52 \times 10^3 \text{ seg.} \end{aligned}$$

La Fig. 9.II.11, muestra la curva de gradientes óptimos de floculación (utilizando conjuntamente sulfato de aluminio y almidón de papa), observándose que la gradiente óptima fue de 61.5 seg^{-1}).

La correlación de gradientes y tiempos óptimos de floculación, para el caso de usar sulfato de aluminio como único coagulante, y el caso de utilizar el almidón de papa como ayudante de floculación,

se aprecia en la Fig. 9.II.12. Obteniéndose las siguientes relaciones:

$$SO_4 : G^{1.244} \cdot T = 10^{3.357}, \quad r = 0.87$$

$$SO_4 = AIM : G^{3.413} \cdot T = 10^{7.3}, \quad r = 0.88$$

Las Figs. 9.II.13 y 9.II.14, muestran las curvas de eficiencia de sedimentabilidad utilizando sólo sulfato de aluminio, y conjuntamente sulfato más almidón de papa, respectivamente. Para estas curvas se utilizaron los parámetros de floculación óptimos determinados en los ensayos anteriores.

De los gráficos se aprecia que a mayor velocidad de sedimentación la relación $(T_f/T_o = C)$ disminuye, lo que significa que la turbiedad final disminuye. Comparando las dos curvas se observa que cuando se utiliza almidón de papa como ayudante de floculación, la velocidad de sedimentación es mayor que cuando usamos sólo sulfato de aluminio, lo que indica que durante todo el proceso los flóculos producidos con sulfato más almidón son más densos, haciendo que precipiten a mayor velocidad.

Al inicio de la sedimentación, la velocidad (con

sulfato más almidón), fue $v_s = 0.05$ cm/seg para un $C = 0.587$, para este mismo C si utilizamos sólo sulfato se tiene una $v_s = 0.035$ cm/seg, es decir que el almidón incrementó la v_s al inicio del proceso en un 43%. Casi al finalizar el proceso este incremento es del orden de 42%.

La curva de eficiencia remocional, Fig. 9.II.15, muestra que al utilizar el almidón de papa como ayudante de floculación se tiene una mayor eficiencia remocional que cuando se utiliza sólo sulfato de aluminio.

Para 15 minutos, tenemos que si usamos sólo sulfato se tiene una eficiencia de 87.5%, esta misma eficiencia se logra con sulfato más almidón en aproximadamente en 10 minutos, lo cual indica que puede disminuirse el tiempo de sedimentación en un 33%.

9.2.3 MUESTRA III: $T_o = 420$ UNT, $A_o = 16$ ppm $CaCO_3$

La curva de turbiedad final en función de la dosis de sulfato de aluminio, mostrada en la Fig. 9.III.1, proporciona el valor óptimo de la dosis, siendo igual a 20 mg/l. Para este tipo de agua, la alcalinidad se convierte en un parámetro de alta influencia

en el proceso de coagulación, pues conforme se incrementa la dosis de sulfato de aluminio, la alcalinidad es consumida rápidamente ocasionando un descenso del pH más rápido y brusco, ubicándolo en un rango en donde la coagulación no se realiza, o lo hace en forma deficiente, justificando el empleo de bajas dosis para flocular aguas con estas características, y provocando el deterioro de la calidad final obtenida.

De la Fig. 9.III.2, se deduce que la concentración óptima de sulfato de aluminio, se produjo para un valor de 1%, mejorando la eficiencia de la mezcla rápida, lo que se manifiesta con una mínima turbiedad final de 6.7 UNT.

La Fig. 9.III.3, muestra el efecto del pH en la eficiencia de floculación. Nótese que el rango de PH se encuentra dentro de los límites en donde la coagulación de partículas causantes de turbiedad, se realiza adecuadamente. Además, se aprecia una dependencia de pH mayor, en concentraciones mayores de sulfato de aluminio, por ello la baja calidad del agua tratada.

Las curvas de turbiedad final en función de los

tiempos de floculación (Fig. 9.III.4), muestra que para 15 minutos de floculación, con un gradiente de velocidad de 90 seg^{-1} , se produce una mínima turbiedad final ($T_f = 3.2 \text{ UNT}$). Para el tiempo óptimo de floculación determinado, y el sulfato de aluminio, fue elaborada la Fig. 9.III.5, de la cual se determinaron los siguientes parámetros de floculación:

$$\begin{aligned} G^* &= 109 \text{ seg}^{-1} \\ t \text{ floc.} &= 15 \text{ min.} \\ G^* \times t \text{ floc} &= 98,100 \\ (T_o/T_f) &= 130.00 \\ K_A &= 1.06 \times 10^{-4} \\ K_B &= 7.51 \times 10^{-9} \text{ seg.} \\ K_C &= 7.05 \times 10^{-5} \text{ seg.} \end{aligned}$$

Se puede apreciar los elevados valores de gradiente de velocidad empleados para flocular estas aguas, como consecuencia del efecto producido por la presencia de alcalinidades bajas, convirtiéndose en una diferencia sustancial con aguas de alta alcalinidad. Además para tratar estas aguas se deben utilizar valores muy elevados de energía de floculación, siendo probablemente mejor utilizar acondicionadores de pH y alcalinidad.

La correlación existente entre los tiempos de floculación y gradientes óptimos de velocidad, obtenida de la Fig. 9.III.6, siendo la siguiente:

$$G^{3.65} \times t = 10^{8.75}$$

en donde: $r = 0.95$

Para la determinación de la dosis óptima de almidón de papa, se utilizó 20 mg/l de sulfato de aluminio en forma conjunta con dosis variables de almidón de papa. La Fig. 9.III.7, muestra que la dosis óptima de almidón de papa es de 0.5 mg/l. Se aprecia que la calidad del agua decantada sufre una considerable mejora, llegándose a una mínima turbiedad final de 2.6 UNT. Este aumento en la calidad del agua tratada se debe probablemente, al efecto que produce el almidón de papa, sobre el pH del agua cruda, evitando el descenso del mismo (el pH del almidón de papa es de 11.4).

El diagrama de barras de la Fig. 9.III.8, presenta los resultados de la prueba de determinación de reducción en la dosis de sulfato de aluminio, cuando se utiliza el almidón de papa como ayudante de

floculación, llegándose a una reducción del 10% (18 mg/l), pudiéndose considerar un mayor valor, siempre que no se llegue a superar el límite de turbiedad permisible como afluente para los filtros. Es importante el hecho de que aún cuando se produce la reducción de sulfato de aluminio, la remoción de turbiedad es mayor que cuando se utiliza solamente sulfato de aluminio.

Para el caso de la determinación de parámetros de floculación, los resultados fueron muy inestables (Figs. 9.III.9, 9.III.10, 9.III.11 y 9.III.12), lo que no permitió su comparación con relación al sulfato de aluminio actuando solo.

Por tanto se deduce que el tratamiento de estas aguas con almidón de papa, no representa técnicamente una alternativa ventajosa de solución, cuando es utilizado como auxiliar de floculación.

Con respecto a la velocidad de sedimentación, las Figs. 9.III.13 y 9.III.14, nos muestra que mayores velocidades se producen cuando el tratamiento es efectuado sólo con sulfato de aluminio, que cuando se emplea en forma conjunta con el almidón de papa.

Referente a la eficiencia remocional (Fig. 9.III.15), los resultados son indistintos para ambos casos, notándose una mejoría leve durante los 5 primeros minutos de decantación, para el caso en que se utiliza almidón de papa.

9.2.4 MUESTRA IV: $T_0 = 15$ UNT, $A_0 = 15$ ppm CaCO_3

La Figura 9.IV.1 muestra que la dosis óptima del sulfato de aluminio fue de 15 mg/l, correspondiéndole una turbiedad final $T_d = 2.5$ UNT. Debido a que la alcalinidad inicial es baja, esta reacción con el coagulante haciendo que el pH varíe.

La concentración con la cual se aplica de un modo uniforme el sulfato de aluminio fue de 1.0%, correspondiéndole una turbiedad final de 1.7 UNT, como se aprecia en la Figura 9.IV.2.

La Figura 9.IV.3 nos muestra el rango de pH en donde se tiene las mejores condiciones de floculación, este rango resultó entre 7 y 8. Considerando que el pH de la muestra fue de 7.7 no fue necesario modificarlo.

En la Figura 9.IV.4 (usando sólo sulfato de aluminio)

se aprecia que con una gradiente de 90 seg^{-1} el tiempo de floculación resulta 15 minutos. Con 130 seg^{-1} el tiempo fue de 10 minutos, luego la mejor condición se logra con 15 minutos.

La curva de eficiencia de floculación en función de la gradiente, cuando utilizamos sólo sulfato de aluminio, muestra que para 15 minutos la mejor eficiencia se produce con una gradiente de 88 seg^{-1} y con una eficiencia $T_0/T_f = 8.8$. Tal como se aprecia en la Figura 9.IV.5, de la cual fueron determinados los siguientes parámetros cinéticos:

$$\begin{aligned} G^* &= 88 \text{ seg}^{-1} \\ G^* t_{floc} &= 79,200 \\ K_A &= 6.56 \times 10^{-5} \\ K_B &= 8.47 \times 10^{-8} \text{ sg.} \\ K_C &= 1.29 \times 10^{-3} \text{ sg.} \end{aligned}$$

En la Figura 9.IV.7, se aprecia que la dosis óptima de almidón fue de 1.0 mg/lt, correspondiéndole una turbiedad de 0.9 UNT.

En la Figura 9.IV.8, se muestra que la reducción de dosis de sulfato con que se logra la mejor condición fue de 20%, logrando una turbiedad final de

1.2 UNT, pudiendo incrementarse la reducción hasta un 50%, porque con este porcentaje de reducción se logró una turbiedad final de 7.9 UNT, valor que los filtros todavía aceptan.

Las Figuras 9.IV.9 y 9.IV.10, muestran el mayor beneficio que se produce para un tiempo de 20 minutos y los siguientes parámetros cinéticos:

$$\begin{aligned}G^* &= 88 \text{ Seg.}^{-1} \\G^* t_{\text{floc}} &= 79,200 \\K_A &= 6.56 \times 10^{-5} \\K_B &= 8.47 \times 10^{-8} \text{ Seg.} \\K_C &= 1.29 \times 10^{-3} \text{ Seg.}\end{aligned}$$

En la Figura 9.IV.7, se aprecia que la dosis óptima de almidón fue de 1.0 mg/lt, correspondiéndole una turbiedad de 0.9 UNT.

En la Figura 9.IV.8, se muestra que la reducción de dosis de sulfato con que se logra la mejor condición fue de 20%, logrando una turbiedad final de 1.2 UNT, pudiendo incrementarse la reducción hasta un 50% porque con este porcentaje de reducción se logró una turbiedad final de 7.9 UNT, valor

que los filtros todavía aceptan.

Las Figuras 9.IV.9 y 9.IV.10, muestran el mayor beneficio que se produce para un tiempo de 20 minutos y los siguientes parámetros cinéticos:

$$\begin{aligned}G^* &= 119 \text{ Seg}^{-1} \\G^* t_{\text{floc}} &= 142,800 \\(T_o/T_f)_{\text{max}} &= 9.80 \\K_A &= 3.78 \times 10^{-5} \\K_B &= 3.24 \times 10^{-8} \text{ seg.} \\K_C &= 8.57 \times 10^{-4} \text{ seg.}\end{aligned}$$

Asimismo, las curvas de la Figura 9.IV.12, representan la correlación existente entre los tiempos de floculación y los gradientes óptimos de velocidad:

$$SO_4 : G^{1.927} T = 10^{4.99}, \quad r = 0.98$$

En este caso, al igual que para la muestra III (baja alcalinidad); los resultados no son muy estables cuando se adicionan conjuntamente sulfato de aluminio con almidón de papa, quedando demostrado que la alcalinidad produce un efecto negativo en el proceso de floculación.

La velocidad de sedimentación resulta ser mayor

cuando se utiliza el polímero natural, llegándose a alcanzar 2.17% veces la velocidad de sedimentación sólo para sulfato de aluminio.

Si analizamos la Figura 9.IV.15, deducimos que se obtiene mayores valores de remoción de turbiedad cuando se utiliza el polímero natural, durante los primeros 15 minutos, después de este tiempo es más eficiente el sulfato de aluminio actuando aisladamente.

9.3 DISCUSION DE RESULTADOS

Los ensayos de floculación permitieron comparar el desempeño del almidón de papa como auxiliar de floculación, en distintas muestras de agua artificial.

Generalmente la concentración de sulfato de aluminio que produce la condición más favorable, es del 1% (para la muestra fue de 0.5%), en la que ocurre un eficiente proceso de mezcla rápida.

En términos de valores iniciales de pH, éste siempre se encontró en el rango en donde la coagulación se realiza en forma efectiva, es decir [6.5 - 8.5].

Otro aspecto a ser considerado es el de la dosis de almidón

de papa. Este parámetro varia de 0.2 mg/l hasta 1 mg/l, manteniéndose en la mayoría de los casos, en valores menores o iguales a 0.5 mg/l. Es importante notar que no existe una correlación entre la dosis de almidón de papa y la turbiedad del agua cruda, favoreciendo considerablemente a la aplicación de este producto, pues implica dispositivos de dosificación más simples.

Asimismo, la aplicación del almidón de papa, significa una disminución en la dosis de sulfato de aluminio utilizada, habiéndose encontrado las mayores reducciones sobre todo con aguas claras (muestras II y IV), lo que podría significar un ahorro en los costos de productos químicos.

PARAMETROS DE FLOCULACION

El estudio de los parámetros de floculación proporcionan la información necesaria para mejorar la eficiencia de este proceso. Las pruebas realizadas permitieron determinar las condiciones óptimas de floculación y los parámetros cinéticos, para las distintas muestras de agua artificial estudiadas, utilizando sulfato de aluminio y almidón de papa en forma conjugada, los que se muestran en el Cuadro N° 9.1 .

Es apreciable que cuando se tienen bajas alcalinidades

se requiere de mayores gradientes de velocidad, además nótese que los valores de eficiencia de floculación (T_o/T_f) son mayores para el caso en que se utiliza almidón de papa.

Si analizamos individualmente cada muestra, los gradientes óptimos son prácticamente invariables, Muestra I y II; mientras que en las Muestras III y IV (alcalinidad baja), se requieren de gradientes mayores cuando se utiliza almidón de papa como auxiliar de floculación.

En el Cuadro mostrado, se observa que para cada tipo de agua, el valor de K_A disminuye cuando se emplea almidón de papa como coadyuvante, que para sólo sulfato de aluminio, porque puede no ocurrir refloculación después del rompimiento de los flóculos, pues la adsorción en la interfase puede ser irreversible, como consecuencia de una reestabilización provocada por las largas cadenas del polímero natural.

Con respecto a K_B , se deduce que para todas las muestras este valor es menor señalando que la ruptura del flóculo es mucho menor cuando se utiliza almidón de papa, debido al "entrelazamiento" causado por las cadenas del polielectrolito, existiendo una mayor fuerza de "ligazón" entre las partículas. Por tanto, existe una mayor resistencia del

flóculo a la abrasión, cuando se emplea almidón de papa como ayudante de floculación.

El mismo comportamiento se prevé para la Muestra III, puesto que se requiere de mayores gradientes para flocular este tipo de agua, haciendo difícil la aglomeración de partículas, como efecto resultante de la baja alcalinidad.

PARAMETROS DE SEDIMENTACION

Si nos referimos en términos de eficiencia remocional, el almidón de papa presentó mejores resultados en la Muestra II: si quisiéramos remover un 87.5% de partículas coloidales, lo haríamos en un tiempo menor que cuando el sulfato de aluminio actúa solo, significando una reducción del 33% en el tiempo de sedimentación.

Con respecto a las muestras I y III no se perciben efectos positivos en este proceso, pero en relación a las Muestras II y IV la tasa de sedimentación se incrementa en un 66%, lo cual significa poder diseñar unidades de menor tamaño para conseguir la misma eficiencia que si se dosificara sulfato solo.

La eficiencia de la Muestra IV sería mucho más representativa aplicando cal para compensar la baja alcalinidad.

Para las otras muestras la eficiencia remocional lograda es casi insignificante, ocurriendo en algunos casos una remoción mayor cuando se emplea sólo sulfato de aluminio.

CONCLUSION

El almidón es más eficiente con aguas claras, se consigna en este caso 20% de reducción de sulfato como mínimo, e incrementos del 66% en la tasa de sedimentación.

Asimismo, queda probada la efectividad del almidón de papa en aguas que contengan valores altos de alcalinidad, como lo demuestran los resultados obtenidos con la Muestra II, estudiada en el presente Capítulo.

CUADRO 7.1: RESUMEN DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE FLOCULACION DE LAS MUESTRAS DE AGUA ARTIFICIAL ESTUDIADAS

PARAMETRO	UNIDAD	MUESTRA I To = 420 UNT, Ao = 80 ppá		MUESTRA II To = 15 UNT, Ao = 80 ppá		MUESTRA III To = 420 UNT, Ao = 15 ppá		MUESTRA IV To = 15 UNT, Ao = 15 ppá	
		SO4	SO4 + ALM	SO4	SO4 + ALM	SO4	SO4 + ALM	SO4	SO4 + ALM
Dosis de SO4	mg/l	35.00	31.50	22.50	18.00	20.00	18.00	15.00	16.00
Dosis de ALMIDON	mg/l	---	0.20	---	0.50	---	0.50	---	1.00
S	seg-1	62	63	60	61	109	---	88	119
(To/Tf) máx.	---	93.00	82.00	6.80	6.50	130.00	---	8.80	9.80
KA	---	1.75x10E-04	1.26x10E-04	8.74x10E-05	8.45x10E-05	1.06x10E-04	---	6.56x10E-05	3.77x10E-05
KB	seg.	3.04x10E-08	2.44x10E-08	2.14x10E-07	2.13x10E-07	7.51x10E-09	---	8.47x10E-08	3.24x10E-08
KC	seg.	1.73x10E-04	1.93x10E-04	2.45x10E-03	2.52x10E-03	7.05x10E-05	---	1.29x10E-03	9.57x10E-04

DOSIS OPTIMA DE COAGULANTE MUESTRA I

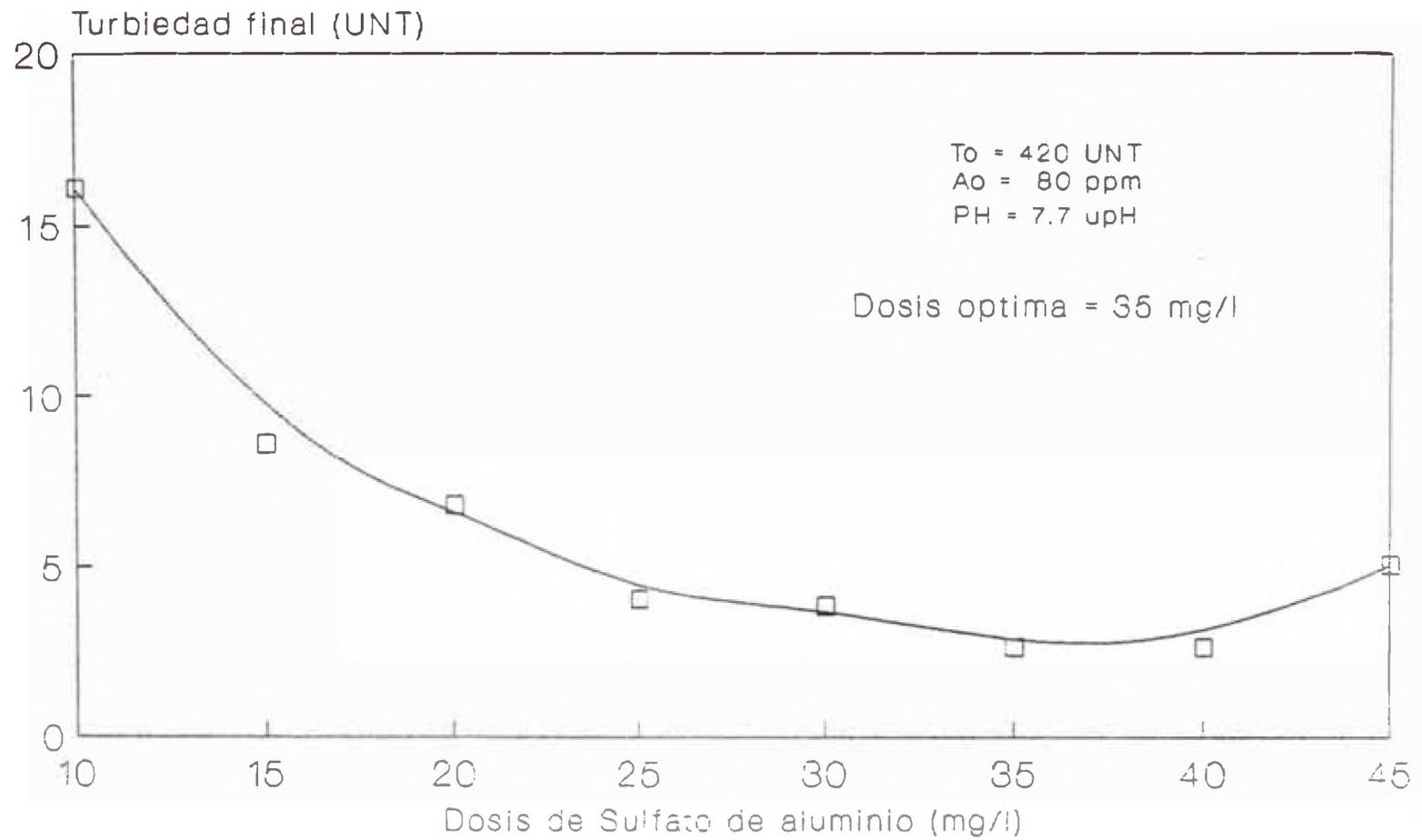


Figura 91.1

CONCENTRACION OPTIMA DE COAGULANTE MUESTRA I

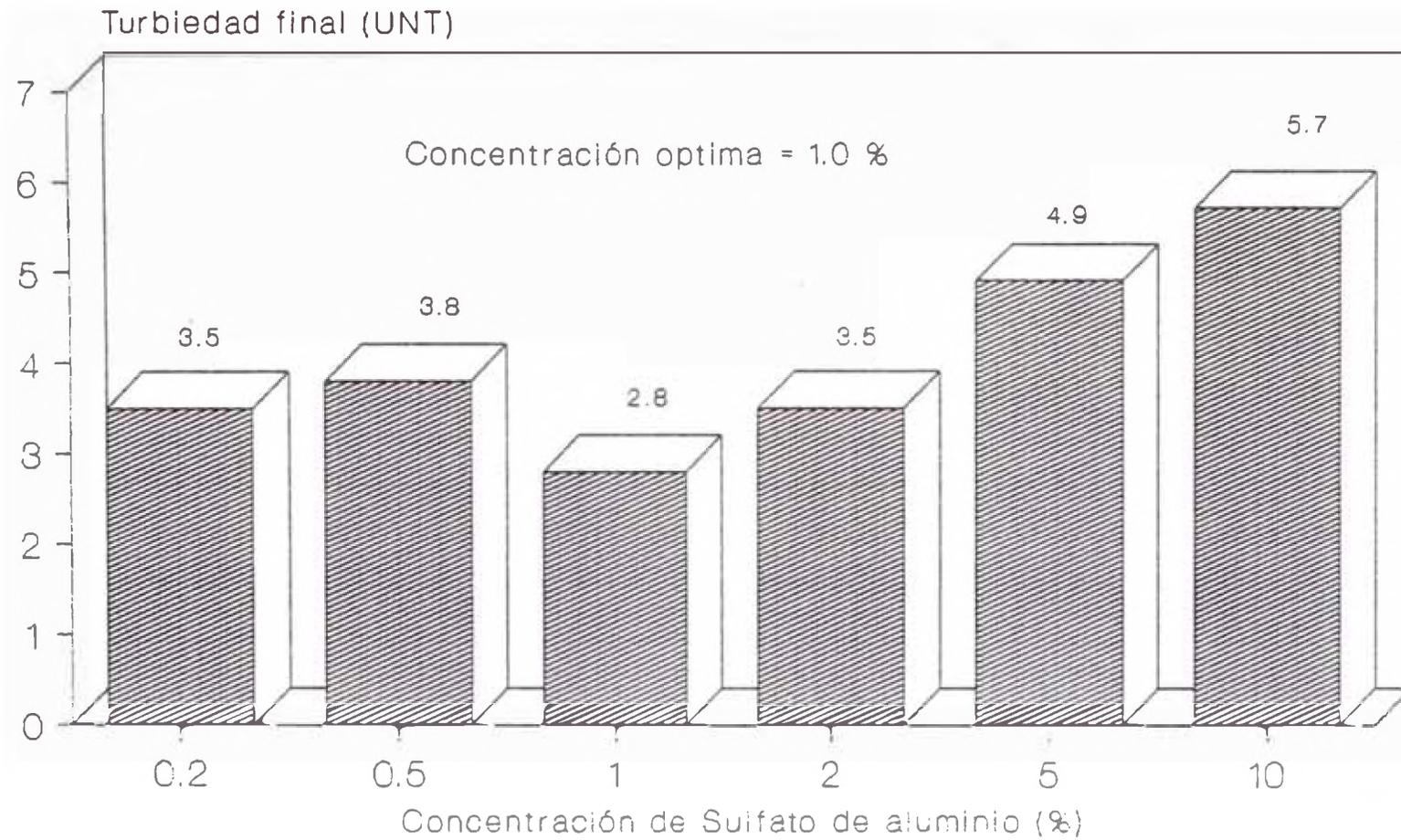


Figura 9.1.2

PH OPTIMO DE SULFATO DE ALUMINIO MUESTRA I

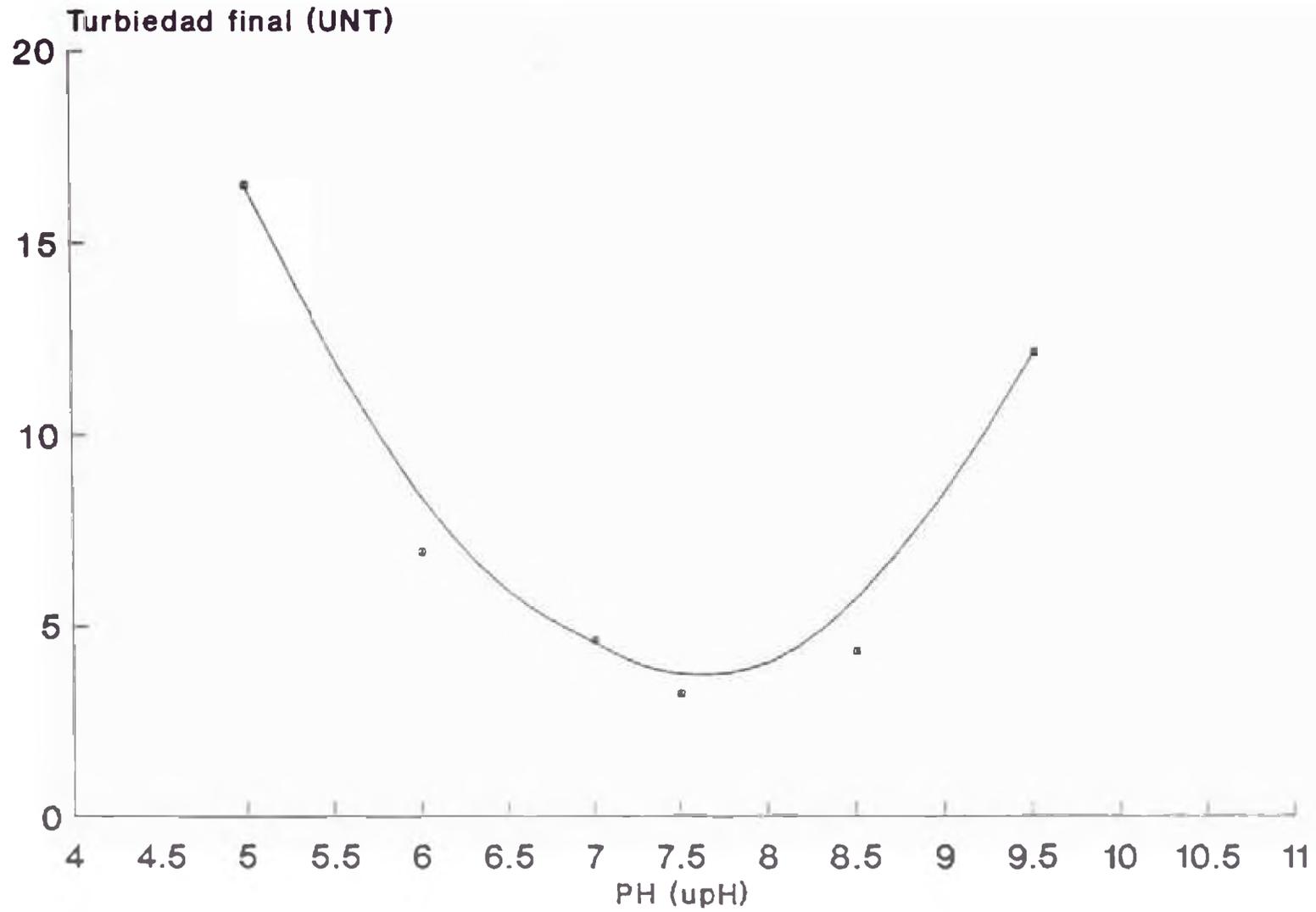


Figura 9.1.3

TIEMPOS OPTIMOS DE FLOCULACION

MUESTRA I (SO4)

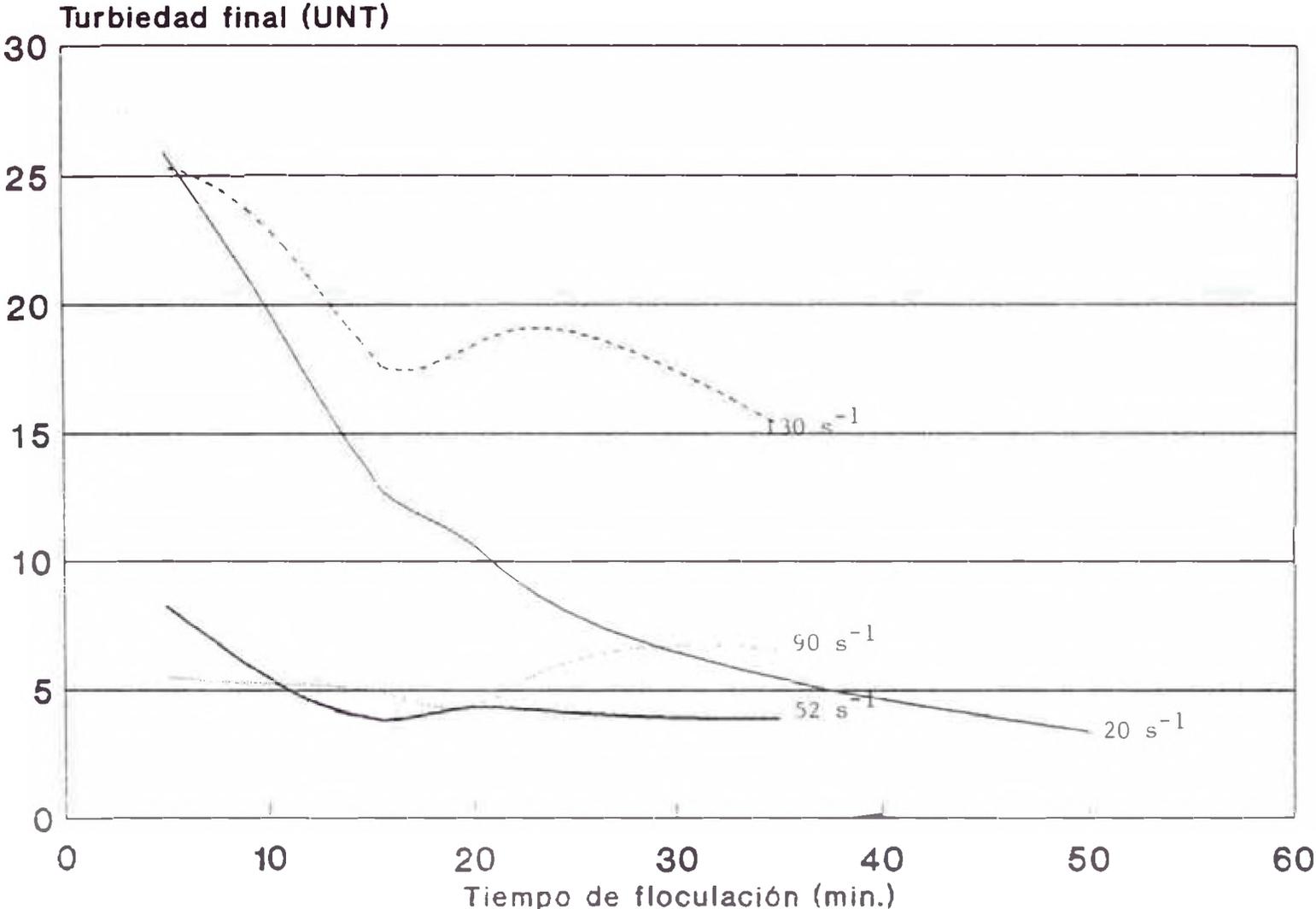


Figura 9.1.4

CURVA DE EFICIENCIA DE FLOCULACION EN FUNCION DE LA GRADIENTE (SO4)

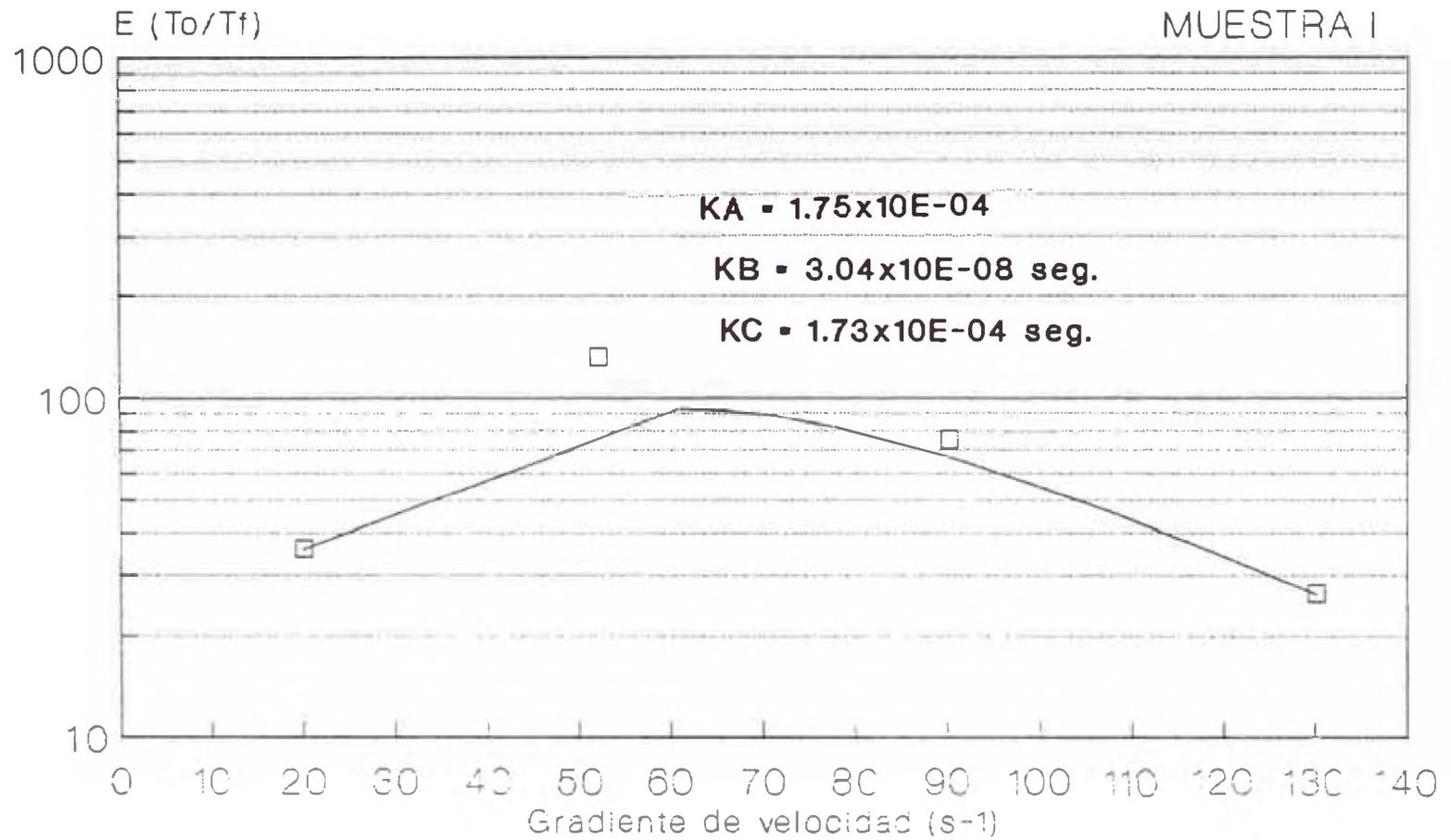


Figura 9.1.5

GRADIENTES OPTIMOS DE FLOCULACION

MUESTRA I (SO4)

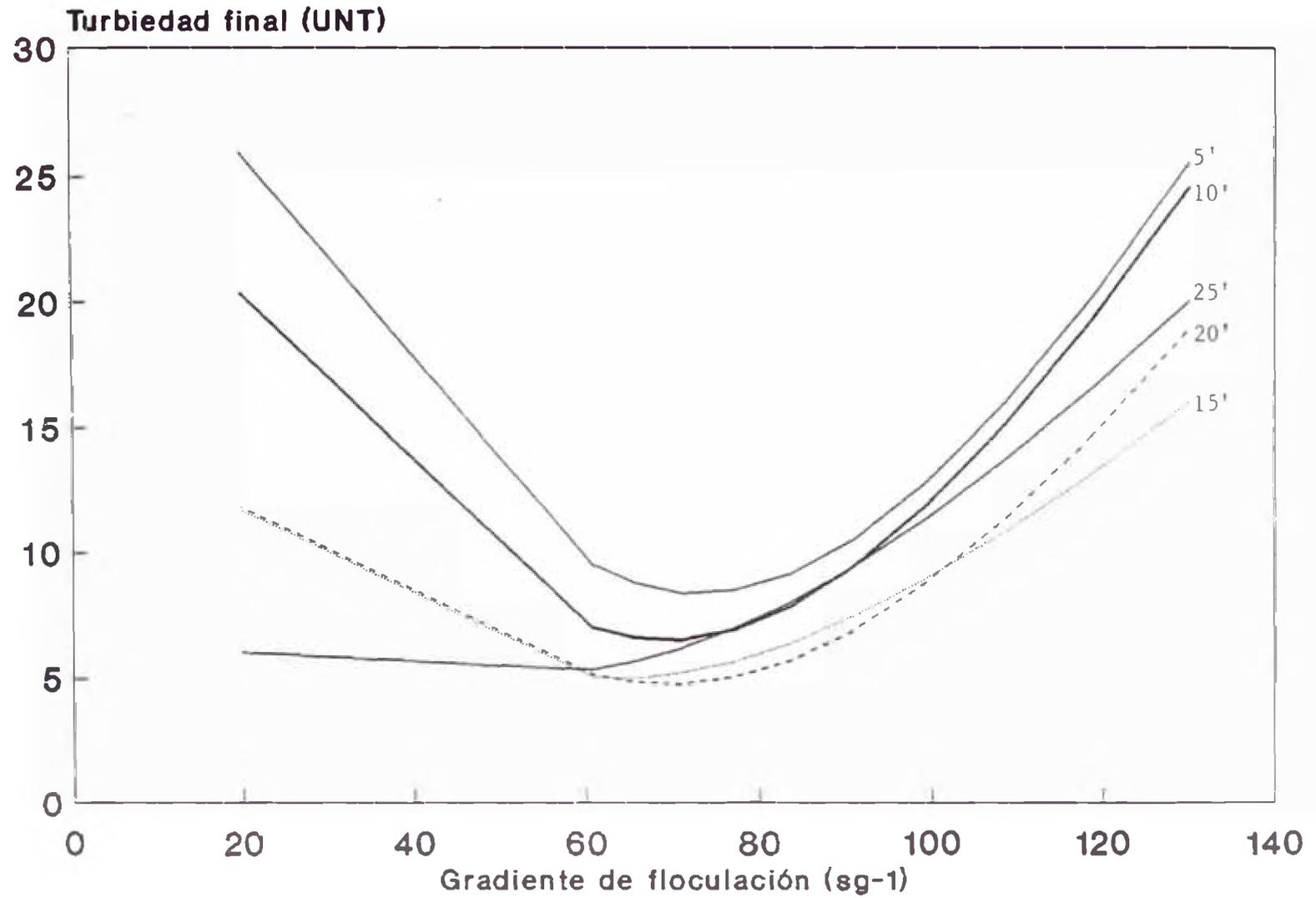


Figura 9.1.6

DOSIS OPTIMA DE ALMIDON MUESTRA I

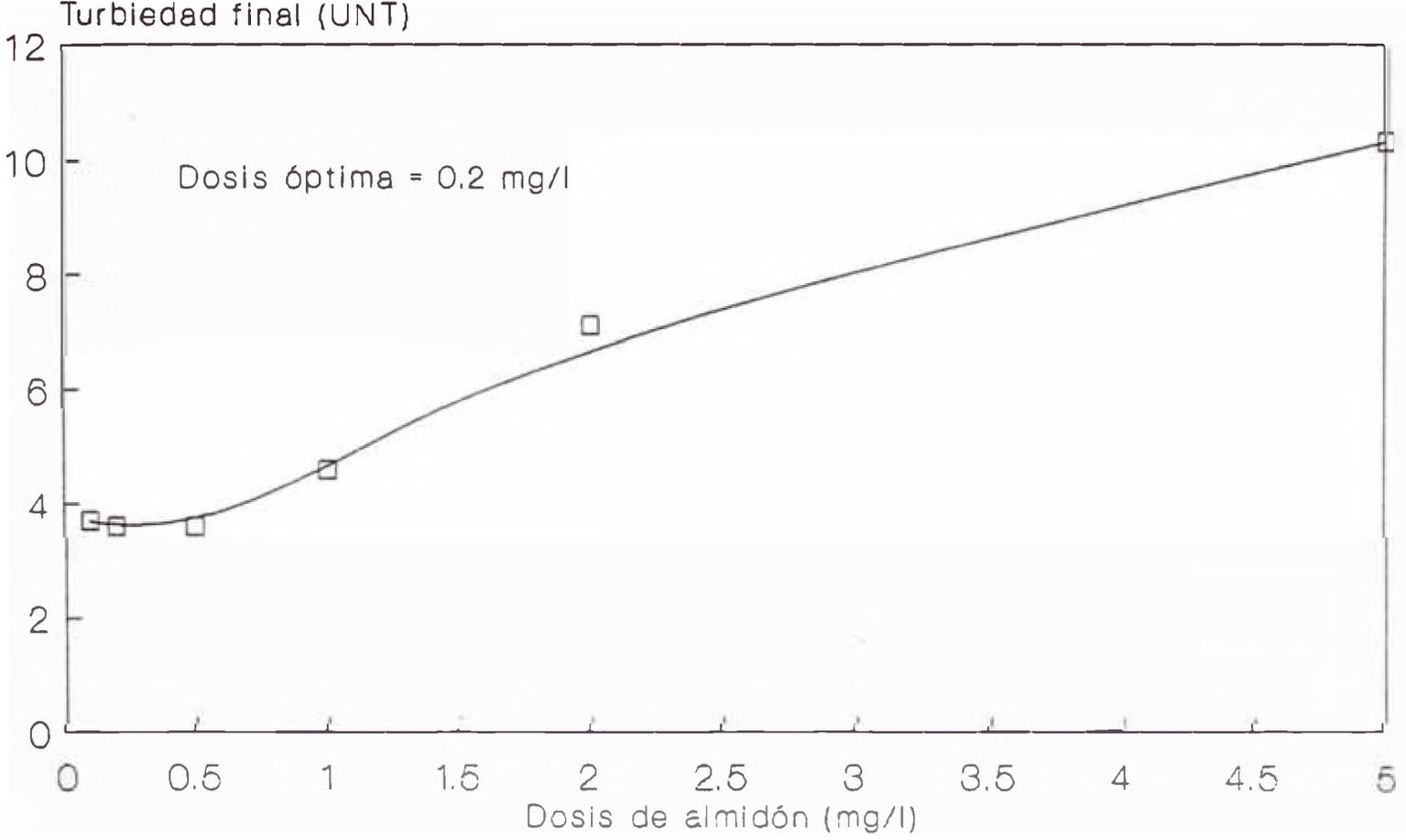


Figura 9.1.7

REDUCCION DE DOSIS DE SULFATO DE ALUMIN. MUESTRA I

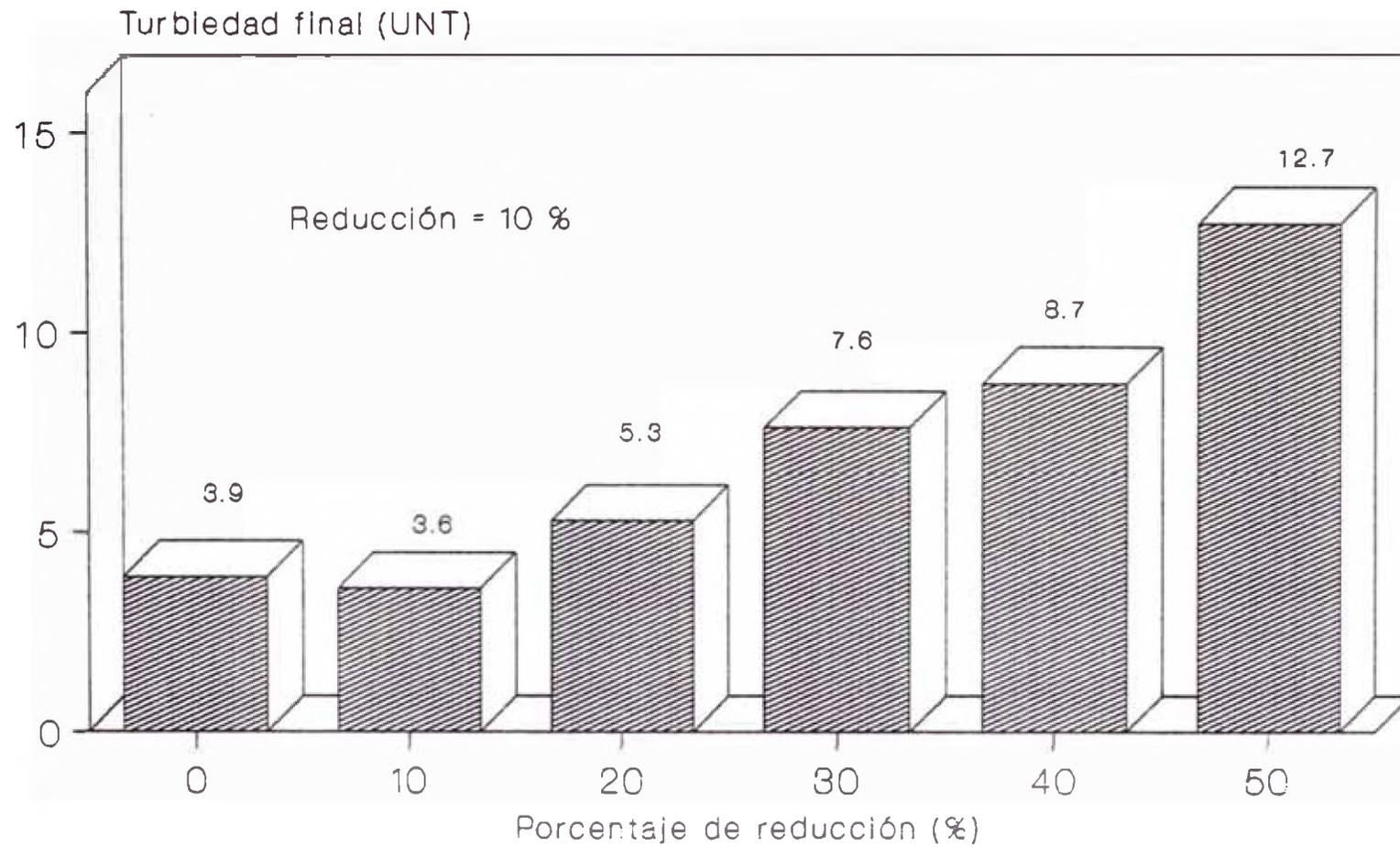


Figura 9.1.8

TIEMPOS OPTIMOS DE FLOCULACION

MUESTRA I (RED. SO4 + ALM)

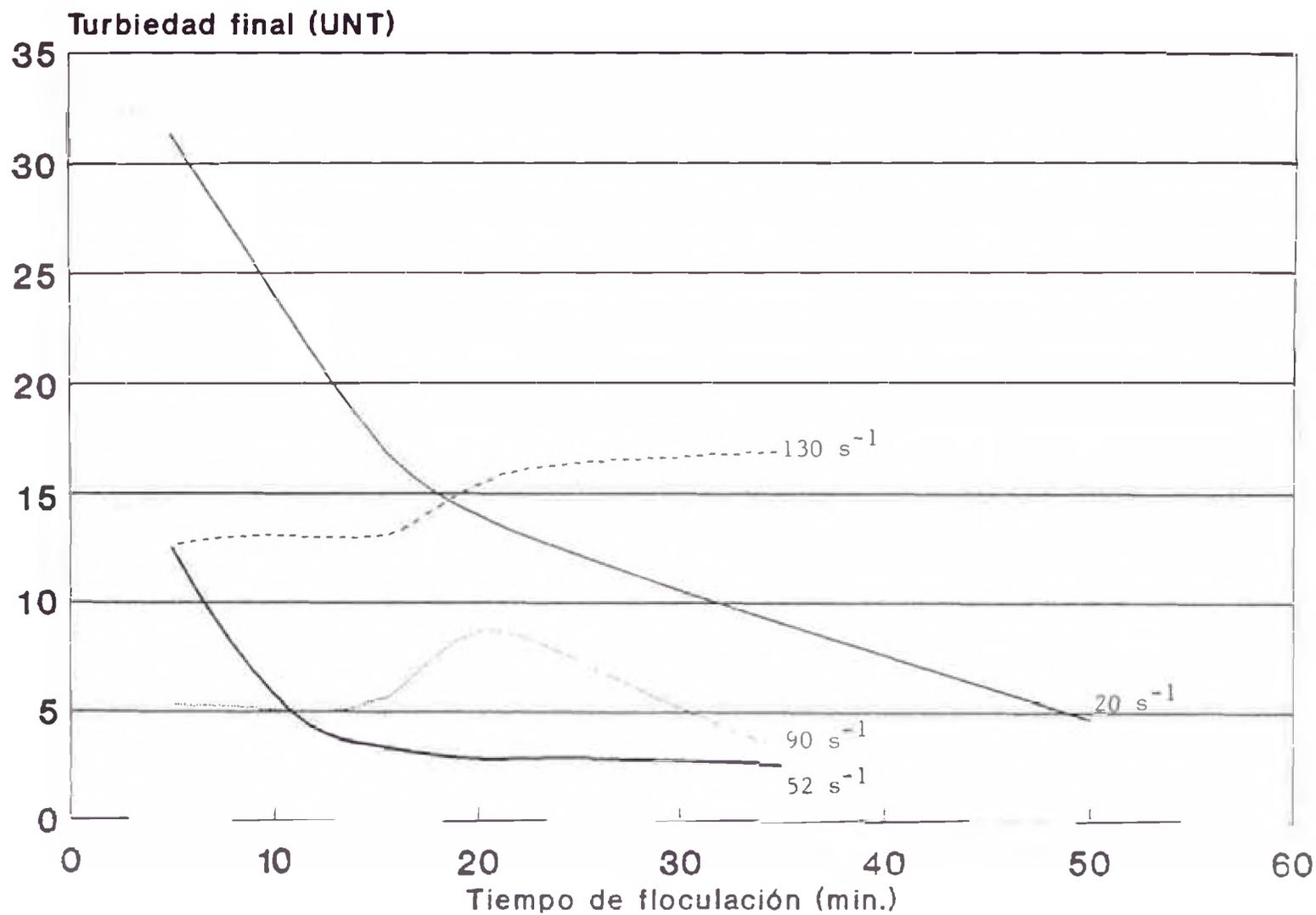


Figura 9.1.9

CURVA DE EFICIENCIA DE FLOCULACION EN FUNCION DE LA GRADIENTE (SO4 + ALM)

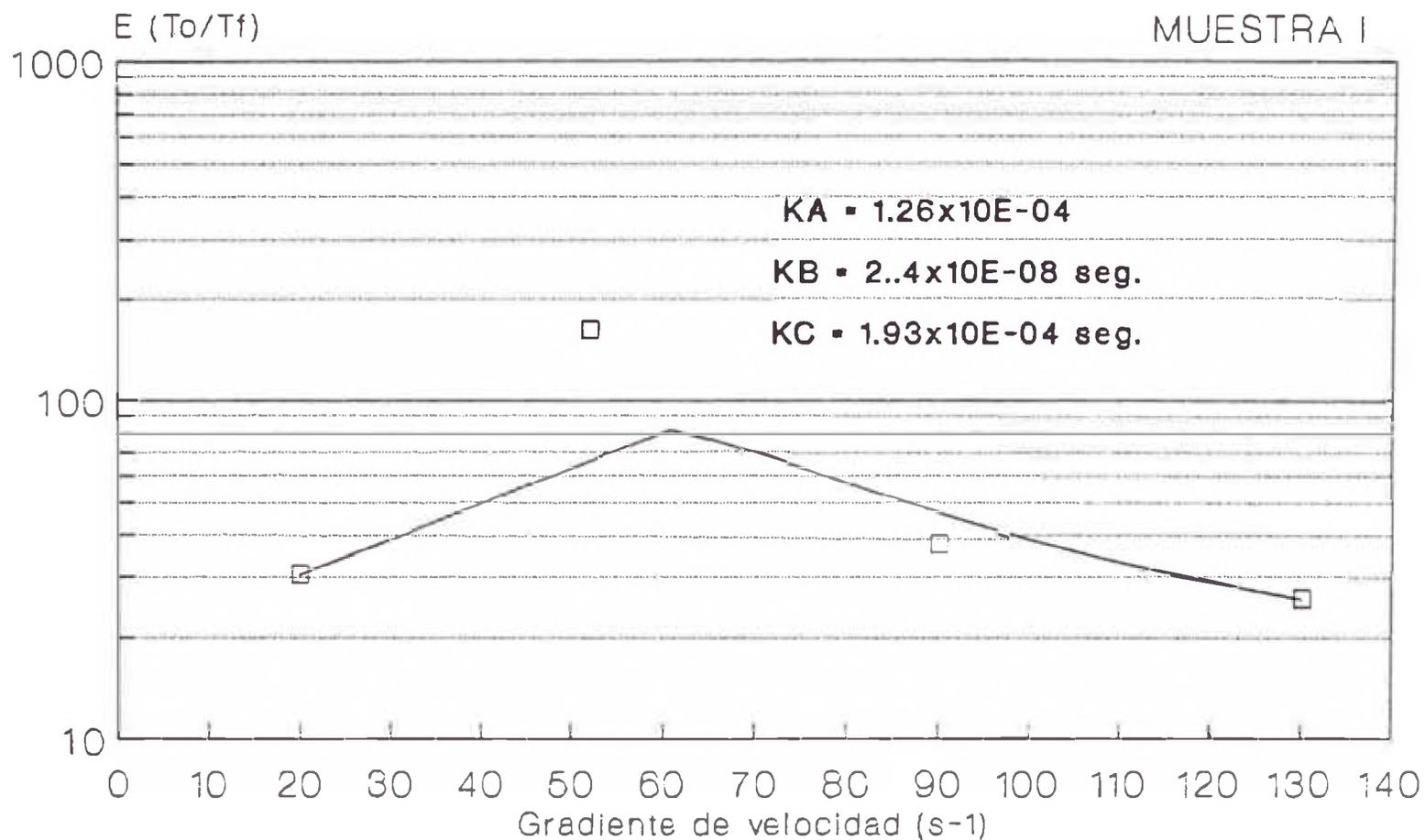


Figura 9.1.10

GRADIENTES OPTIMOS DE FLOCULACION

MUESTRA I (RED. SO4 + ALM)

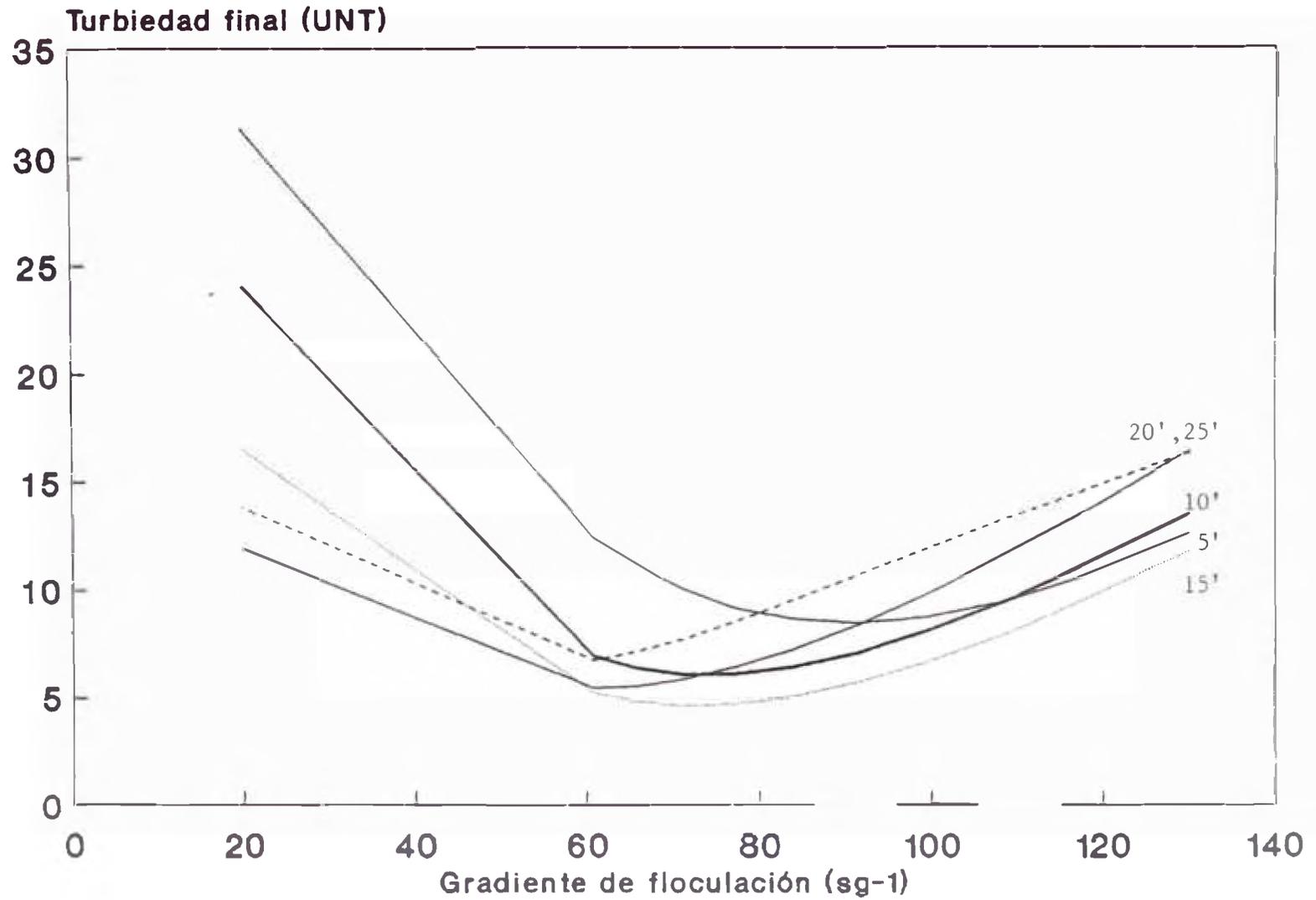


Figura 9.I.11

CORRELACION DE GRADIENTES Y TIEMPOS OPTIMOS DE FLOCULACION

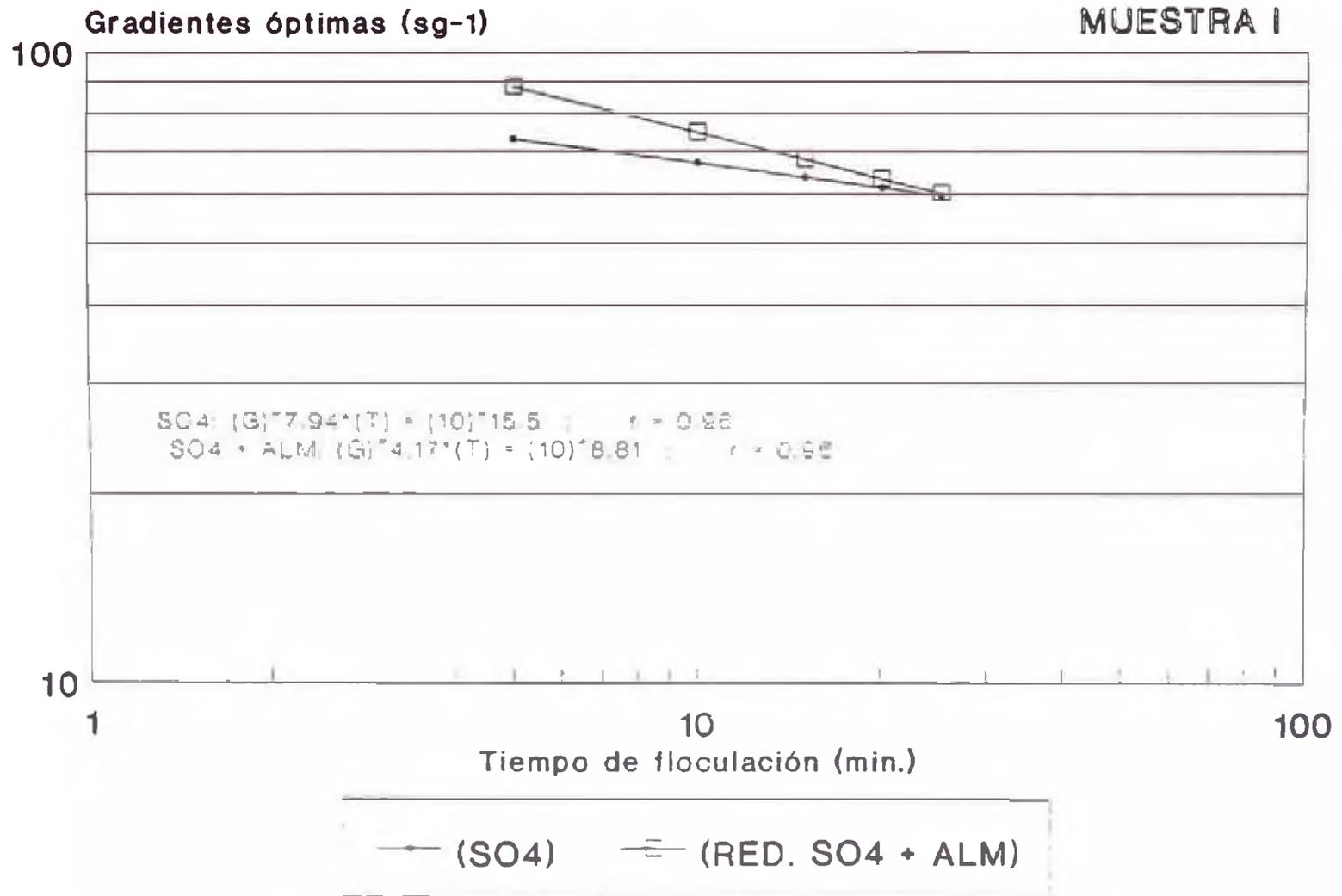


Figura 9.I.12

EFICIENCIA DE SEDIMENTABILIDAD MUESTRA I (SO4)

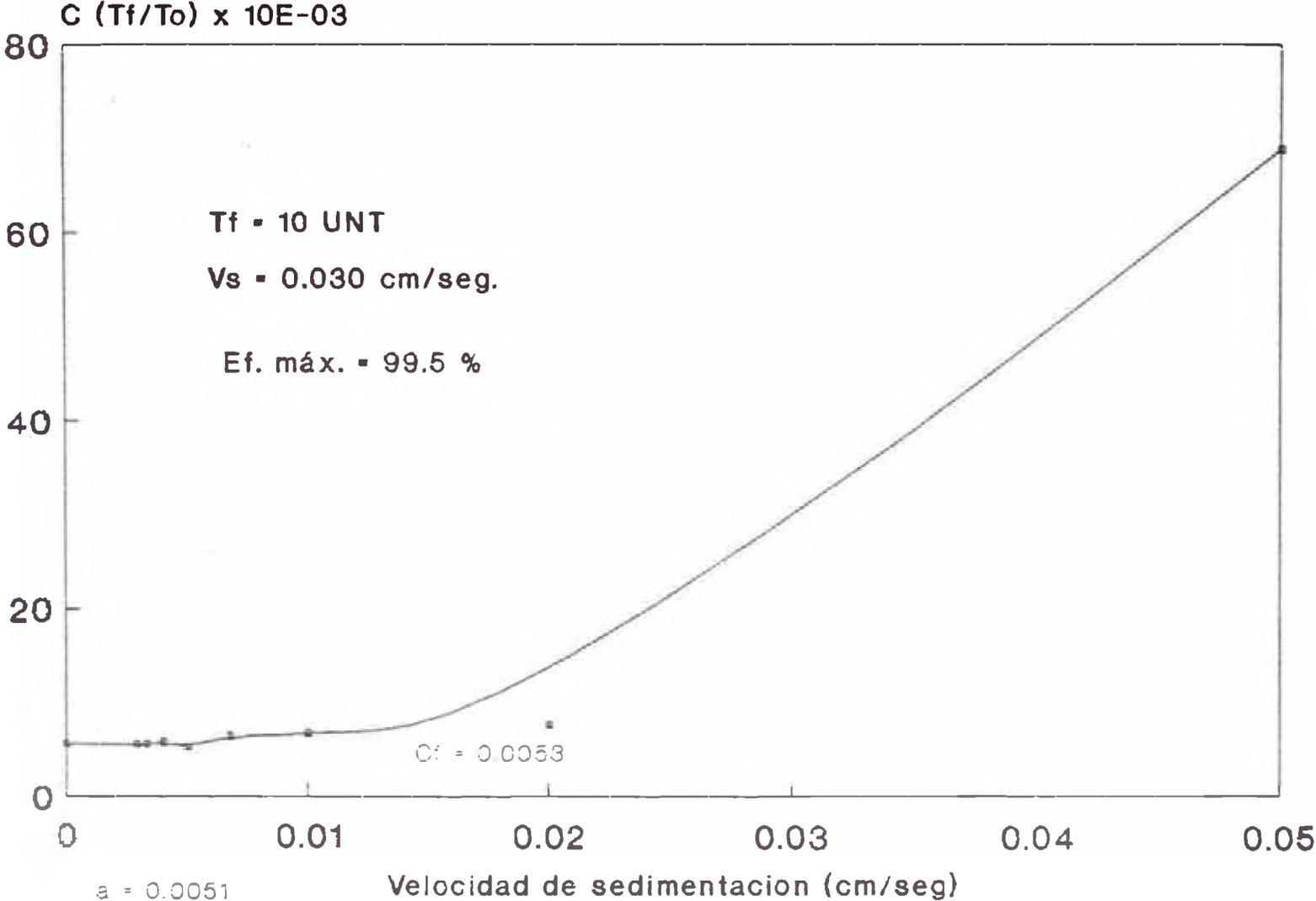


Figura 9.1.13

EFICIENCIA DE SEDIMENTABILIDAD

MUESTRA I (RED. SO4 + ALM)

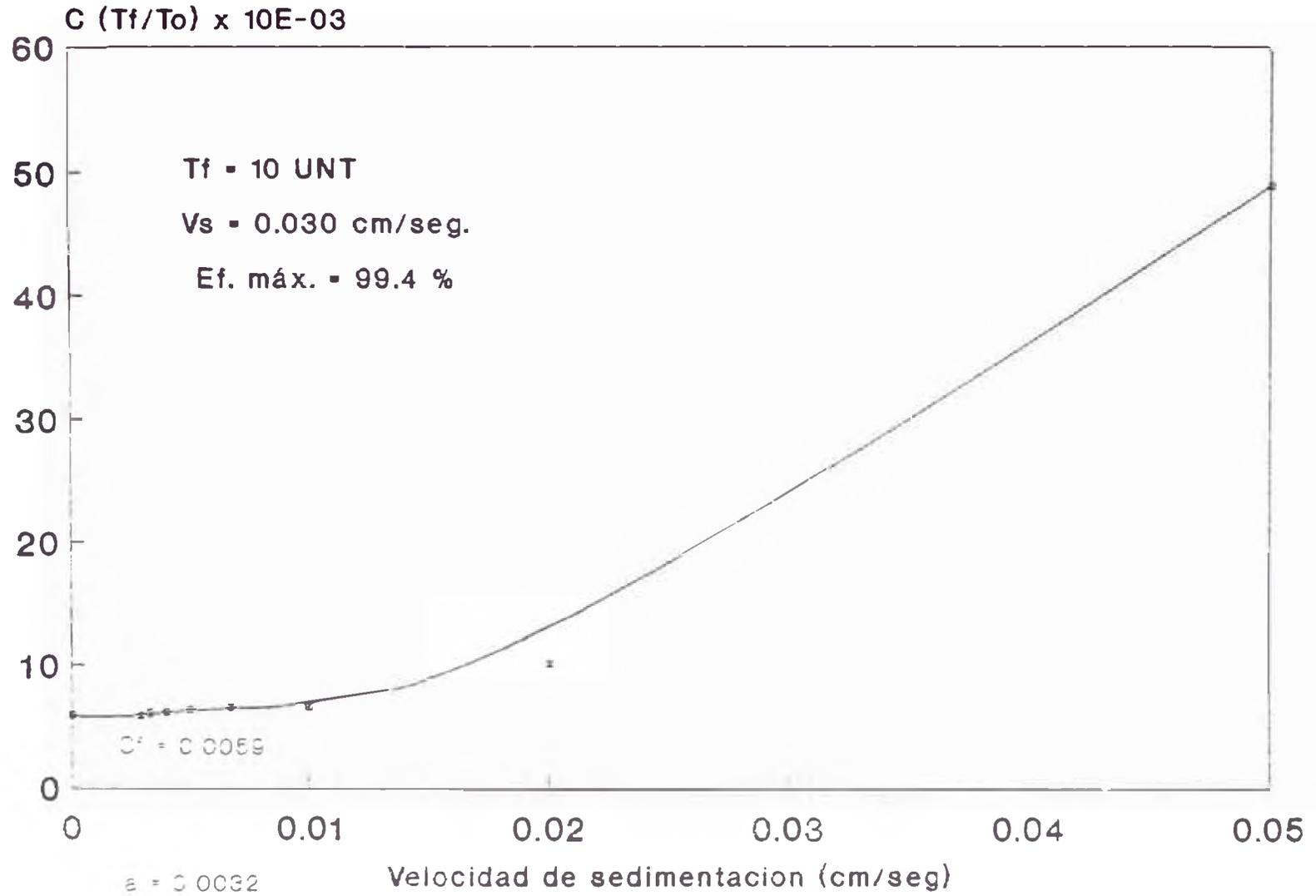


Figura 9.1.14

EFICIENCIA REMOCIONAL MUESTRA I

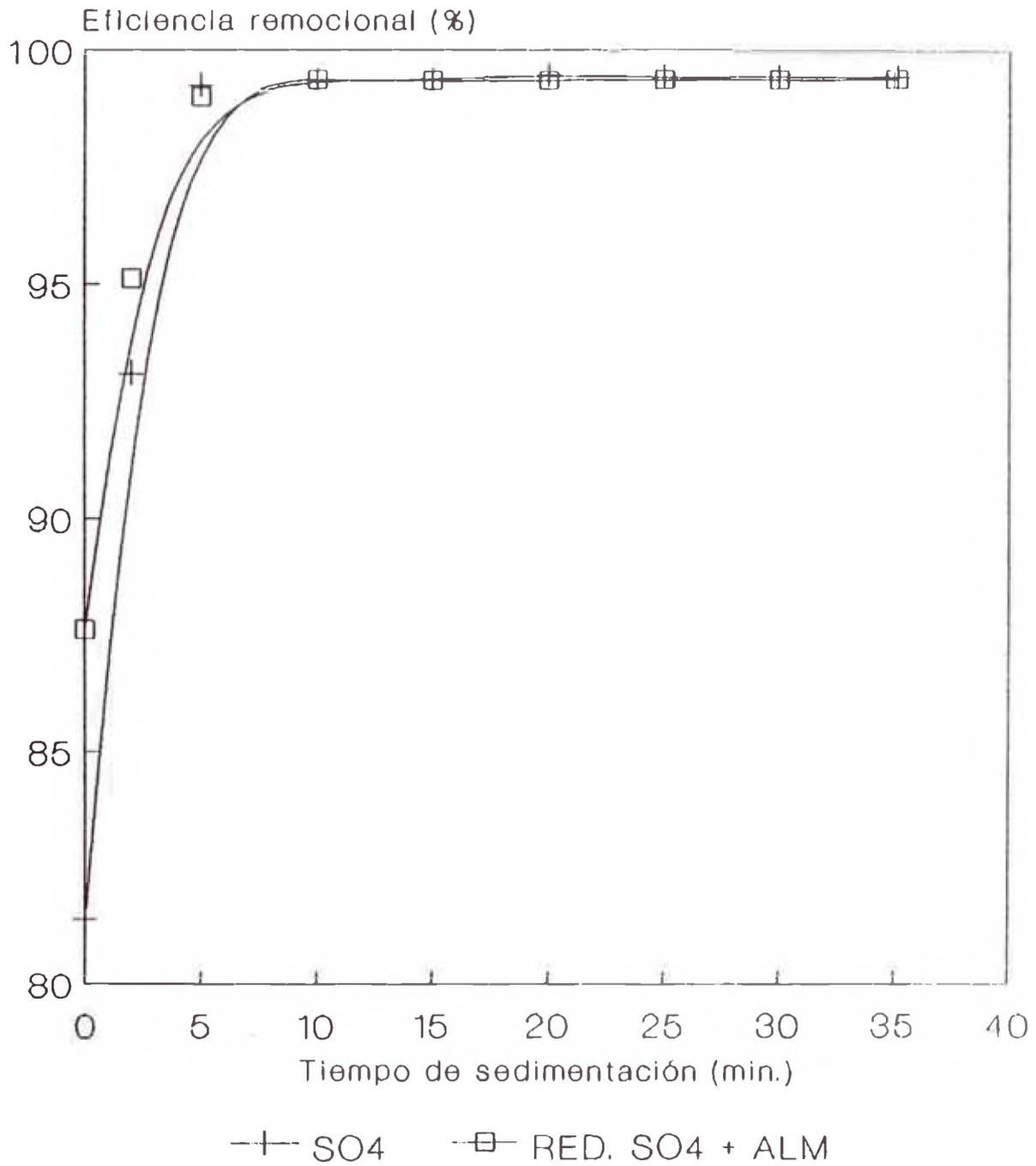


Figura 9.1.15

DOSIS OPTIMA DE COAGULANTE MUESTRA II

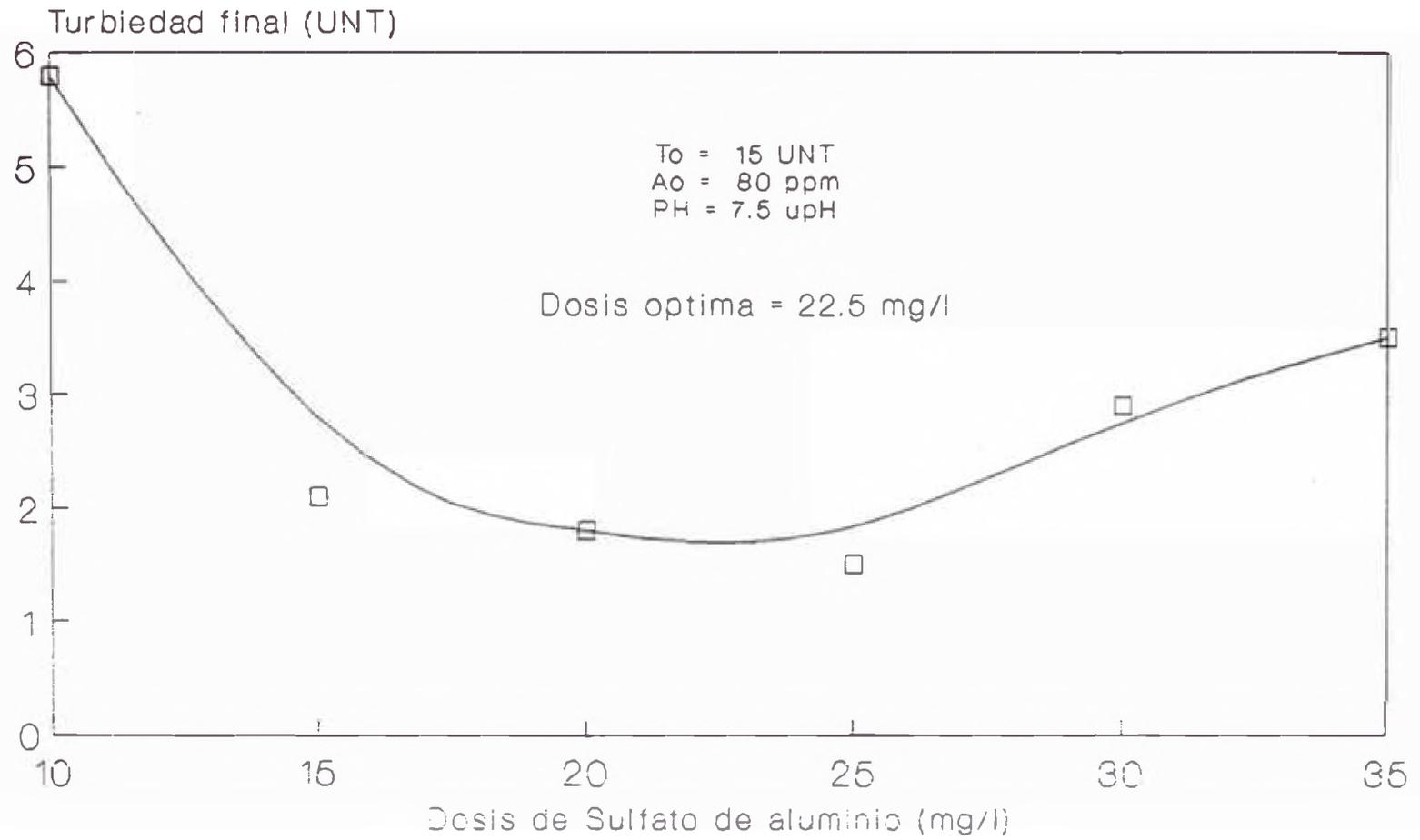


Figura 9.II.1

CONCENTRACION OPTIMA DE SULFATO DE ALUM. MUESTRA II

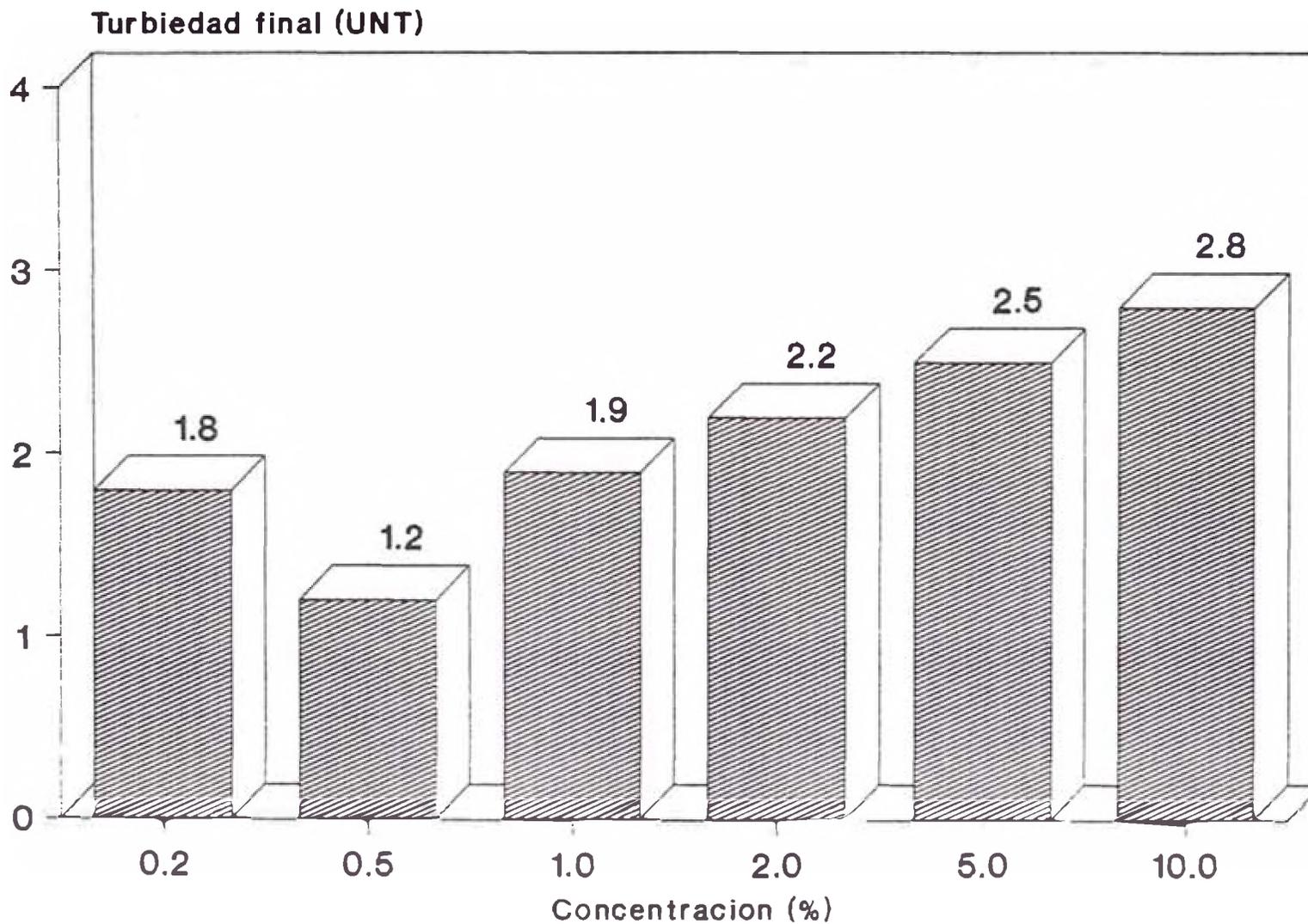
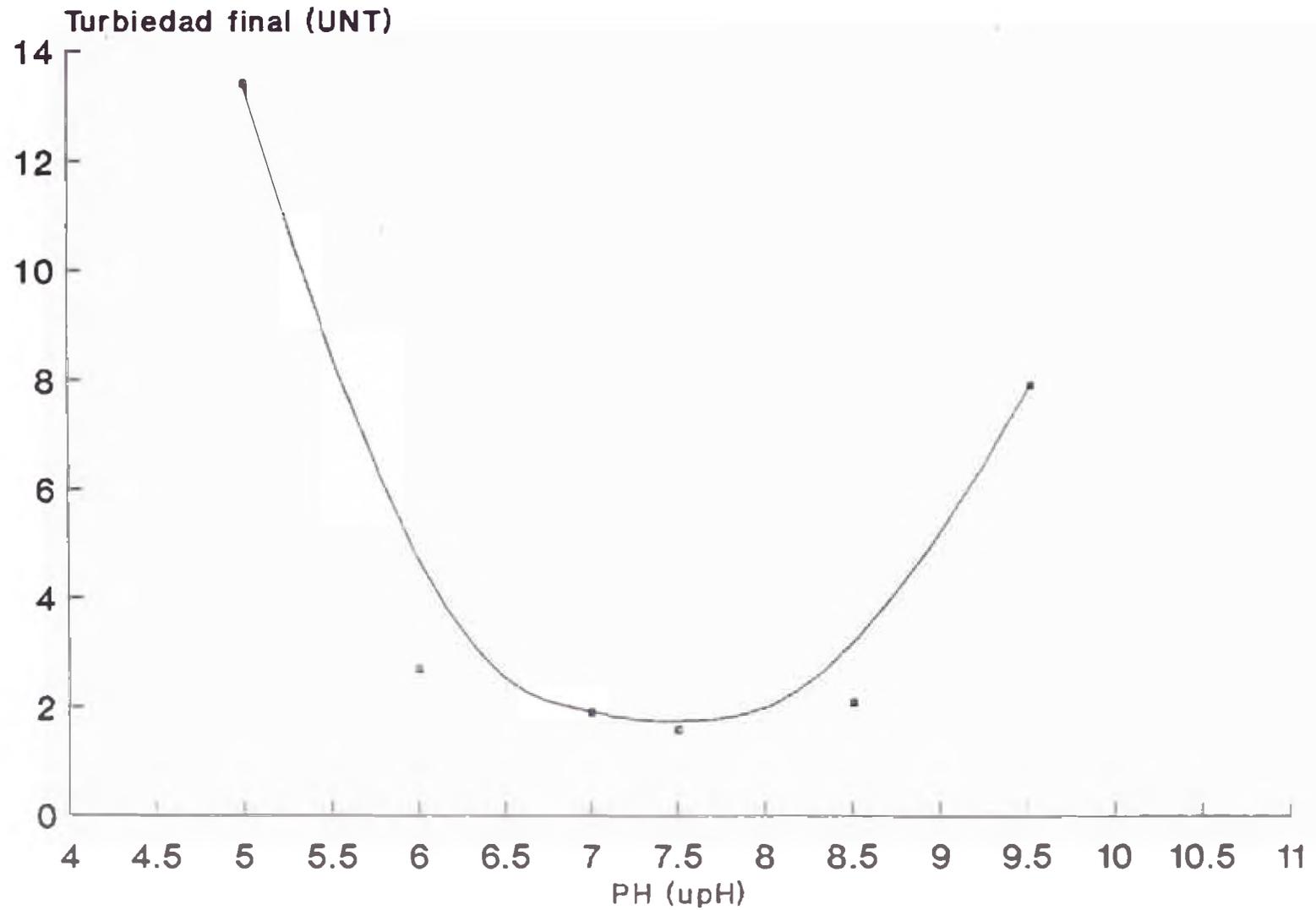


Figura 9.11.2

PH OPTIMO DE SULFATO DE ALUMINIO MUESTRA II



TIEMPOS OPTIMOS DE FLOCULACION

MUESTRA II (SO4)

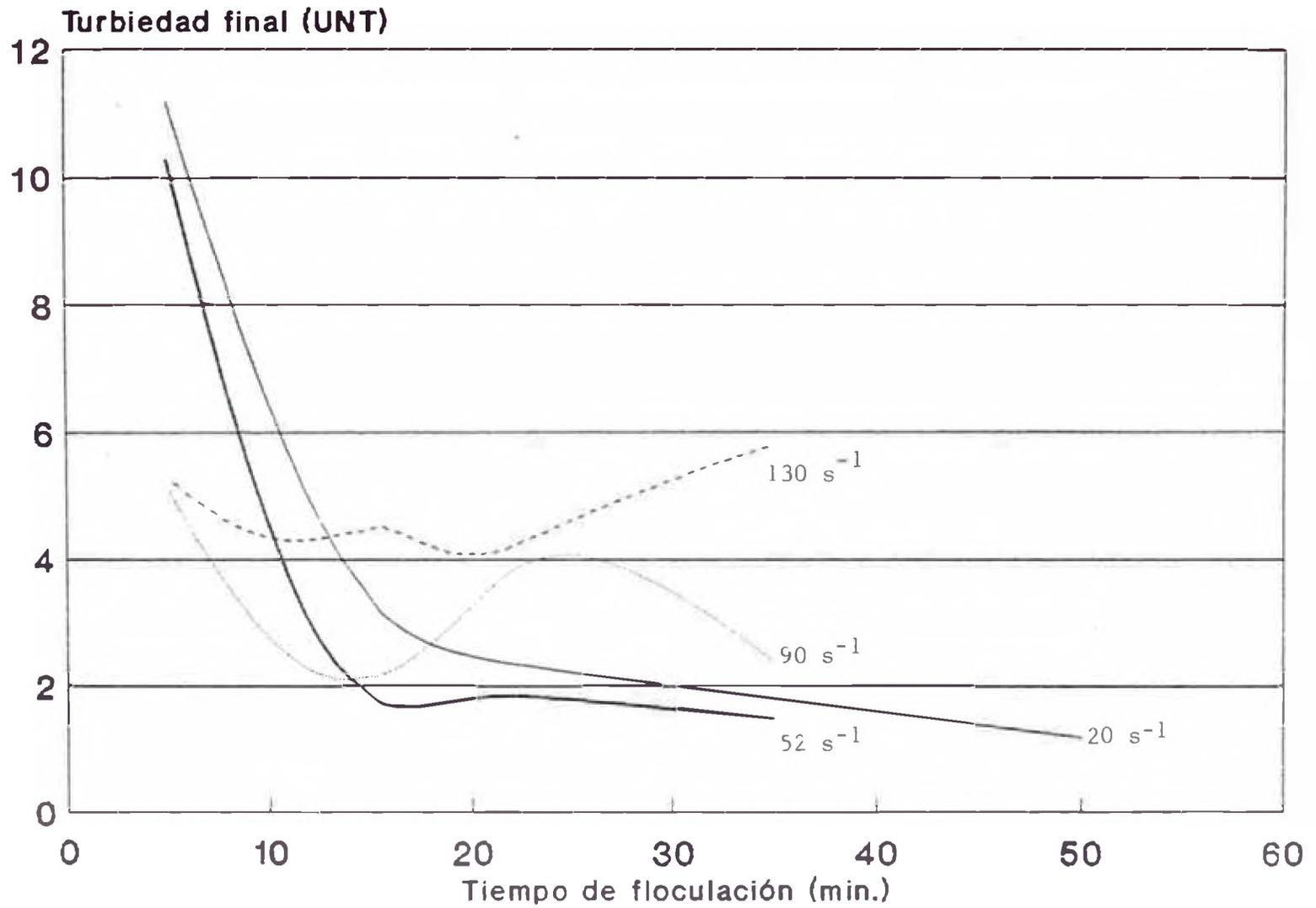


Figura 9.11.4

CURVA DE EFICIENCIA DE FLOCULACION EN FUNCION DE LA GRADIENTE (SO4)

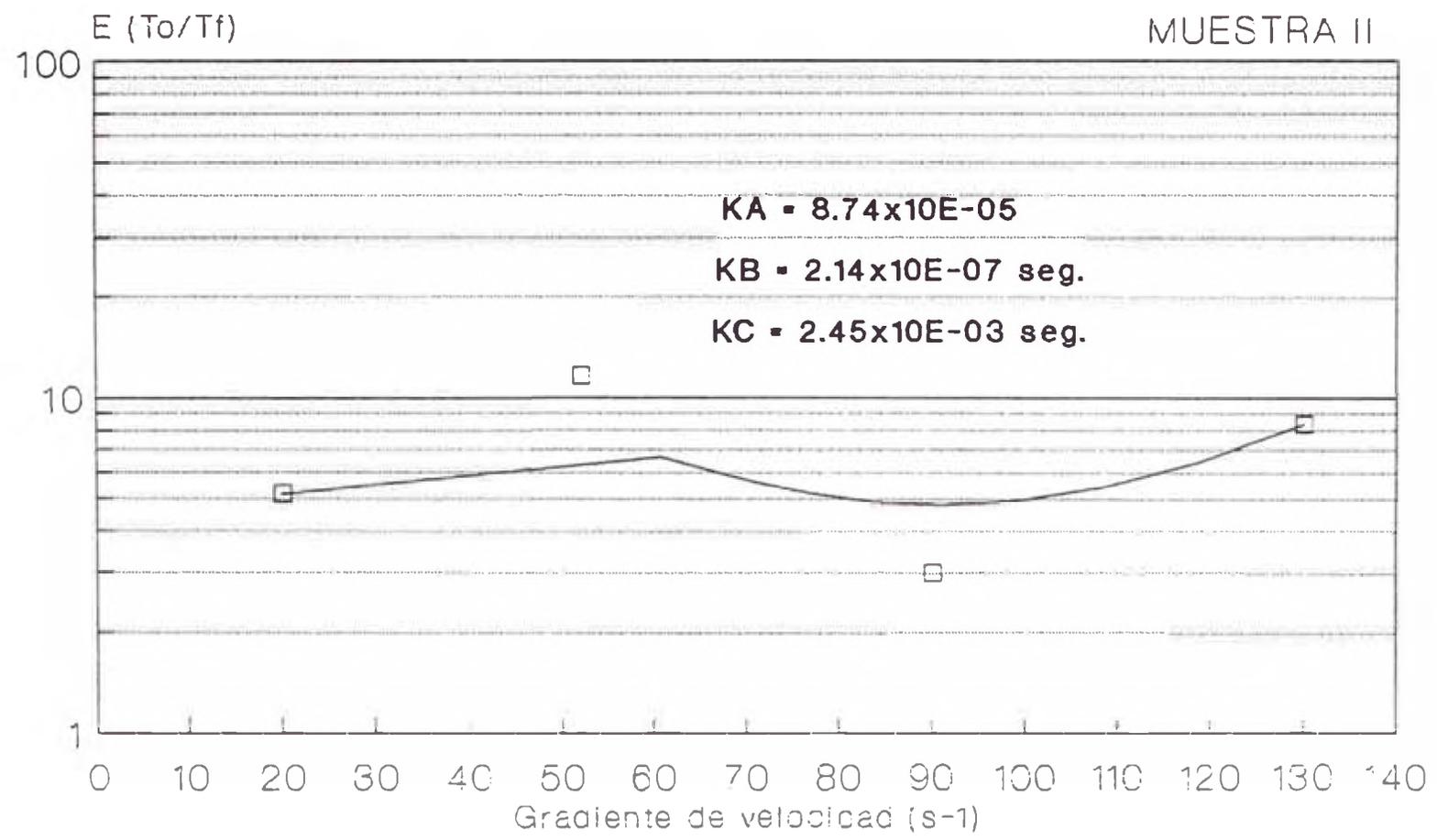


Figura 9.II.5

GRADIENTES OPTIMOS DE FLOCULACION

MUESTRA II (SO4)

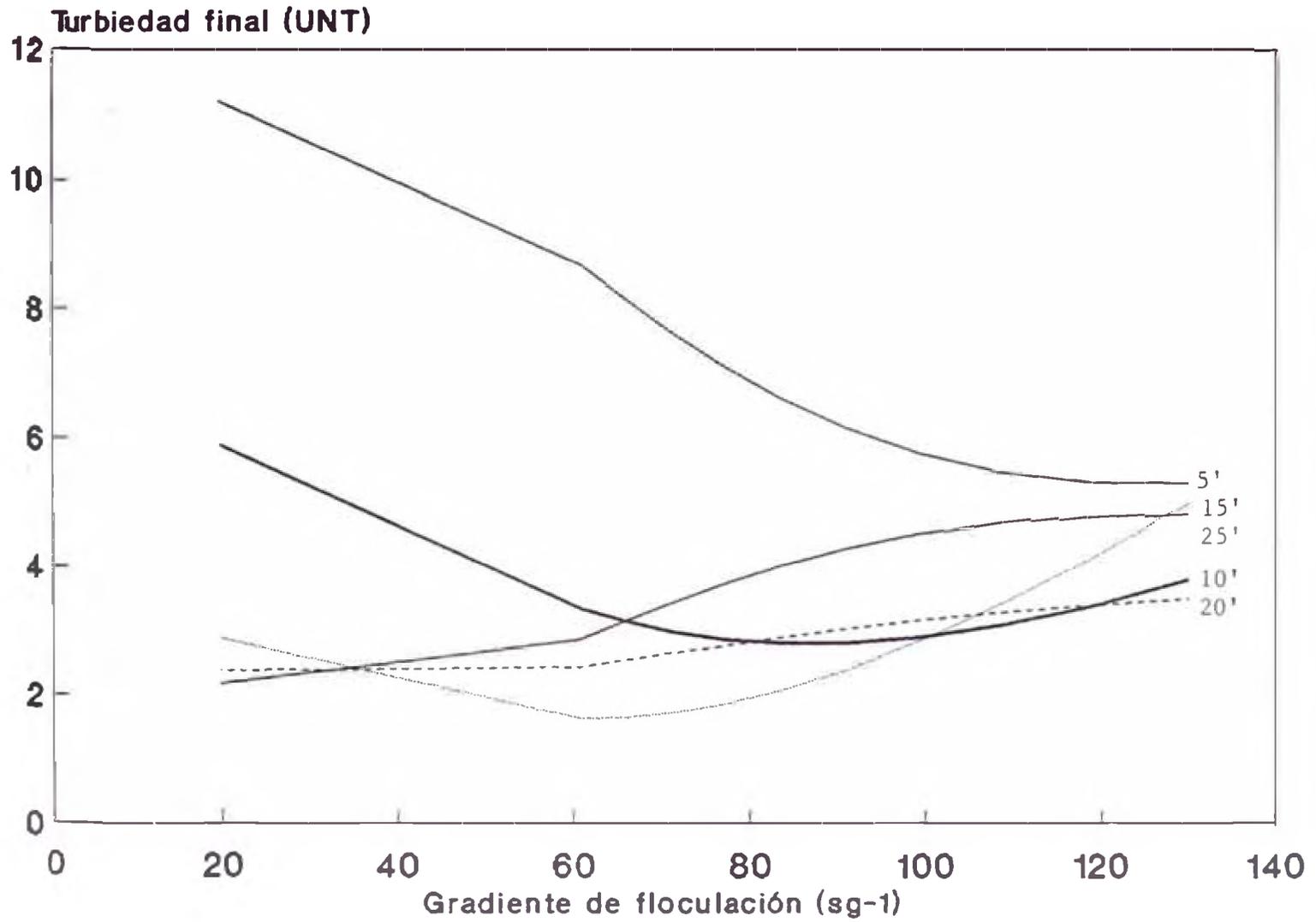


Figura 9.II.6

DOSIS OPTIMA DE ALMIDON MUESTRA II

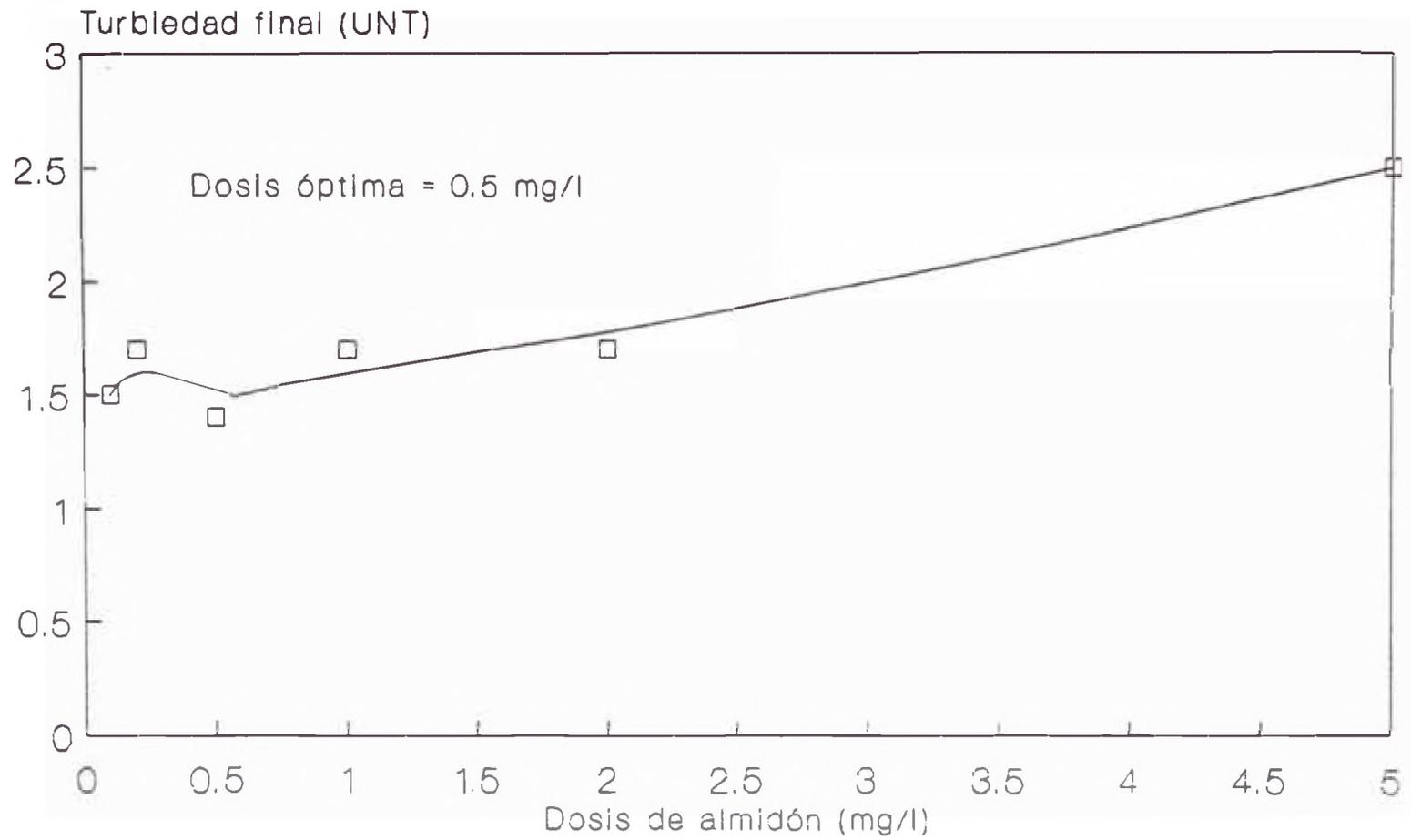


Figura 9.II.7

REDUCCION DE DOSIS DE SULFATO DE ALUMIN. MUESTRA II

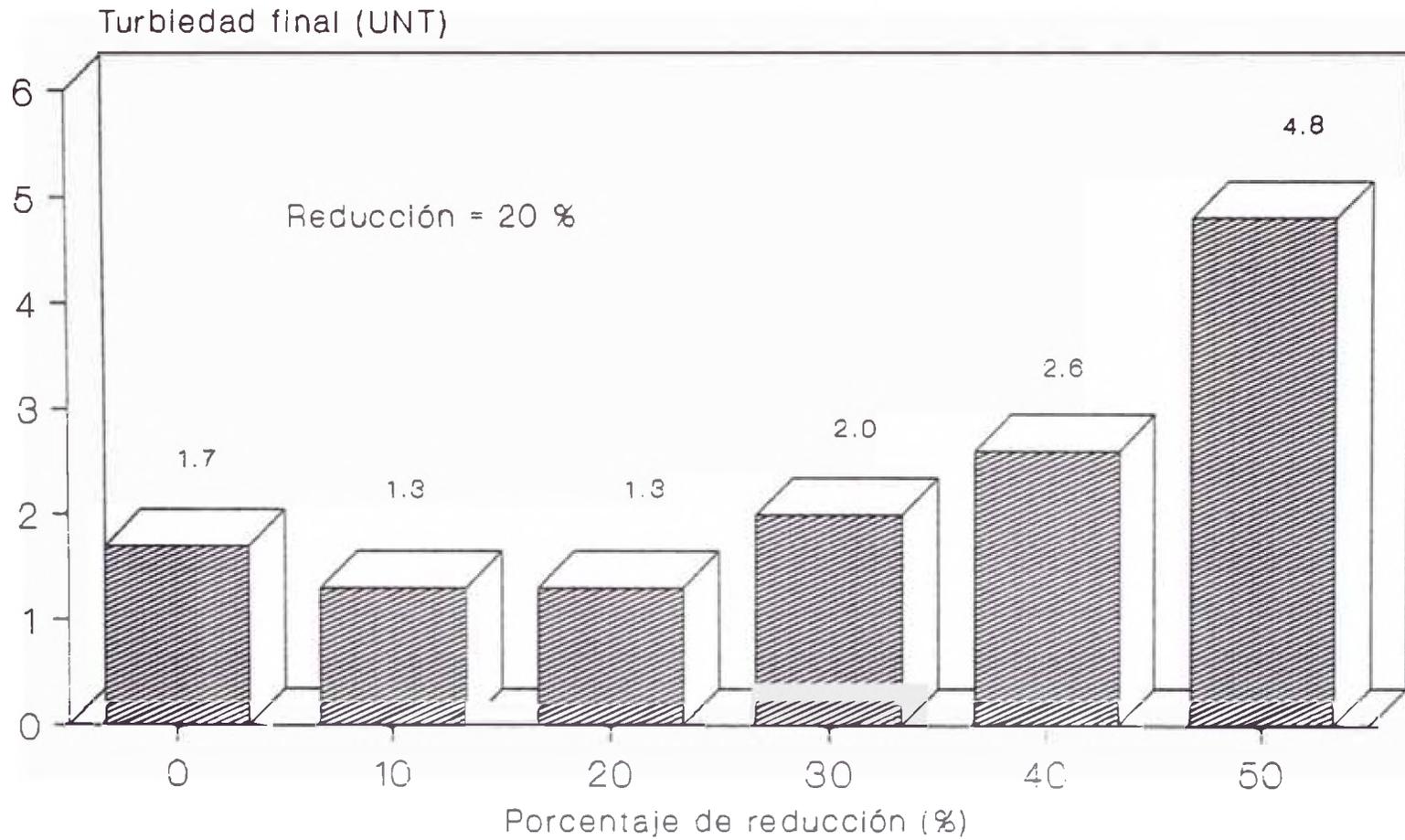


Figura 9.11.8

UL I
MUESTRA II (RED. SO4 + ALM)

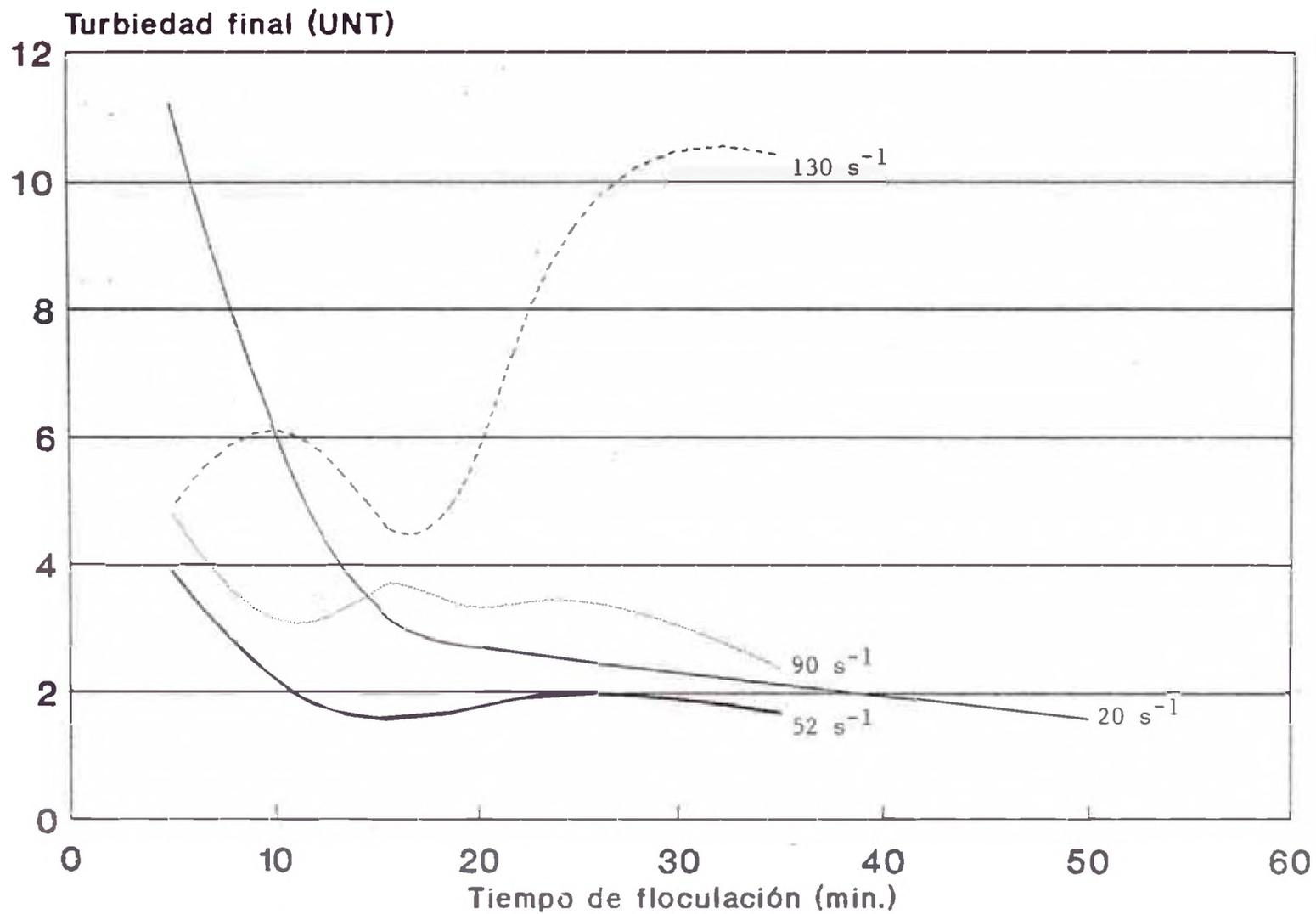


Figura 9.II.9

CURVA DE EFICIENCIA DE FLOCULACION EN FUNCION DE LA GRADIENTE (SO4 + ALM)

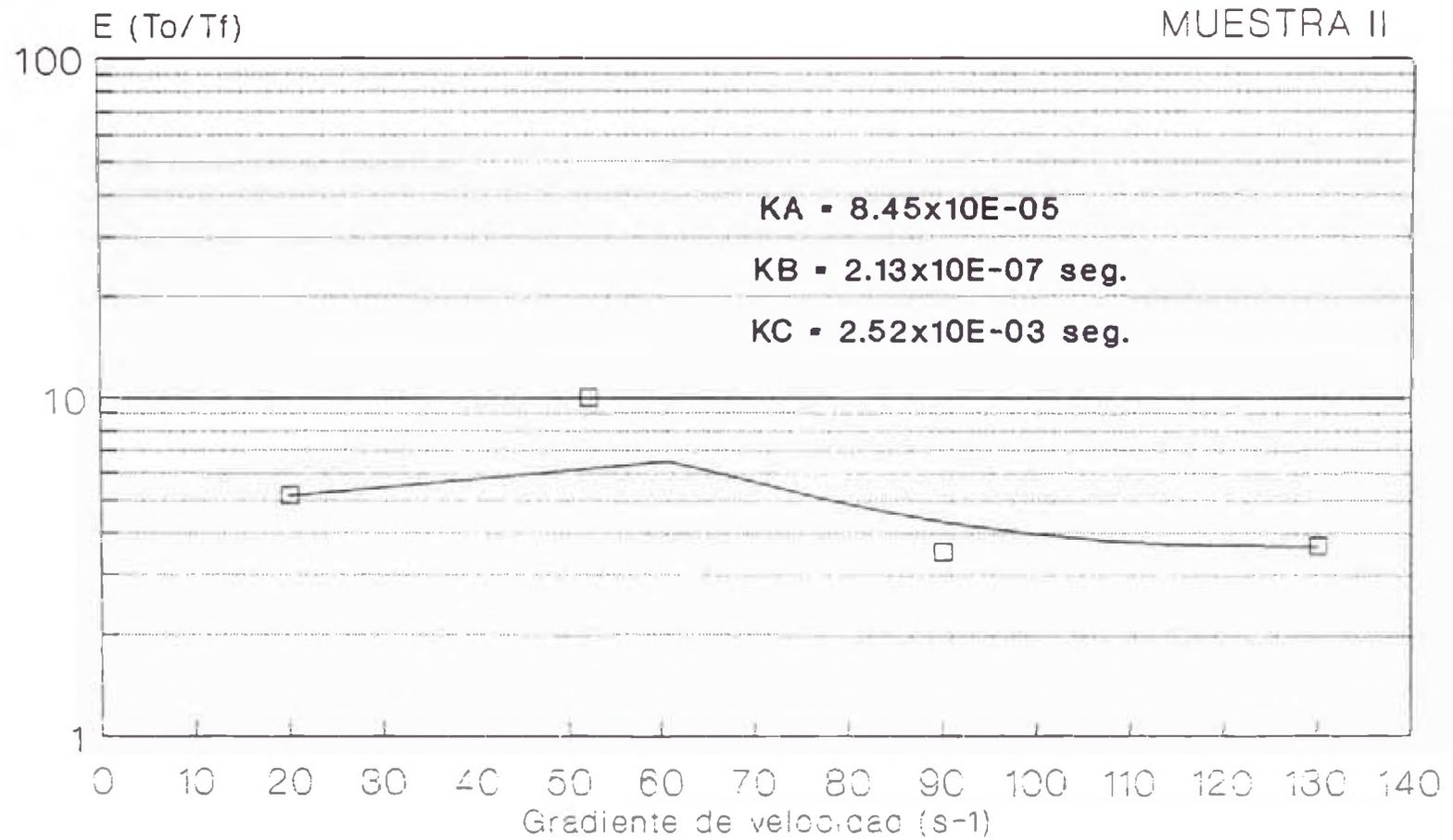


Figura 9.II.10

GRADIENTES OPTIMOS DE FLOCULACION

MUESTRA II (RED. SO4 + ALM)

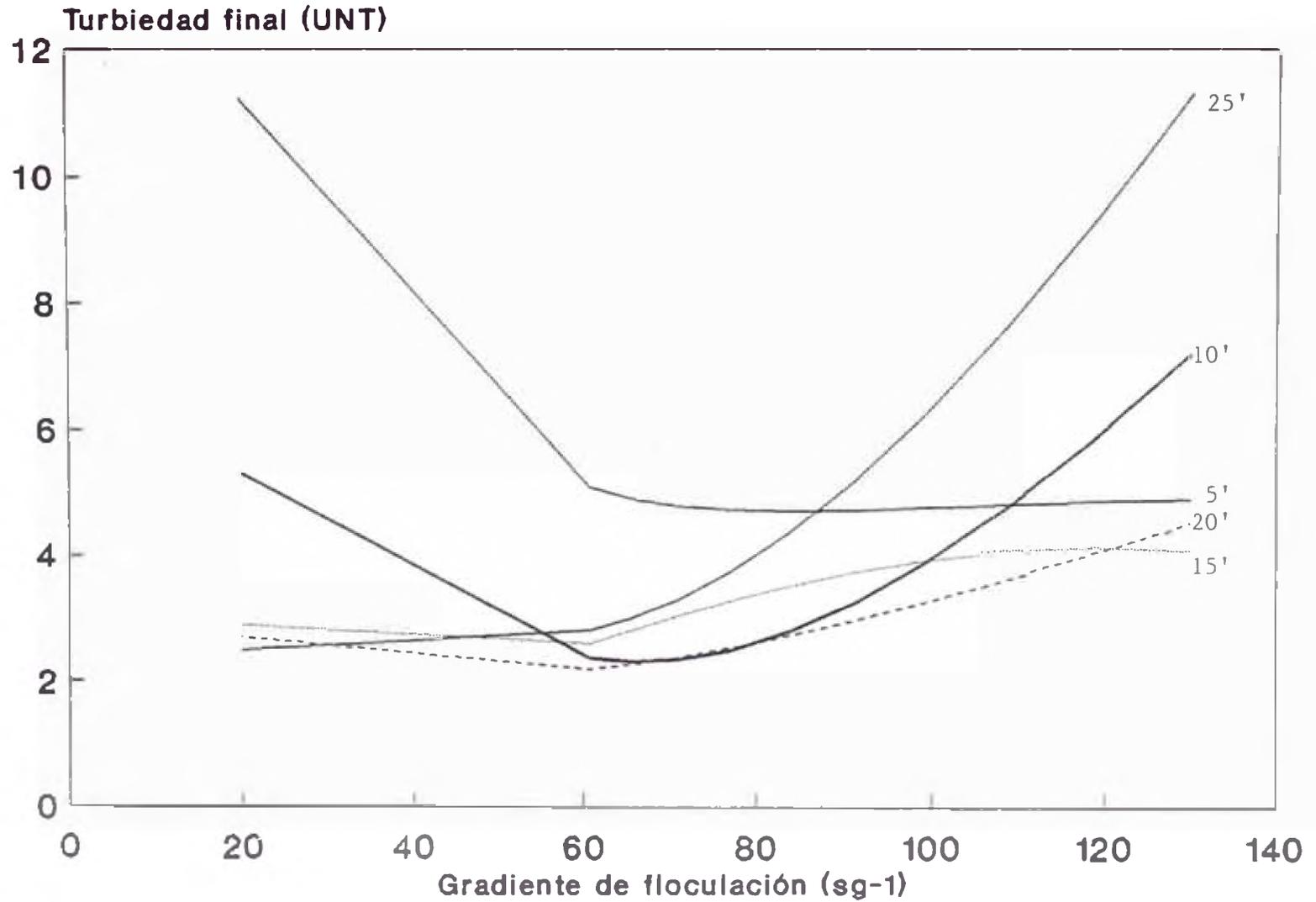


Figura 9.II.11

CORRELACION DE GRADIENTES Y TIEMPOS OPTIMOS DE FLOCULACION

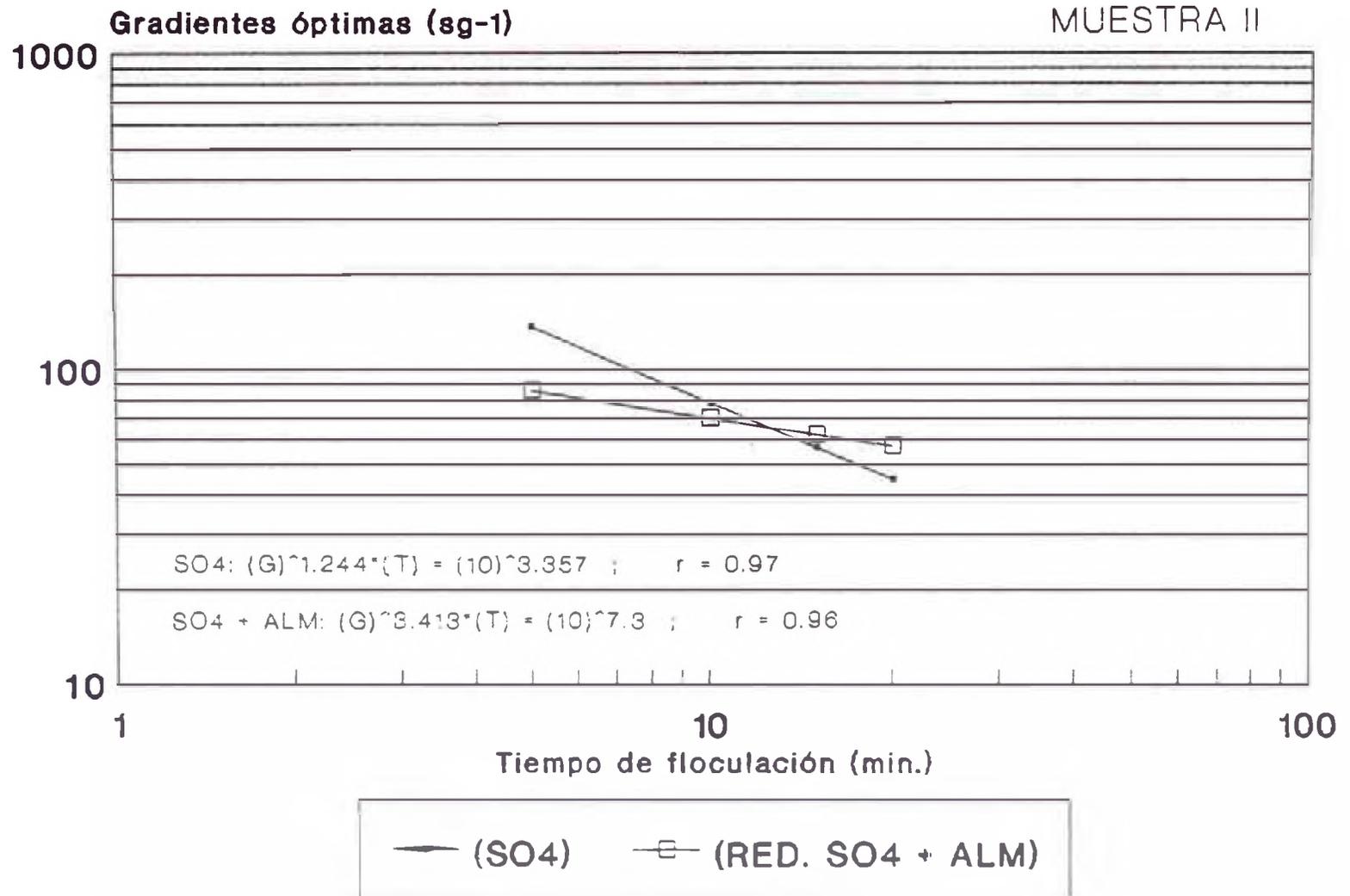


Figura 9.II.12

EFICIENCIA DE SEDIMENTABILIDAD MUESTRA II (SO4)

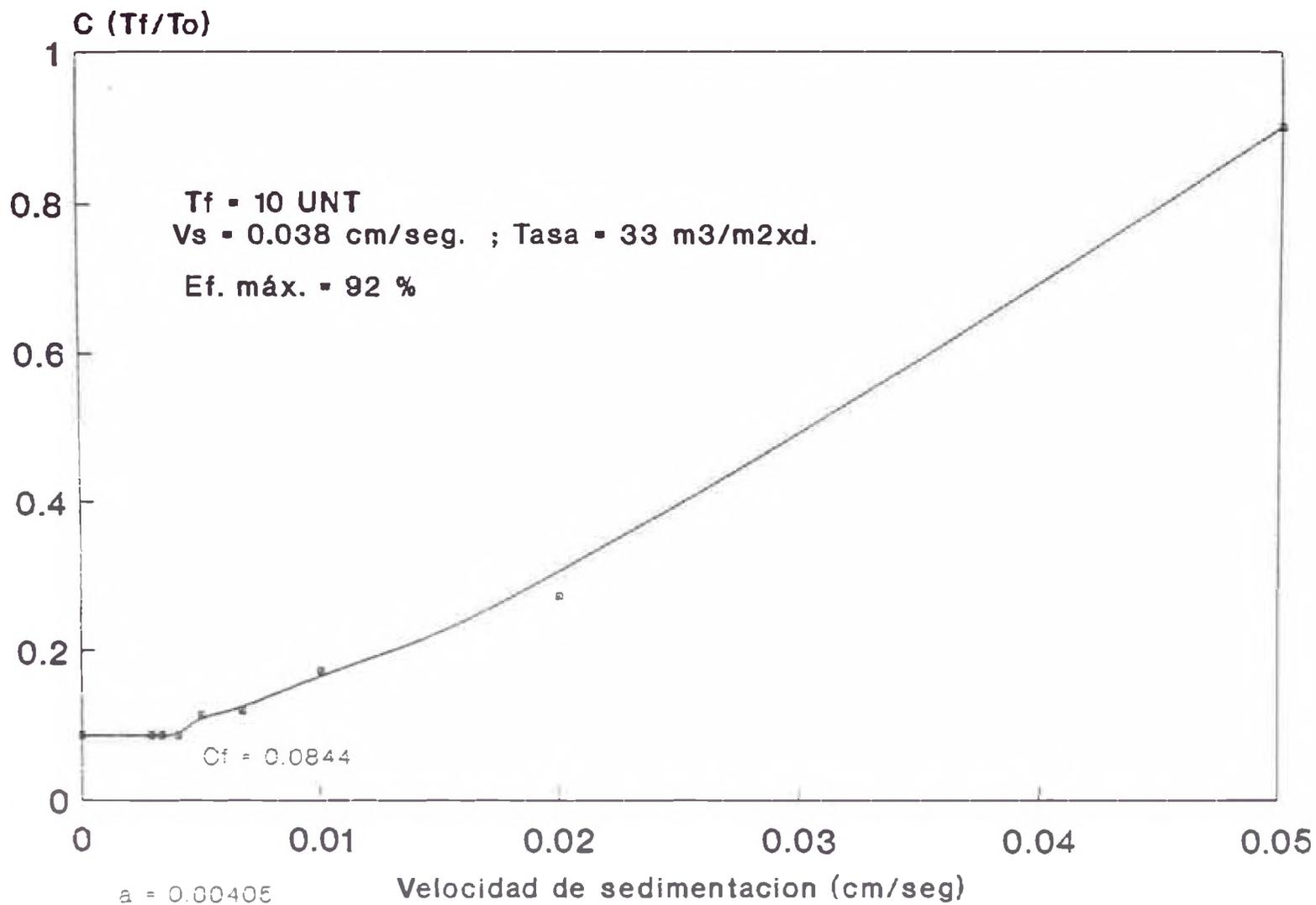


Figura 9.II.13

EFICIENCIA DE SEDIMENTABILIDAD MUESTRA II (RED. SO4 + ALM)

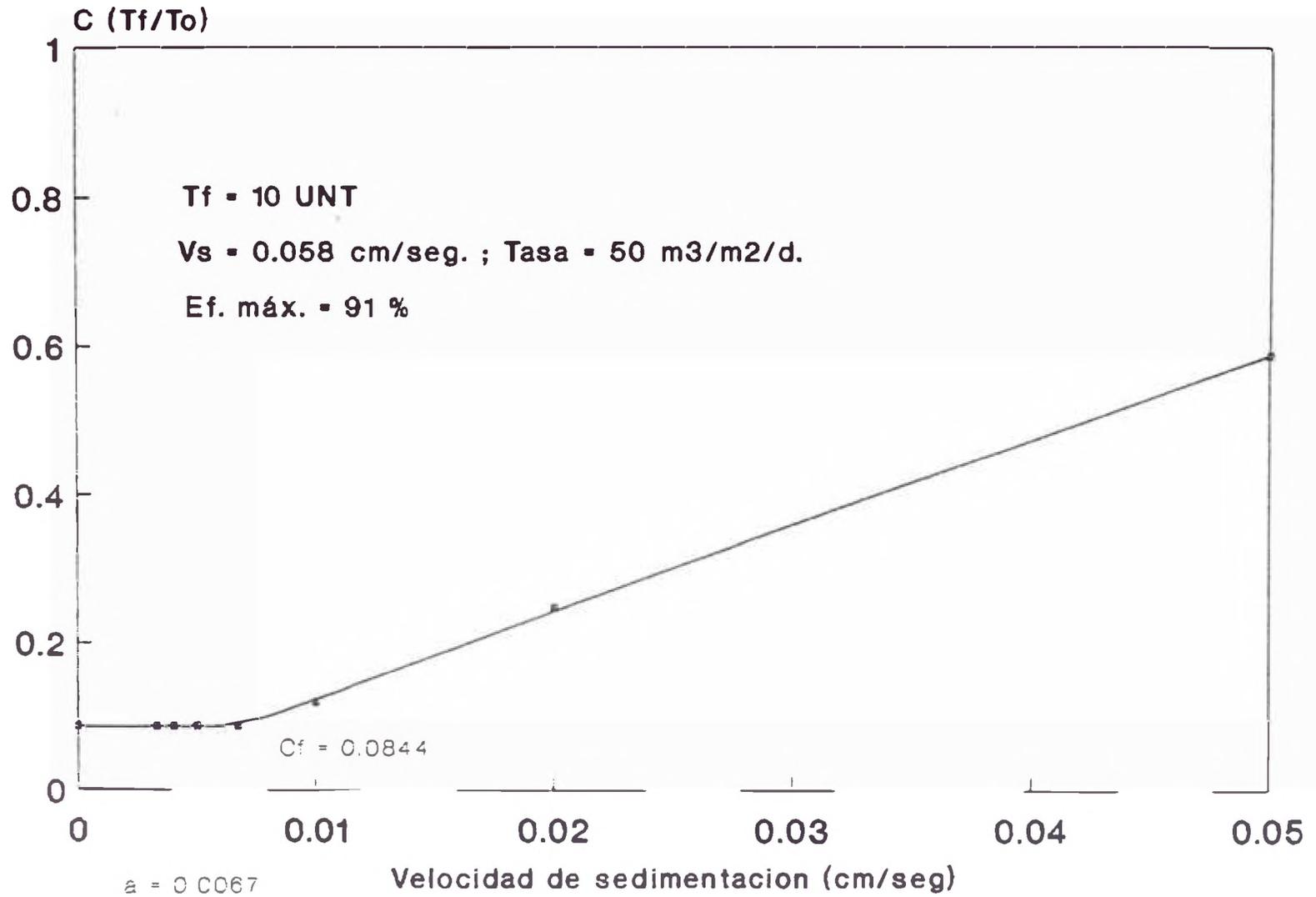


Figura 9.II.14

EFICIENCIA REMOCIONAL MUESTRA II

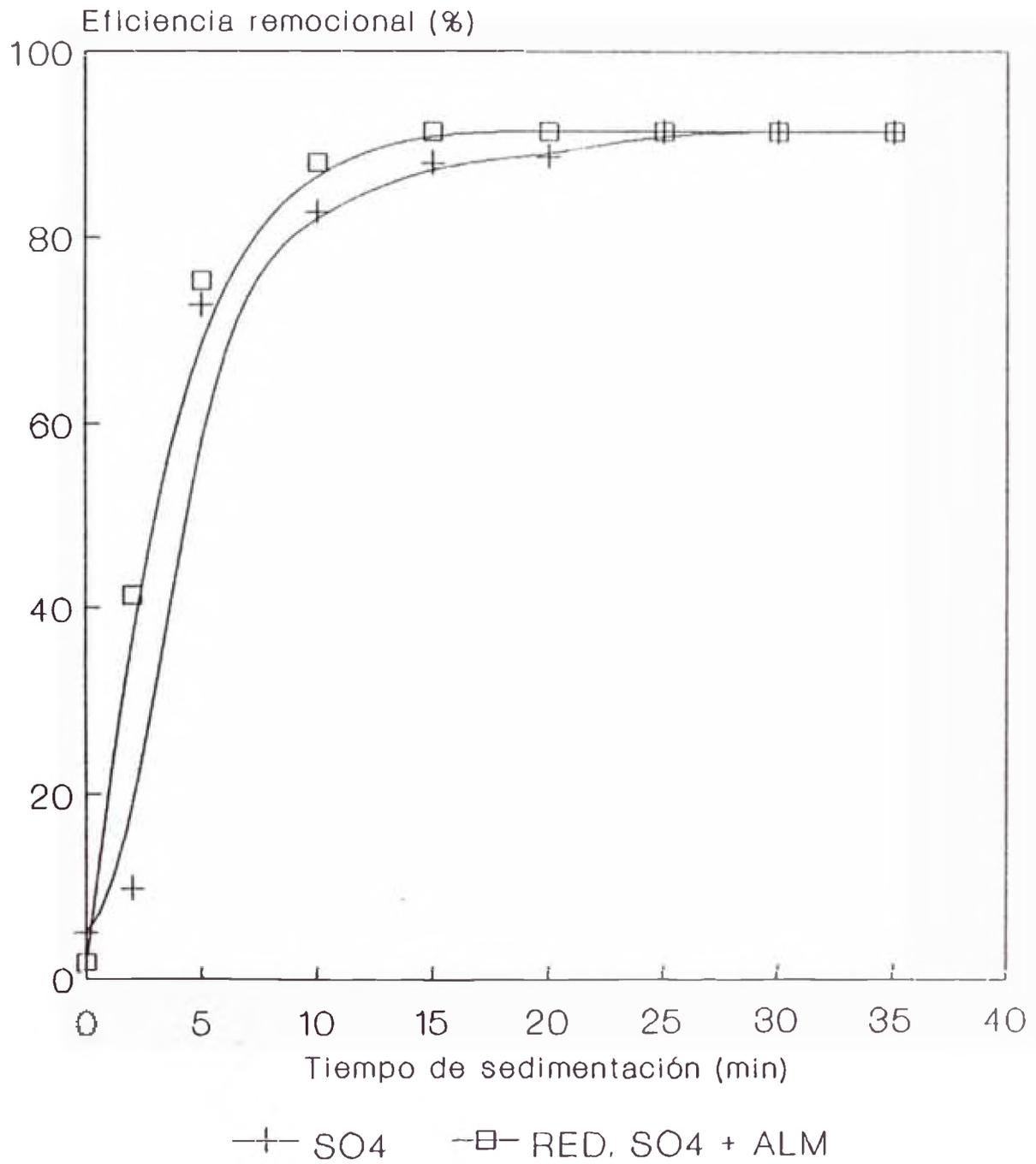


Figura 9.II.15

DOSIS OPTIMA DE COAGULANTE MUESTRA III

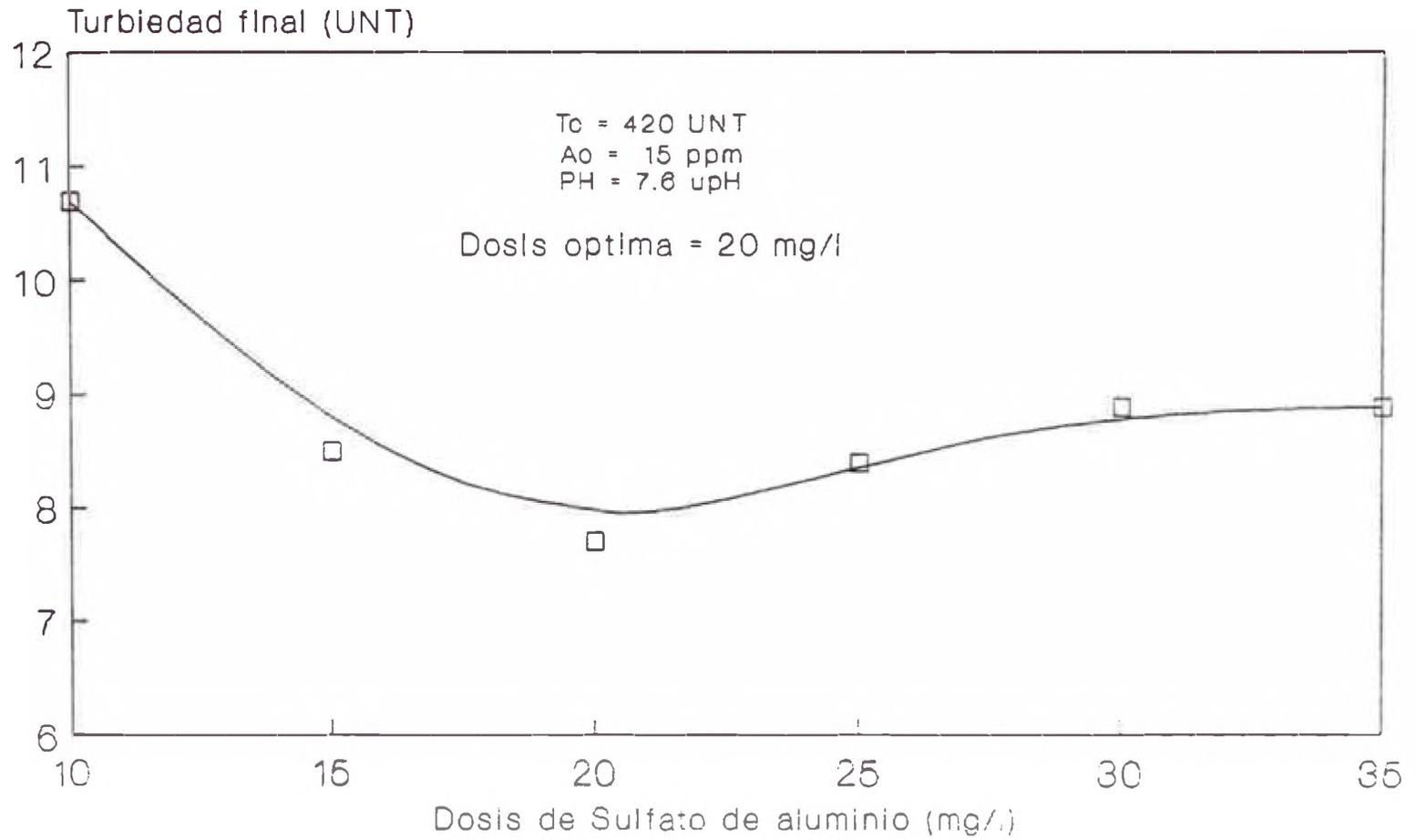


Figura 9.111

CONCENTRACION OPTIMA DE COAGULANTE MUESTRA III

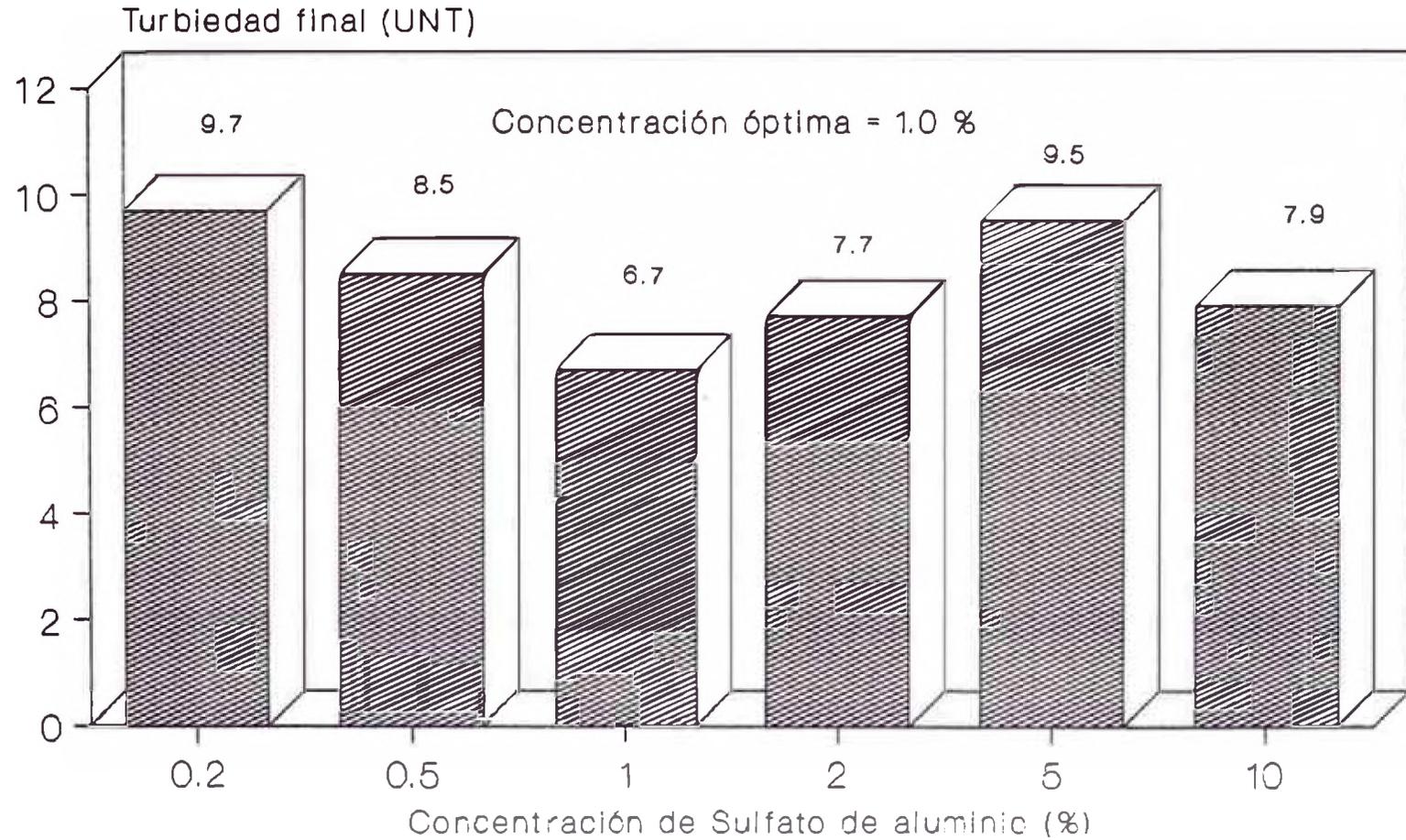


Figura 9.III.2

PH OPTIMO DE SULFATO DE ALUMINIO MUESTRA III

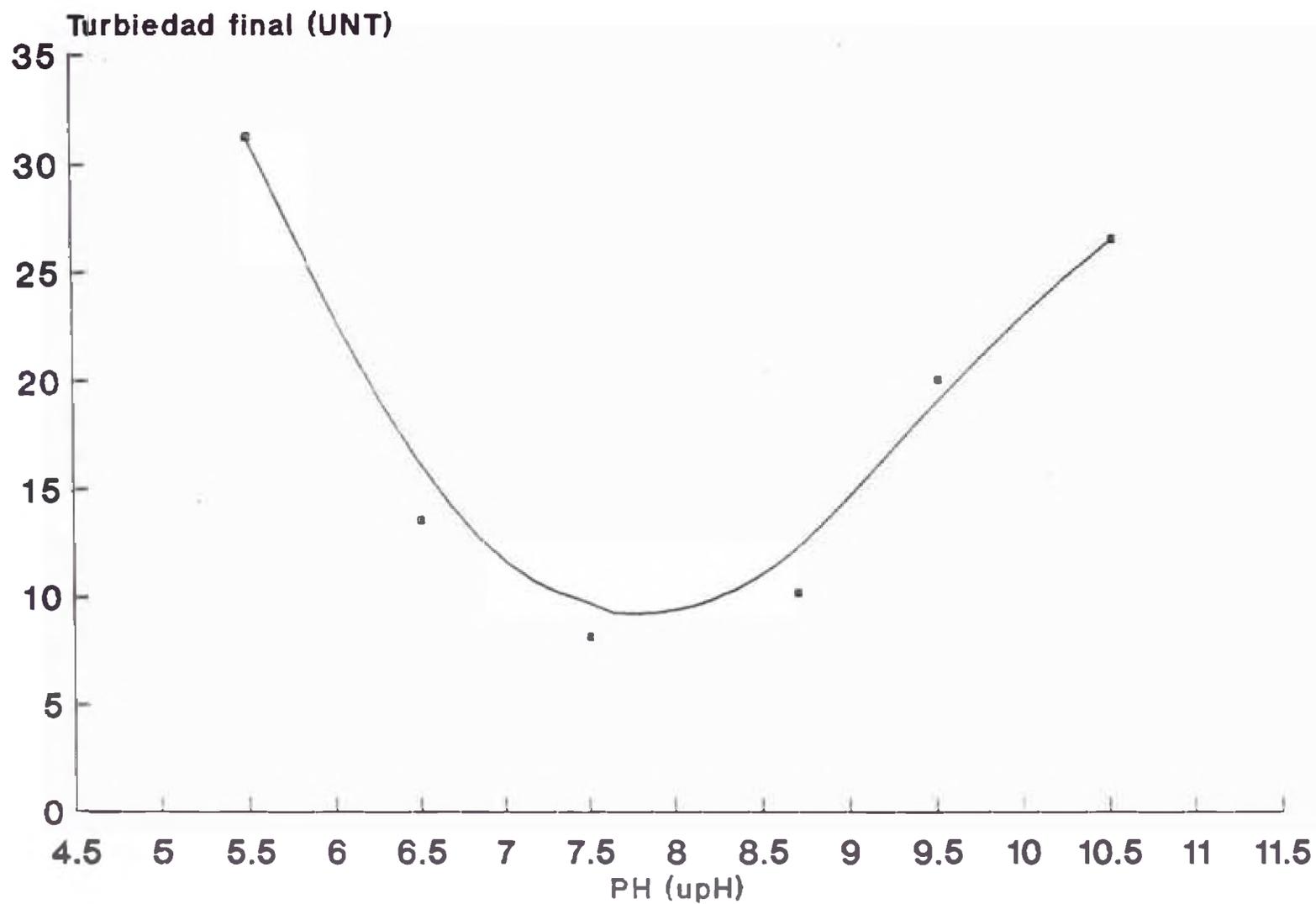


Figura 0113

MUESTRA III (SO4)

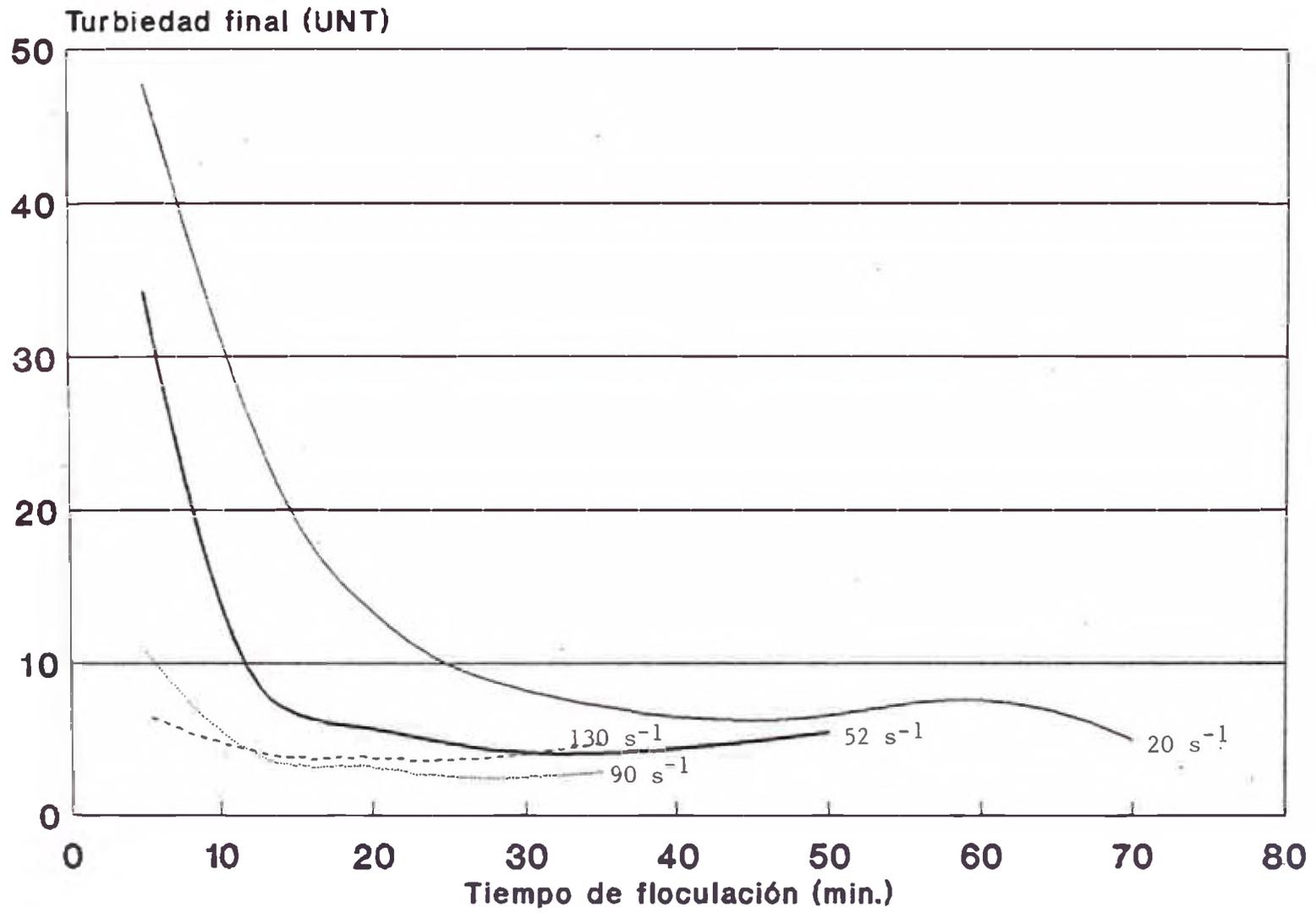


Figura 9.III.4

CURVA DE EFICIENCIA DE FLOCULACION EN FUNCION DE LA GRADIENTE (SO4)

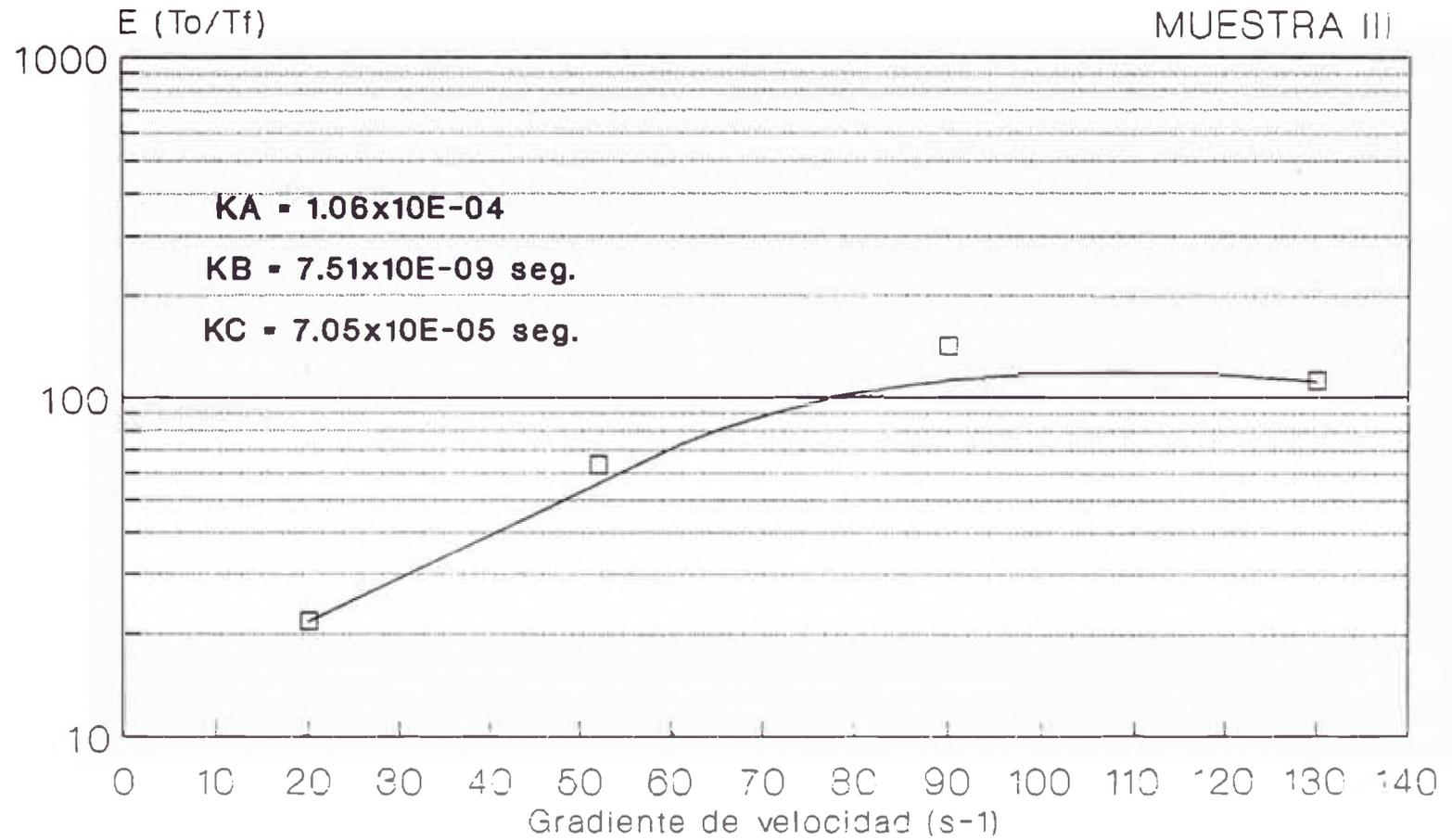


Figura 9.III.5

GRADIENTES OPTIMOS DE FLOCULACION MUESTRA III (SO4)

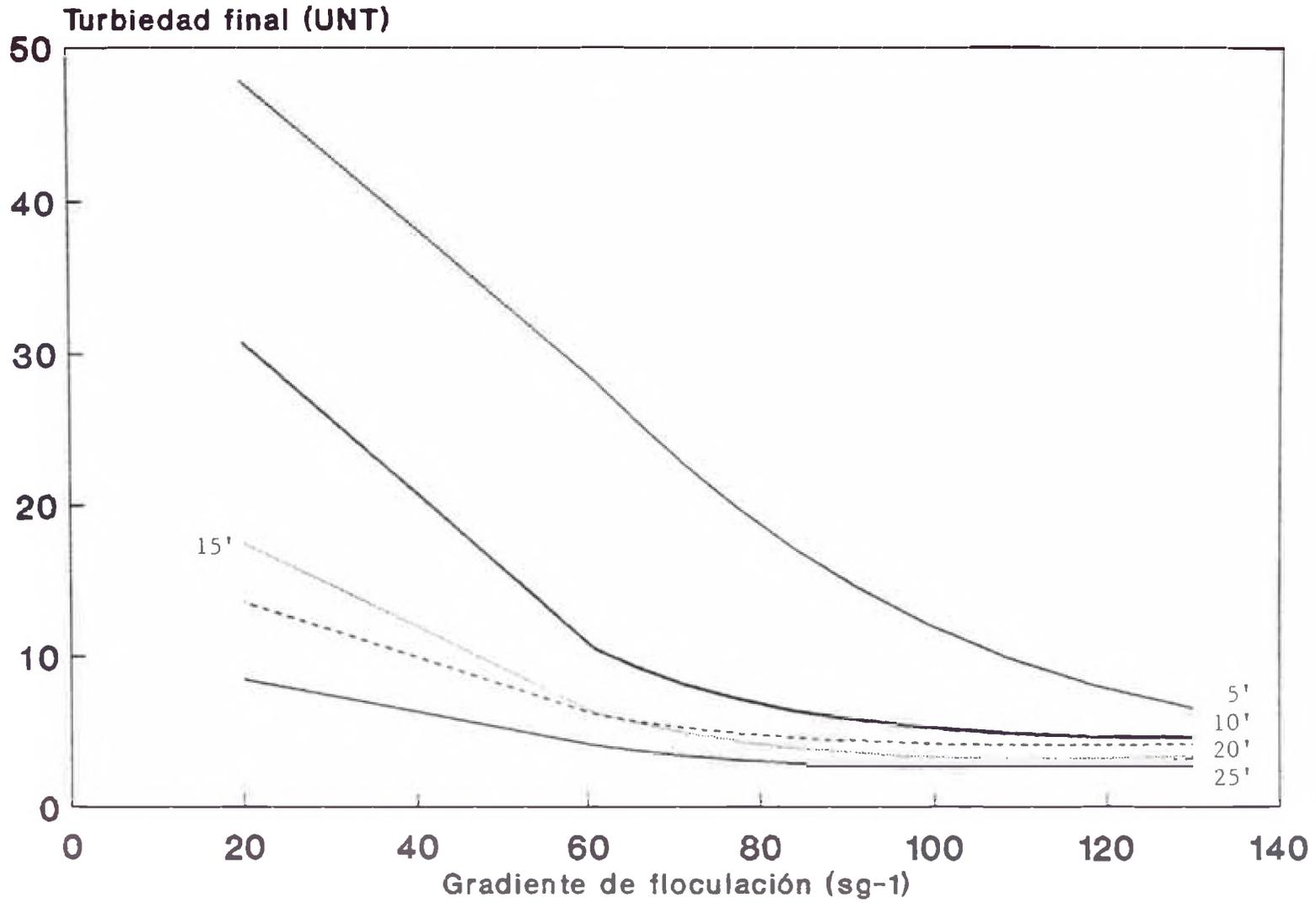


Figura 9.11.6

DOSIS OPTIMA DE ALMIDON MUESTRA III

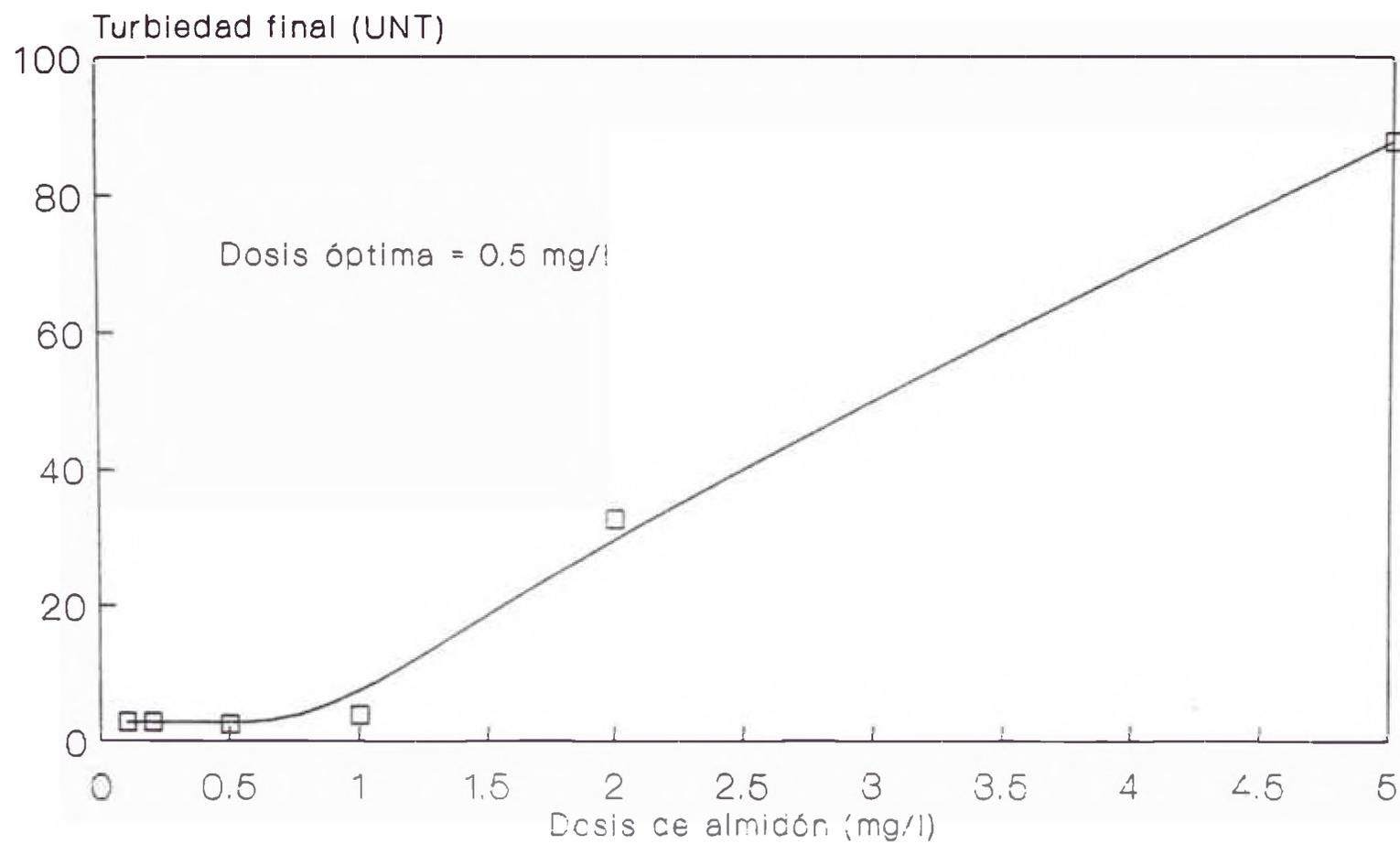


Figura 9.III.7

REDUCCION DE DOSIS DE SULFATO DE ALUMIN. MUESTRA III

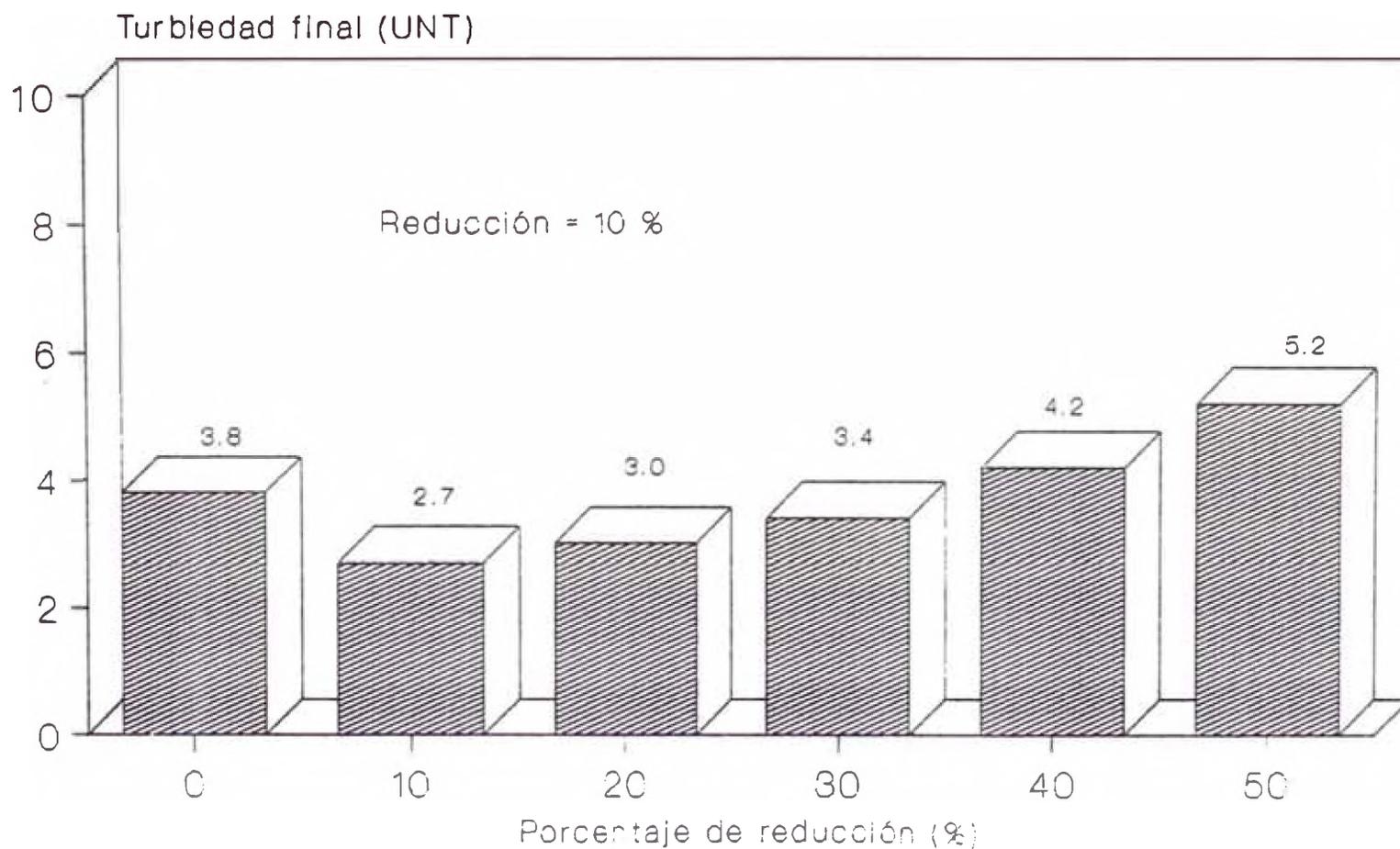


Figura 9.III.8

TIEMPOS OPTIMOS DE FLOCULACION

MUESTRA III (RED. SO₄ + ALM)

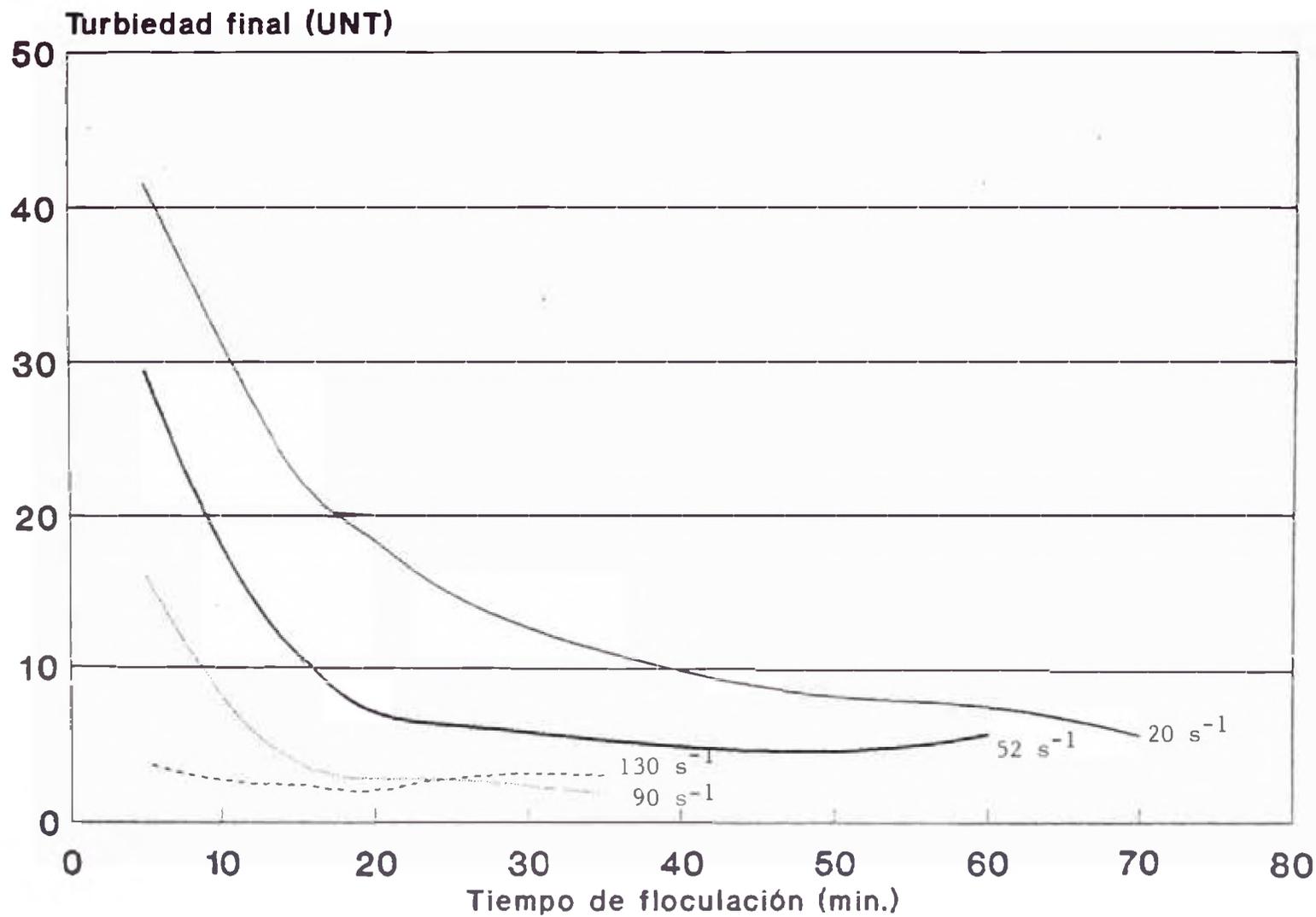


Figura 9.III.9

CURVA DE EFICIENCIA DE FLOCULACION EN FUNCION DE LA GRADIENTE (SO4 + ALM)

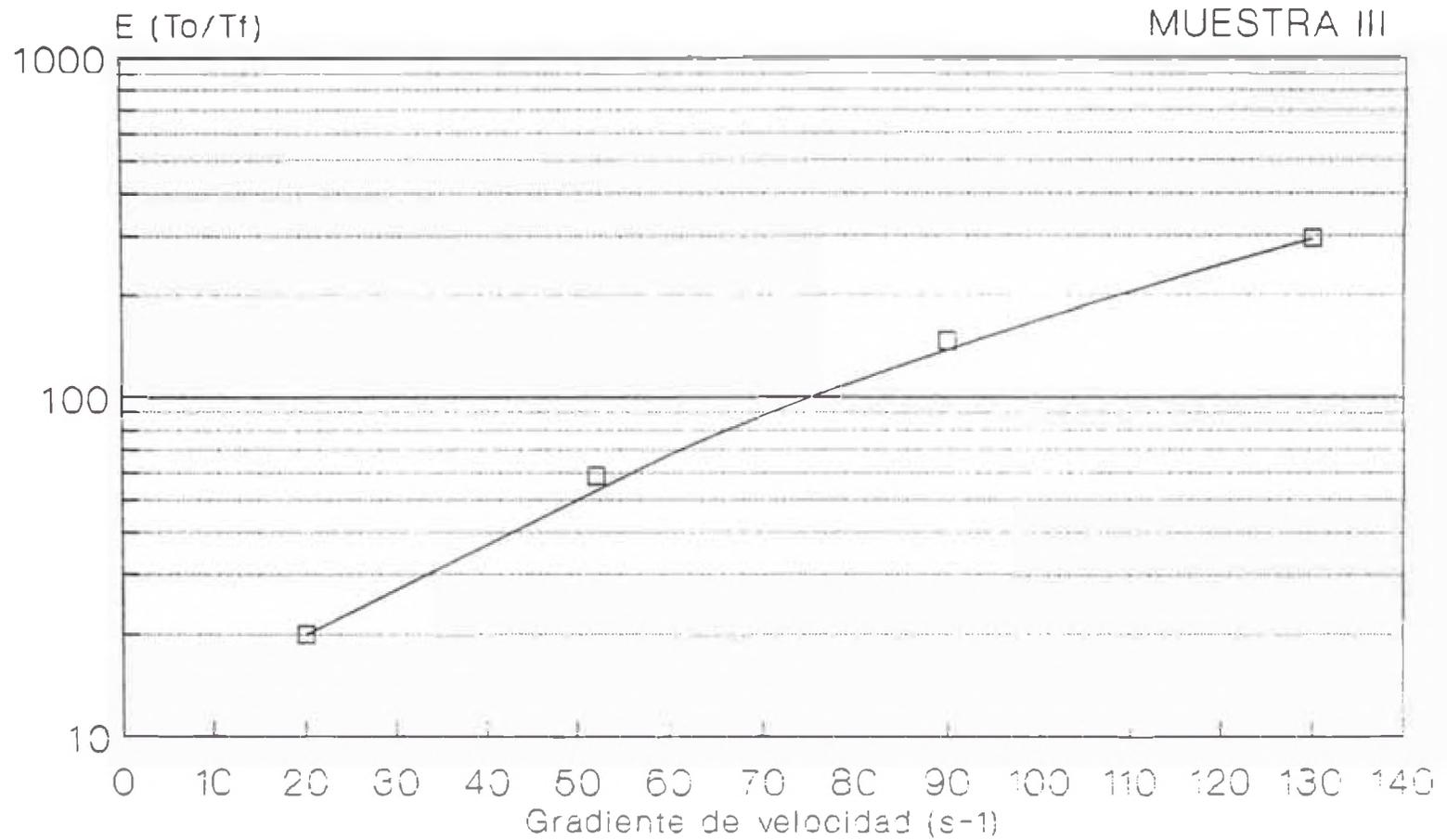


Figura 9.III.10

GRADIENTES OPTIMOS DE FLOCULACION

MUESTRA III (RED. SO₄ + ALM)

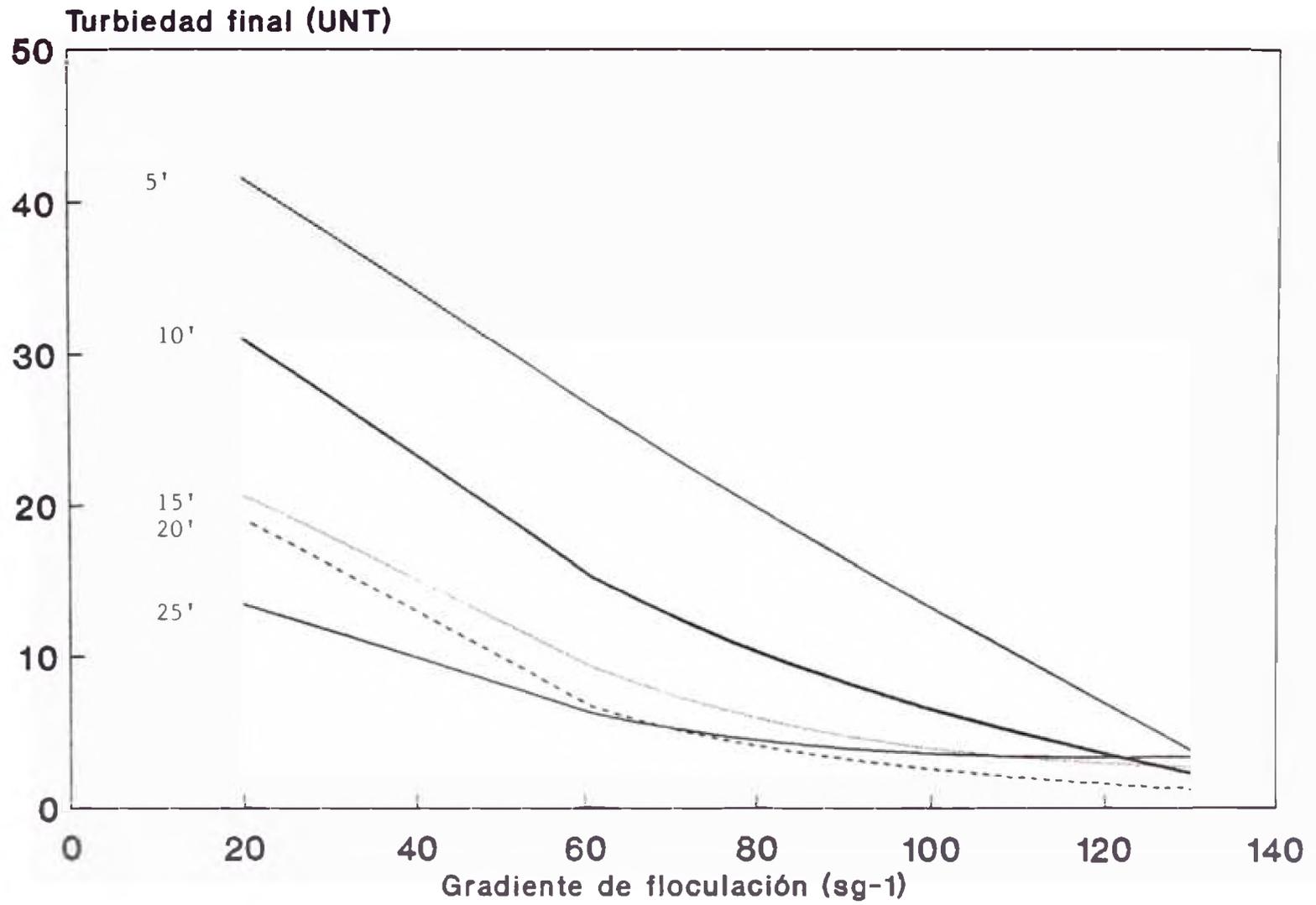
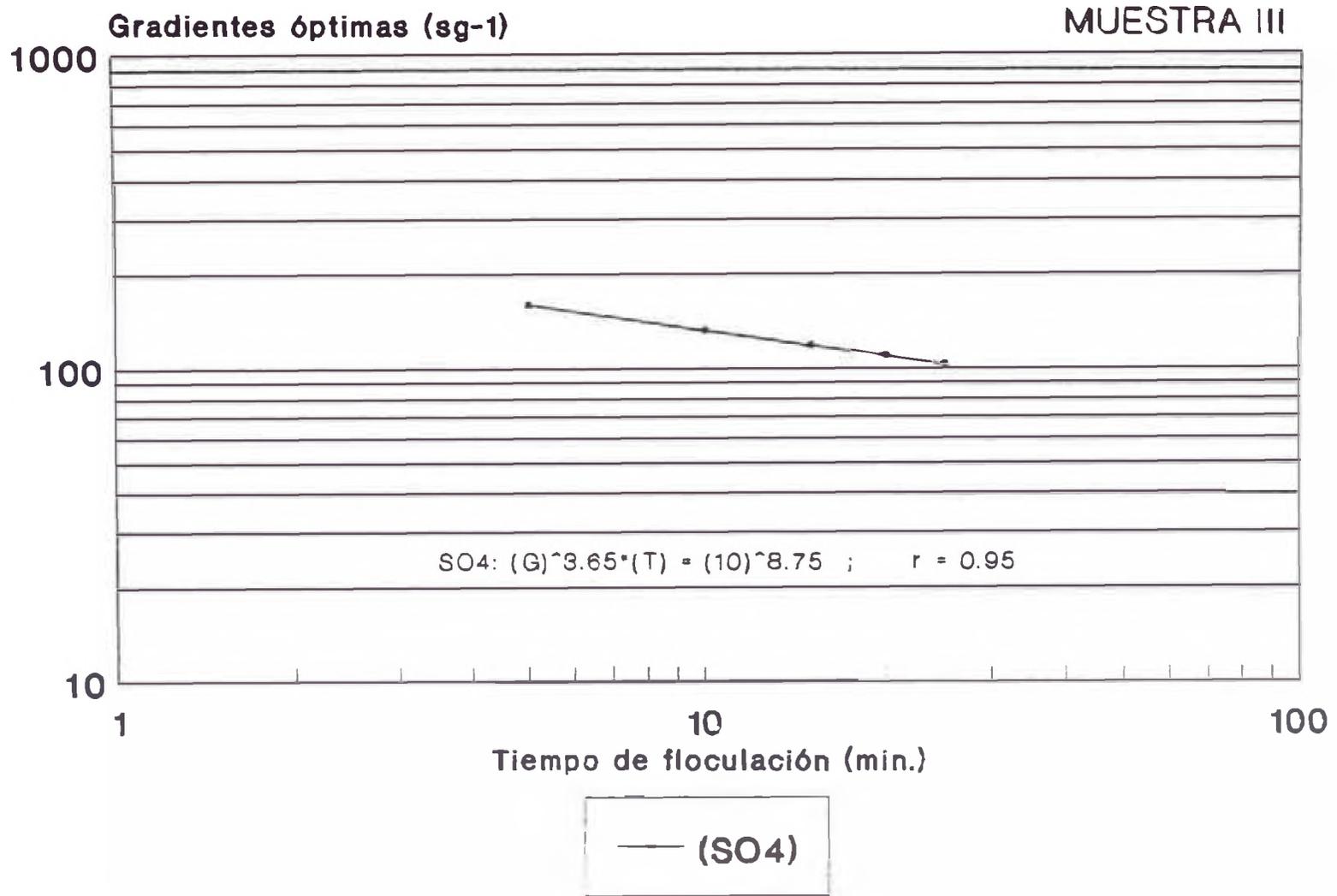


Figura 9.III.11

CORRELACION DE GRADIENTES Y TIEMPOS OPTIMOS DE FLOCULACION



EFICIENCIA DE SEDIMENTABILIDAD MUESTRA III (SO4)

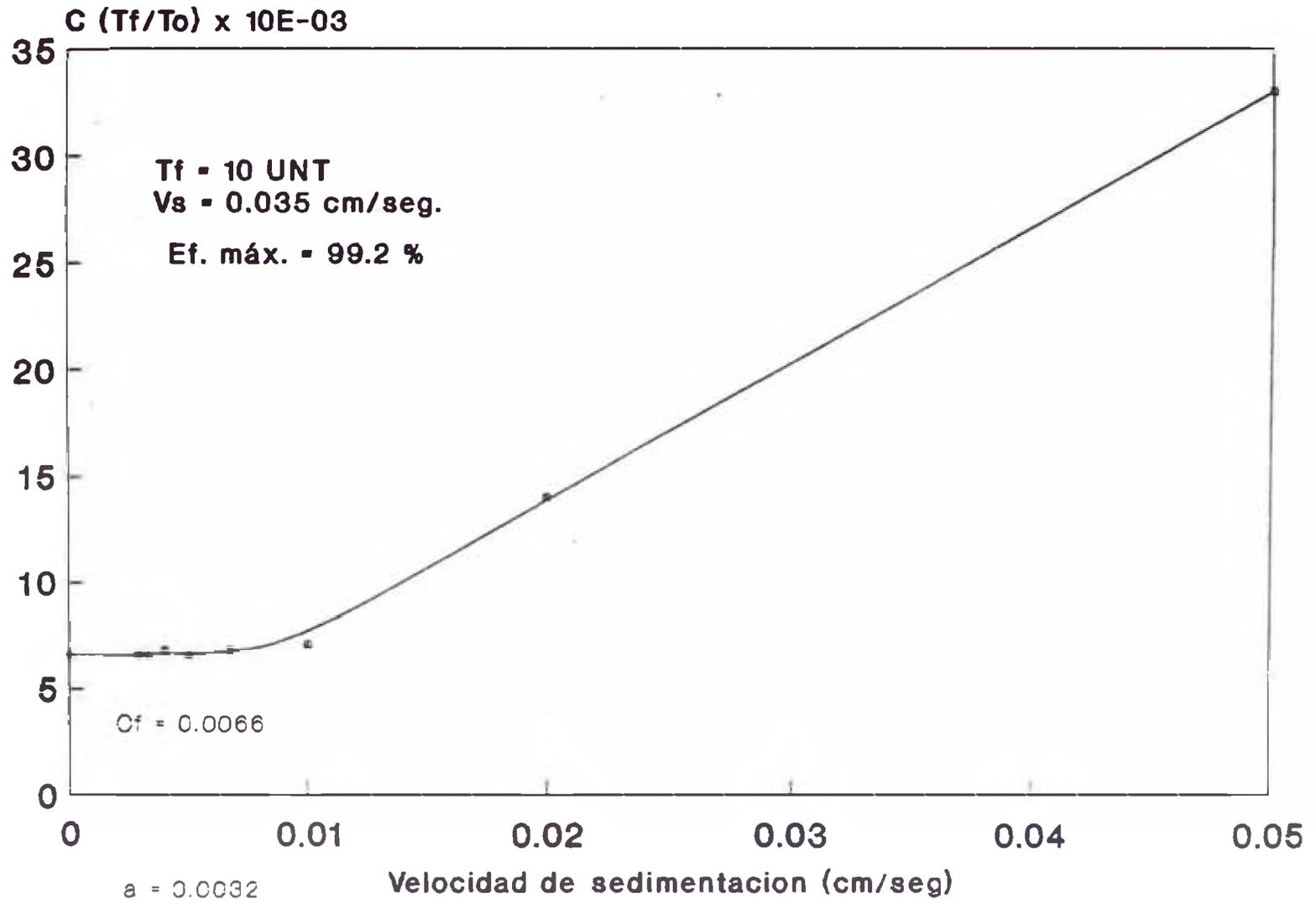


Figura 9.III.13

EFICIENCIA DE SEDIMENTABILIDAD

MUESTRA III (RED. SO4 + ALM)

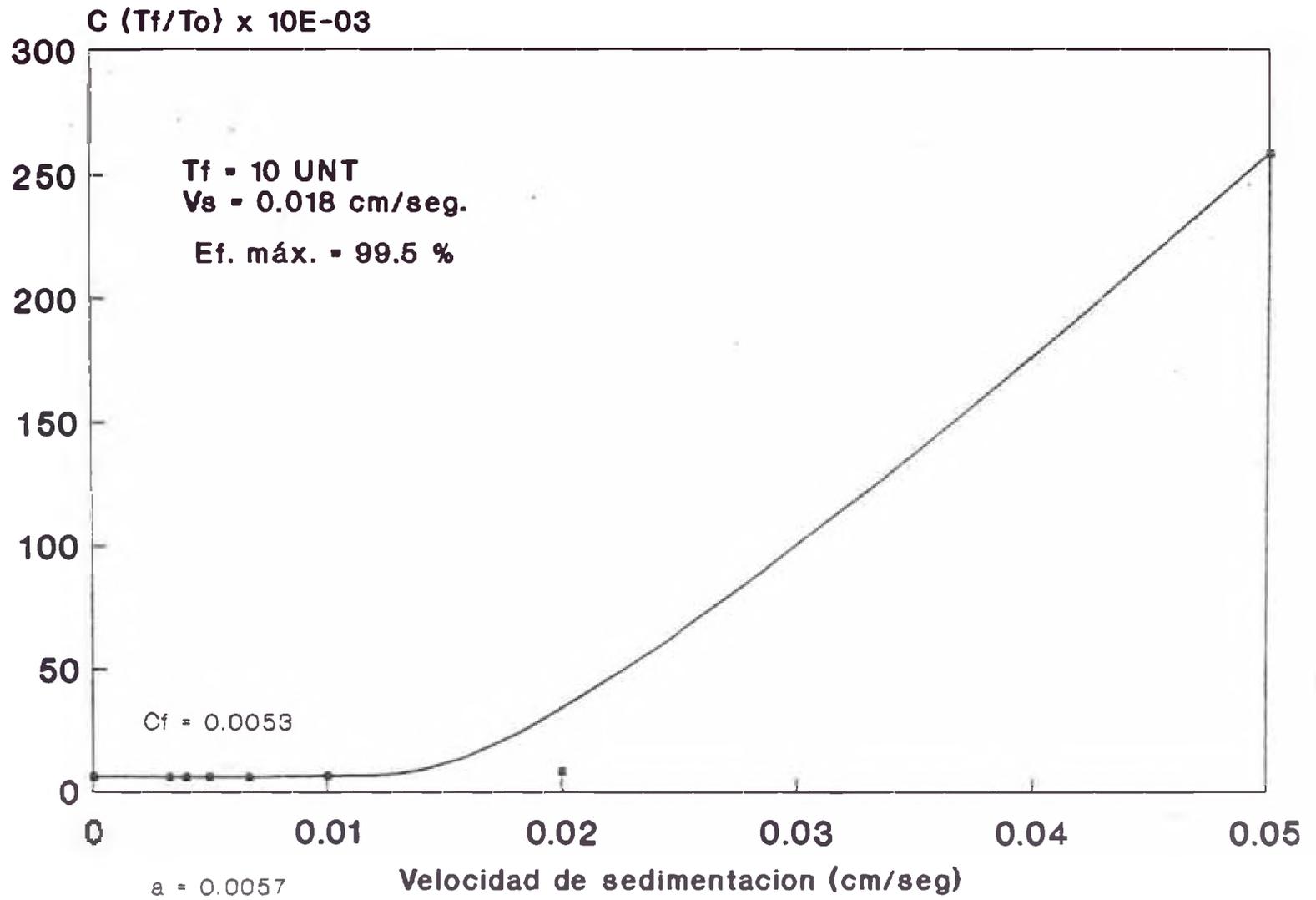


Figura 9.III.14

EFICIENCIA REMOCIONAL MUESTRA III

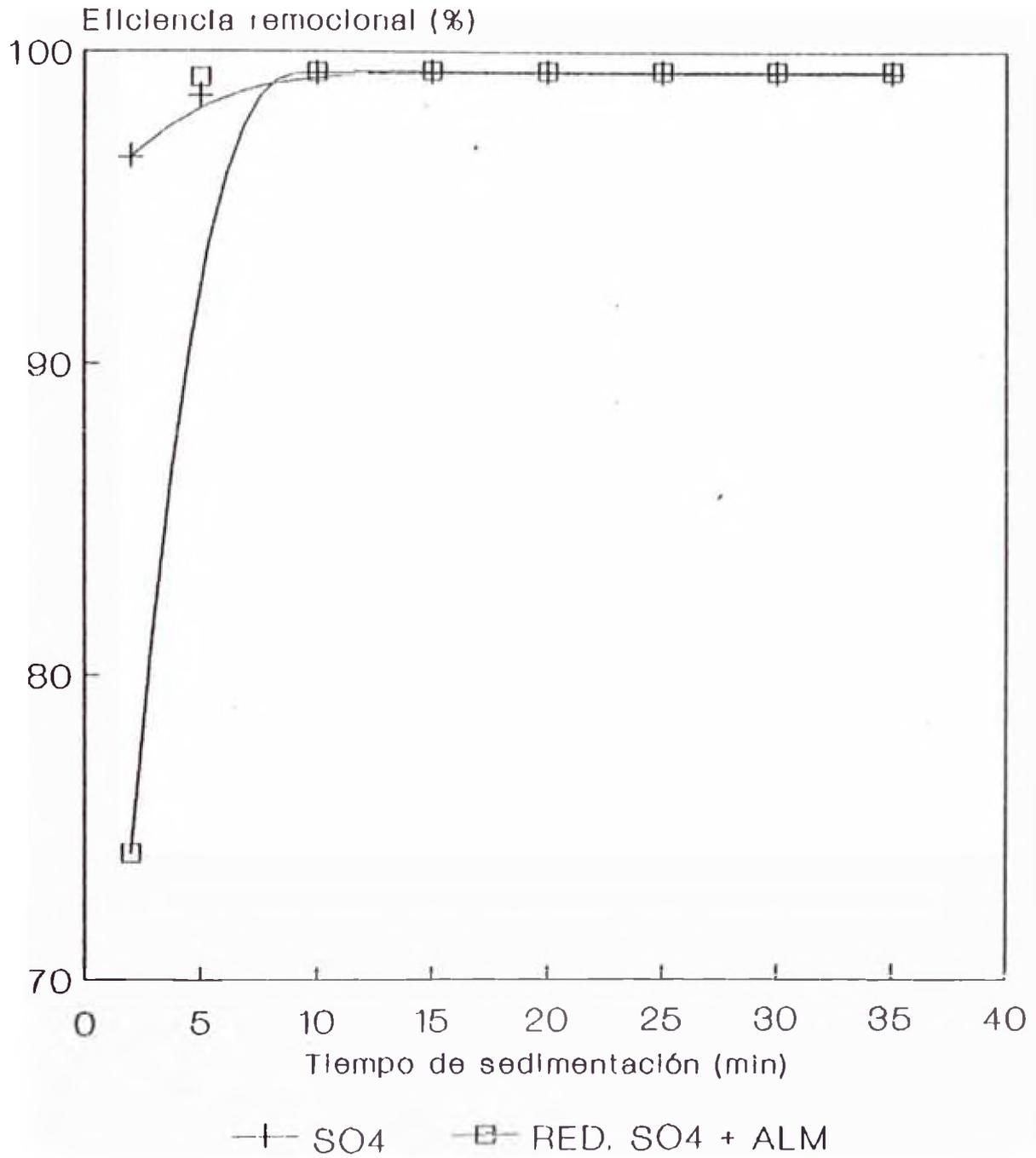


Figura 9.III.15

DOSIS OPTIMA DE COAGULANTE MUESTRA IV

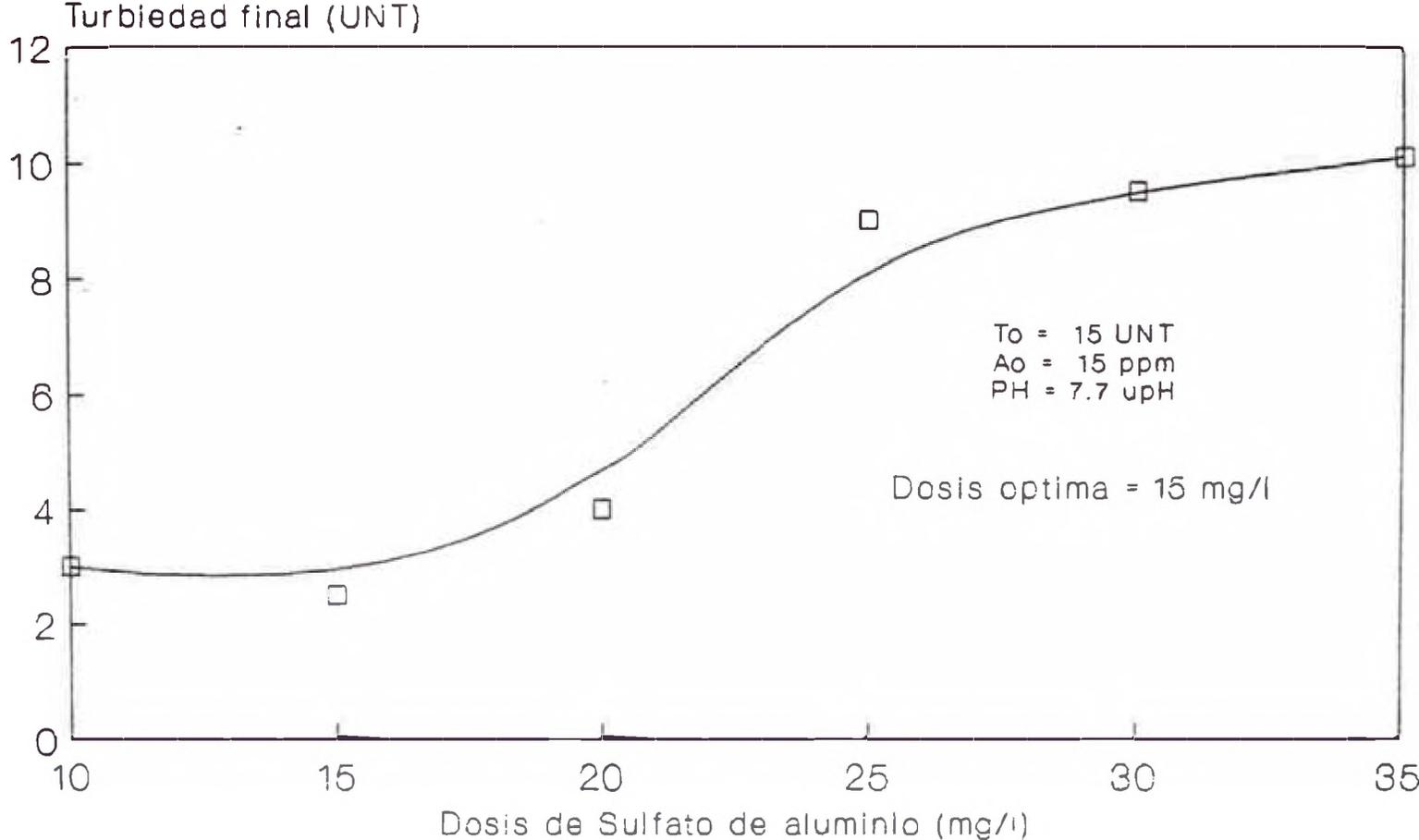


Figura 9.IV.1

CONCENTRACION OPTIMA DE SULFATO DE ALUM. MUESTRA IV

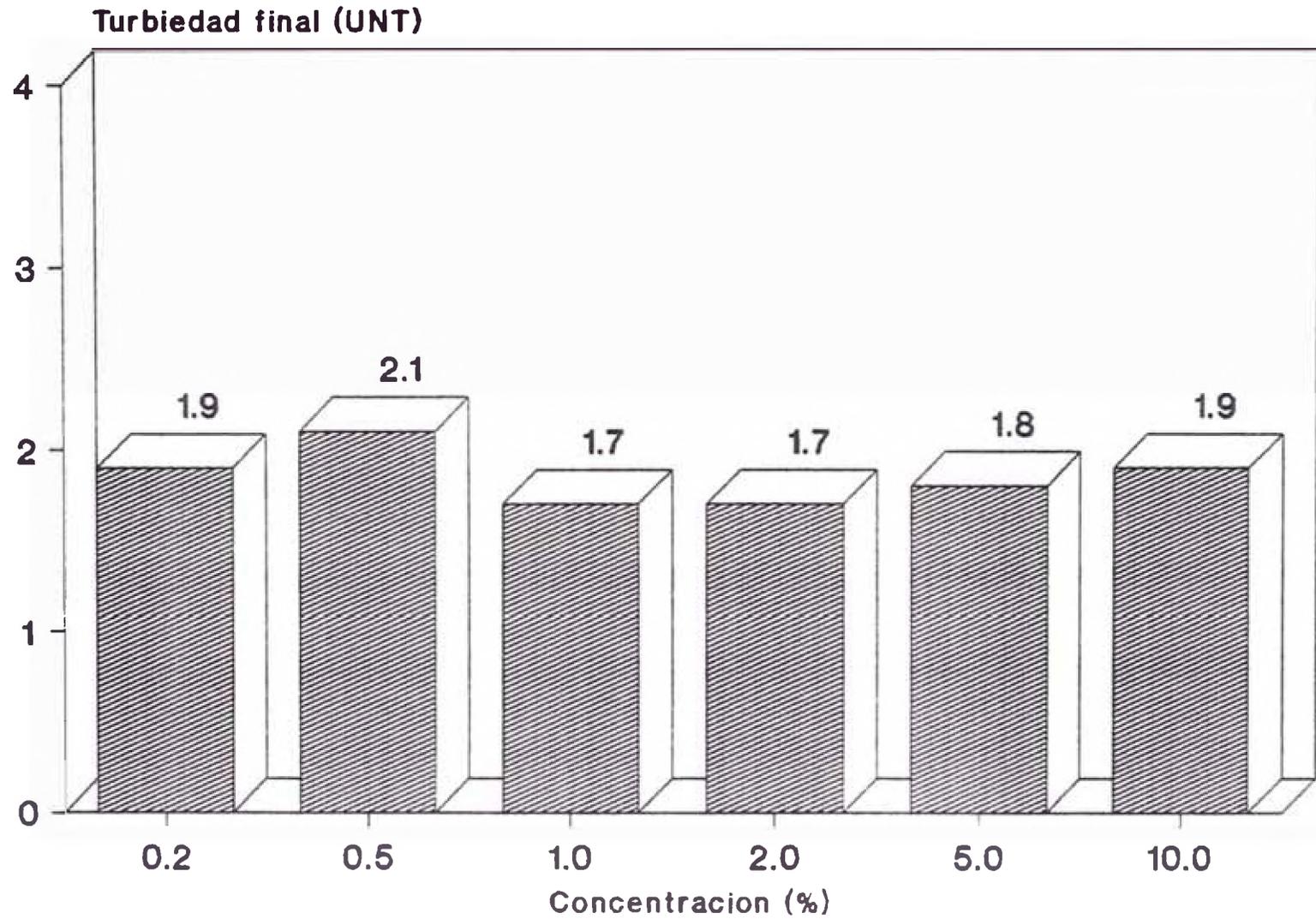


Figura 9.IV.2

PH OPTIMO DE SULFATO DE ALUMINIO MUESTRA IV

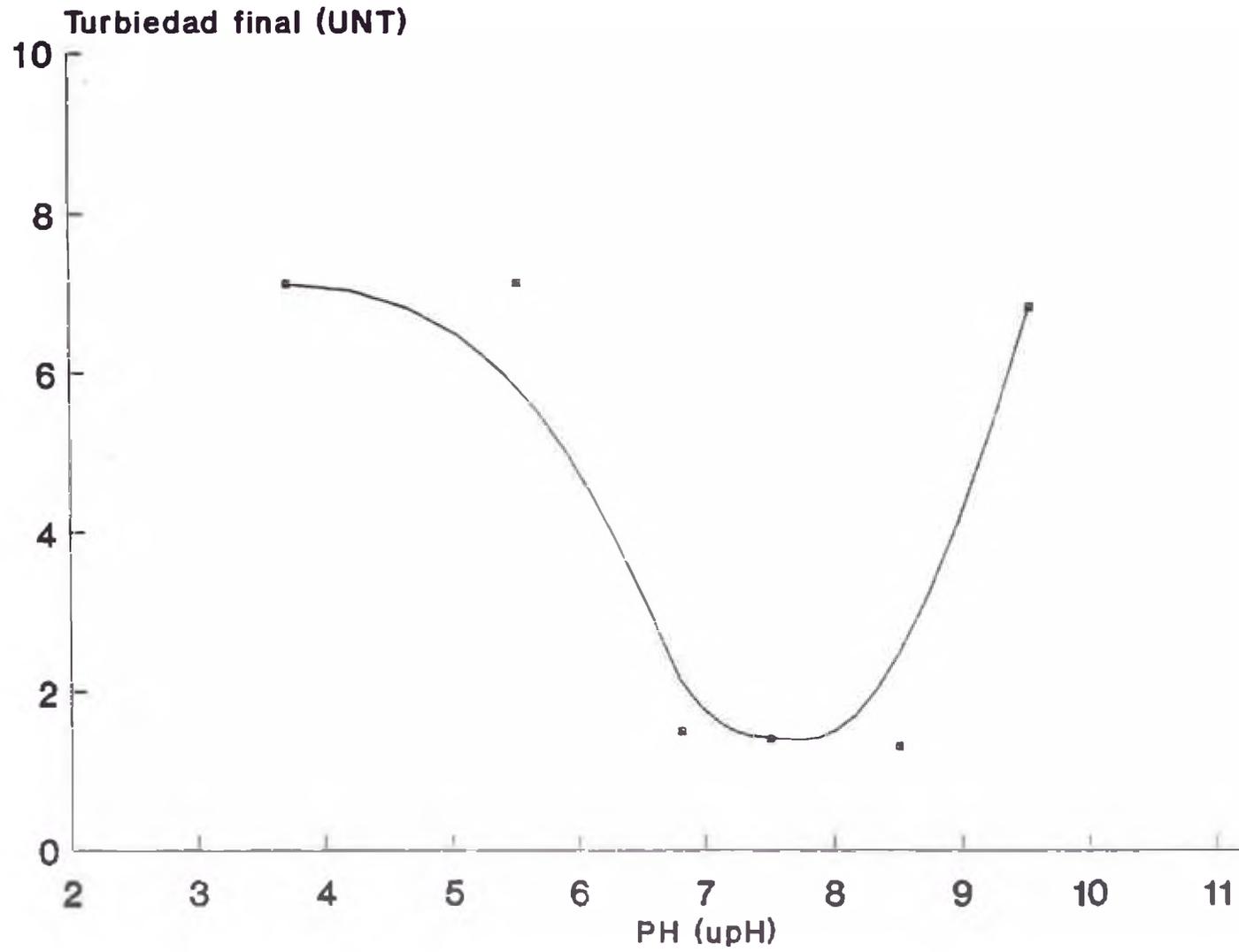


Figura 9.IV.3

TIEMPOS OPTIMOS DE FLOCULACION

MUESTRA IV (SO4)

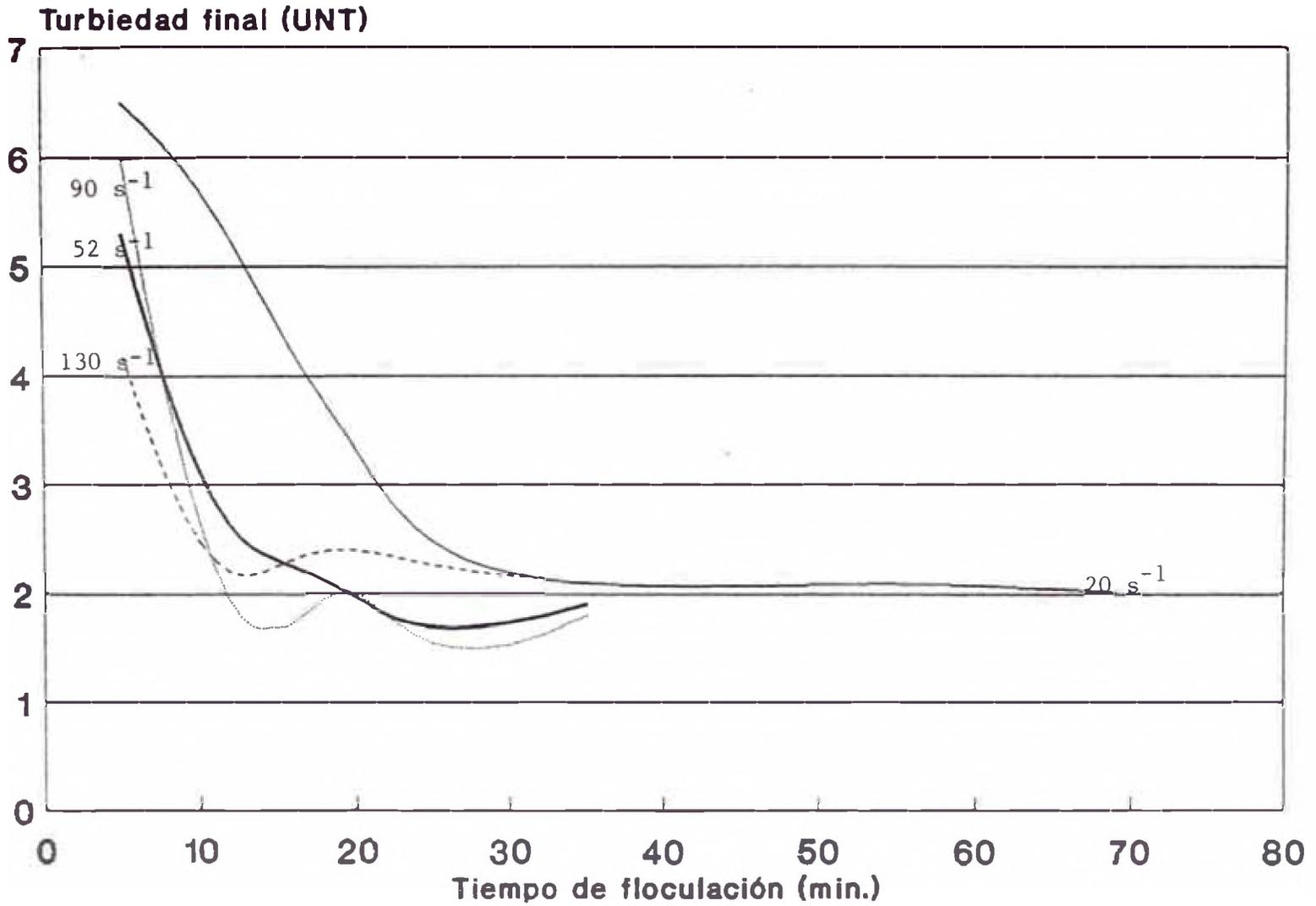


Figura 9.IV.4

CURVA DE EFICIENCIA DE FLOCULACION EN FUNCION DE LA GRADIENTE (SO4)

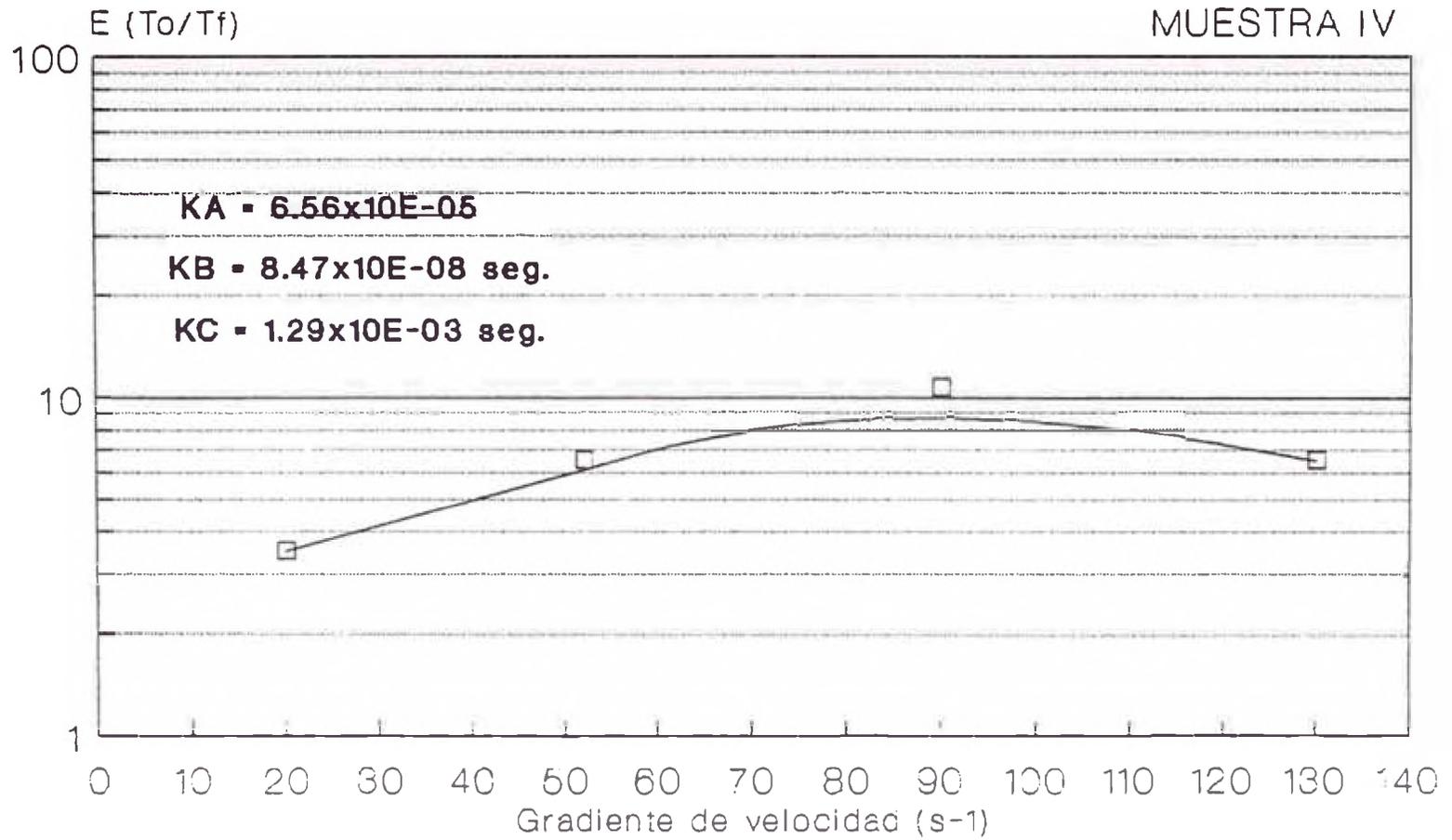


Figura 9.IV.5

GRADIENTES OPTIMOS DE FLOCULACION MUESTRA IV (SO4)

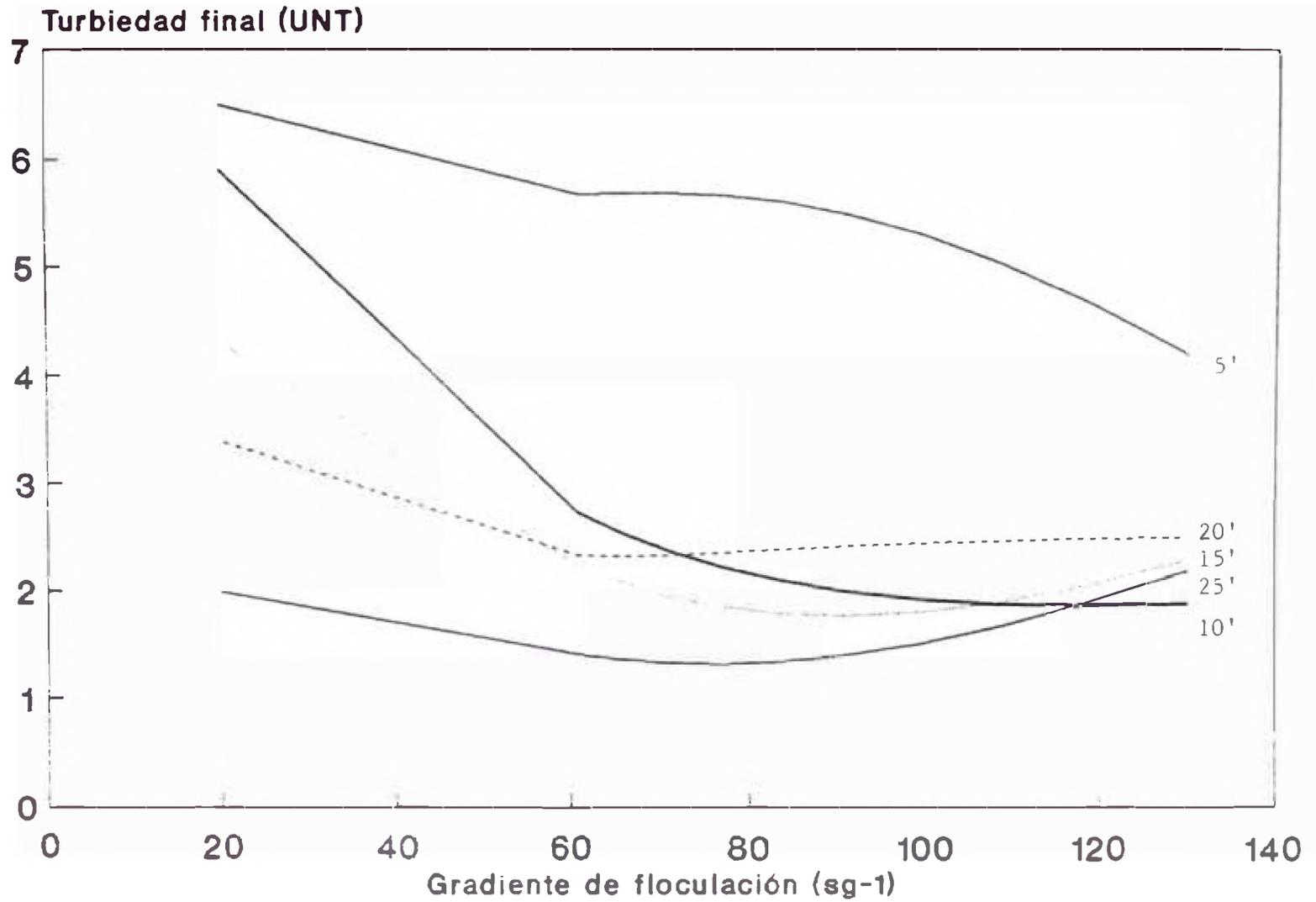


Figura 9.IV.6

DOSIS OPTIMA DE ALMIDON MUESTRA IV

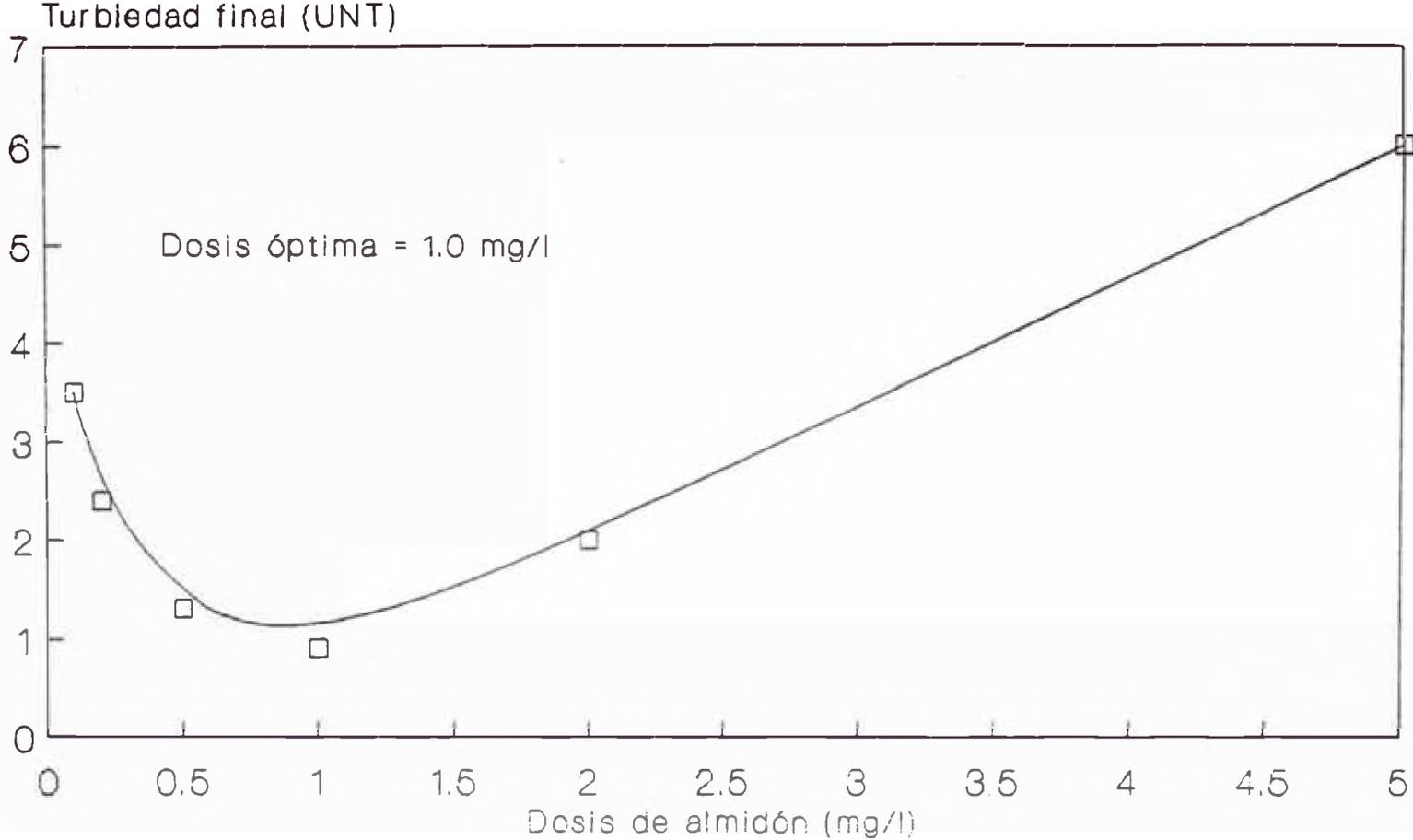


Figura 9.IV.7

REDUCCION DE DOSIS DE SULFATO DE ALUMIN. MUESTRA IV

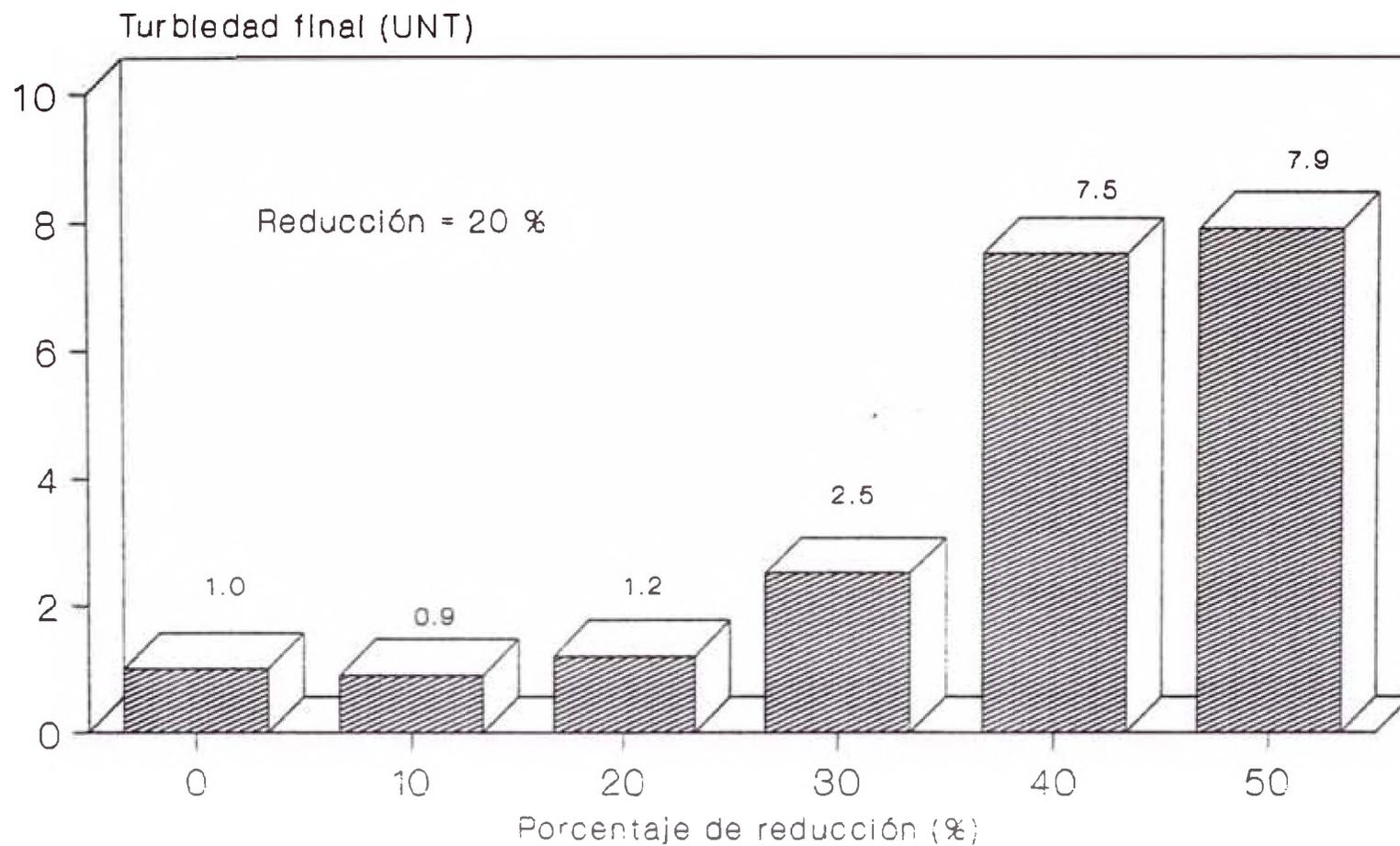


Figura 9.IV.8

TIEMPOS OPTIMOS DE FLOCULACION

MUESTRA IV (RED. SO4 + ALM)

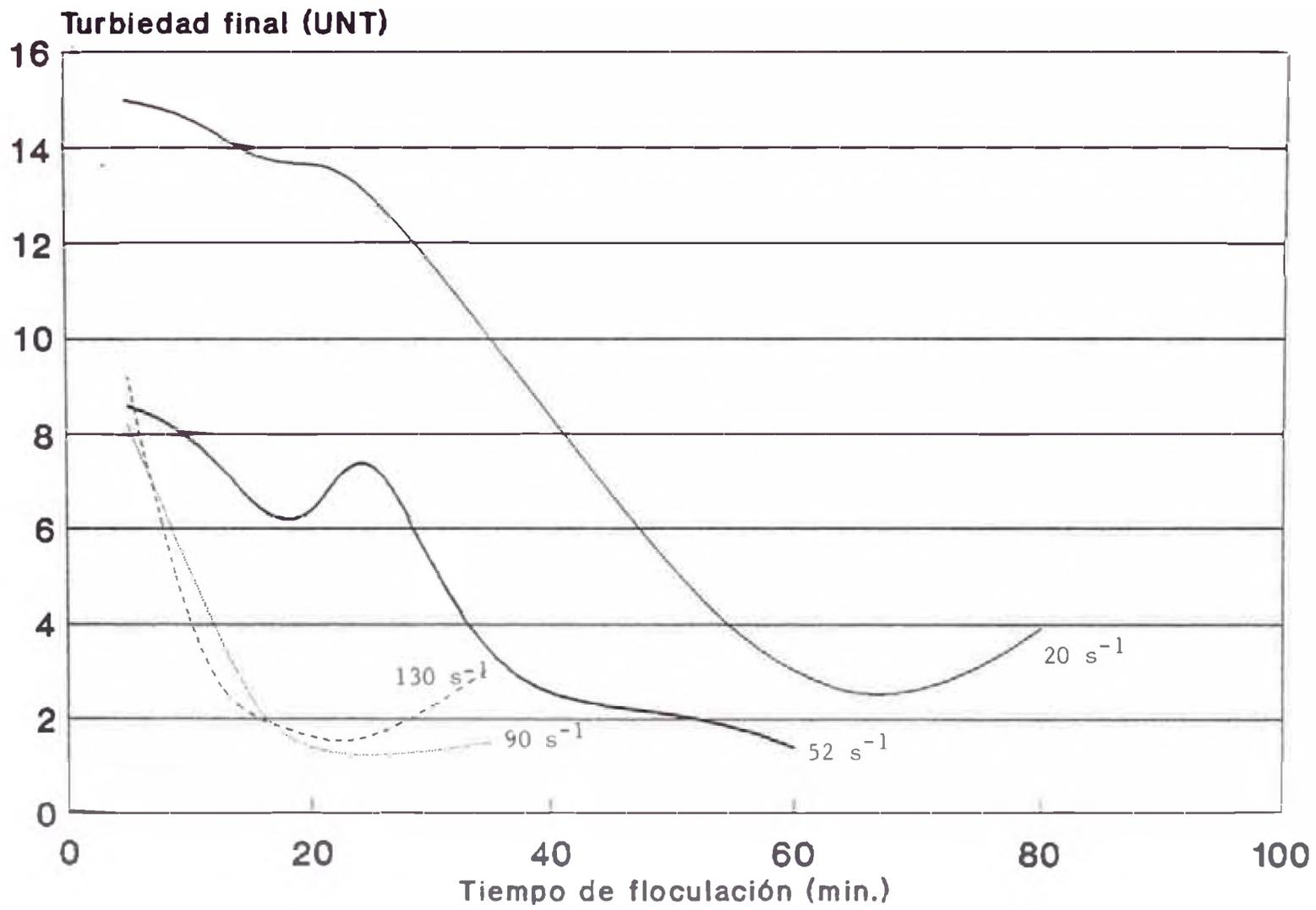


Figura 9.IV.9

CURVA DE EFICIENCIA DE FLOCULACION EN FUNCION DE LA GRADIENTE (SO4 + ALM)

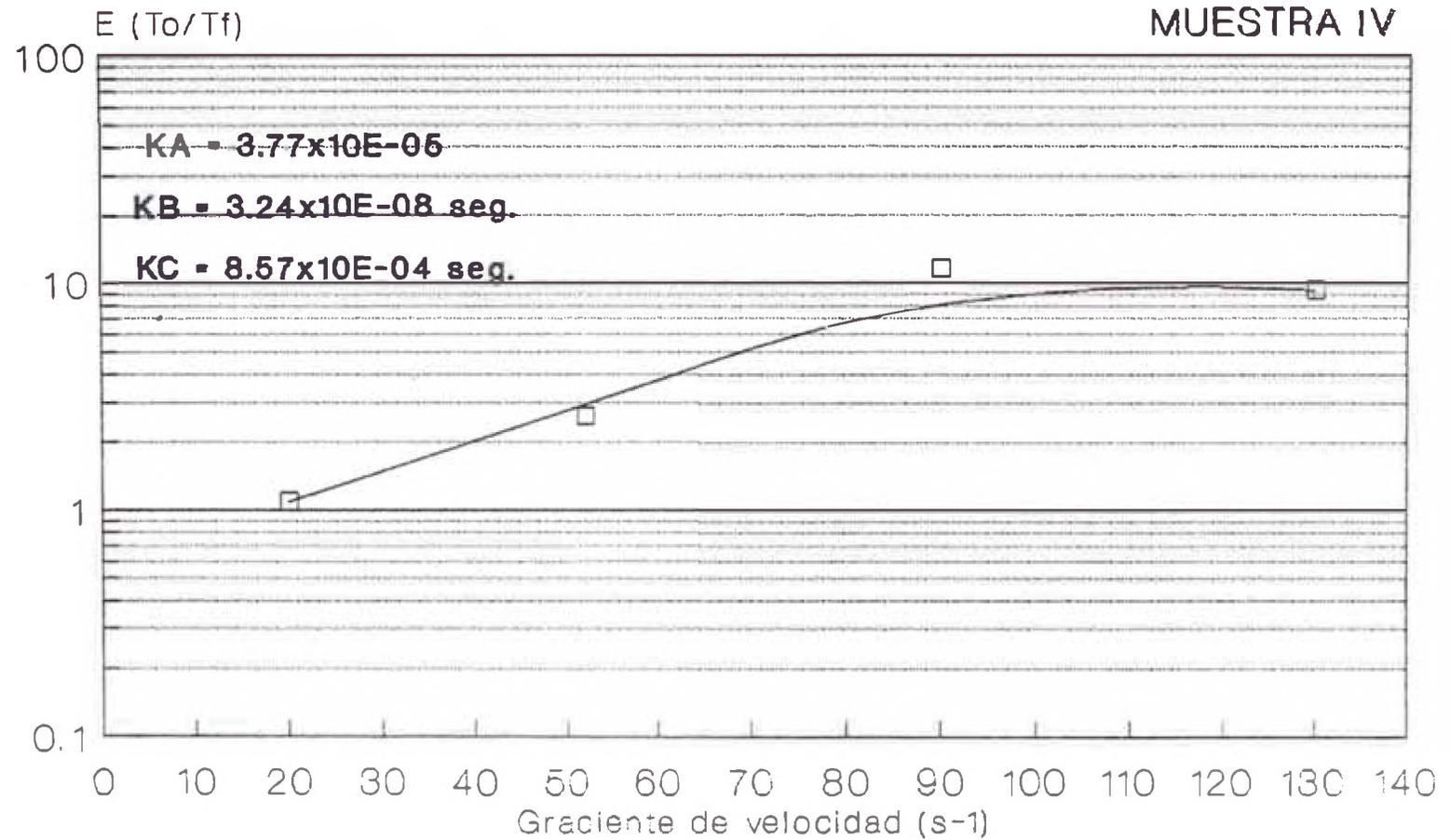


Figura 9.IV.10

GRADIENTES OPTIMOS DE FLOCULACION

MUESTRA IV (RED. SO4 + ALM)

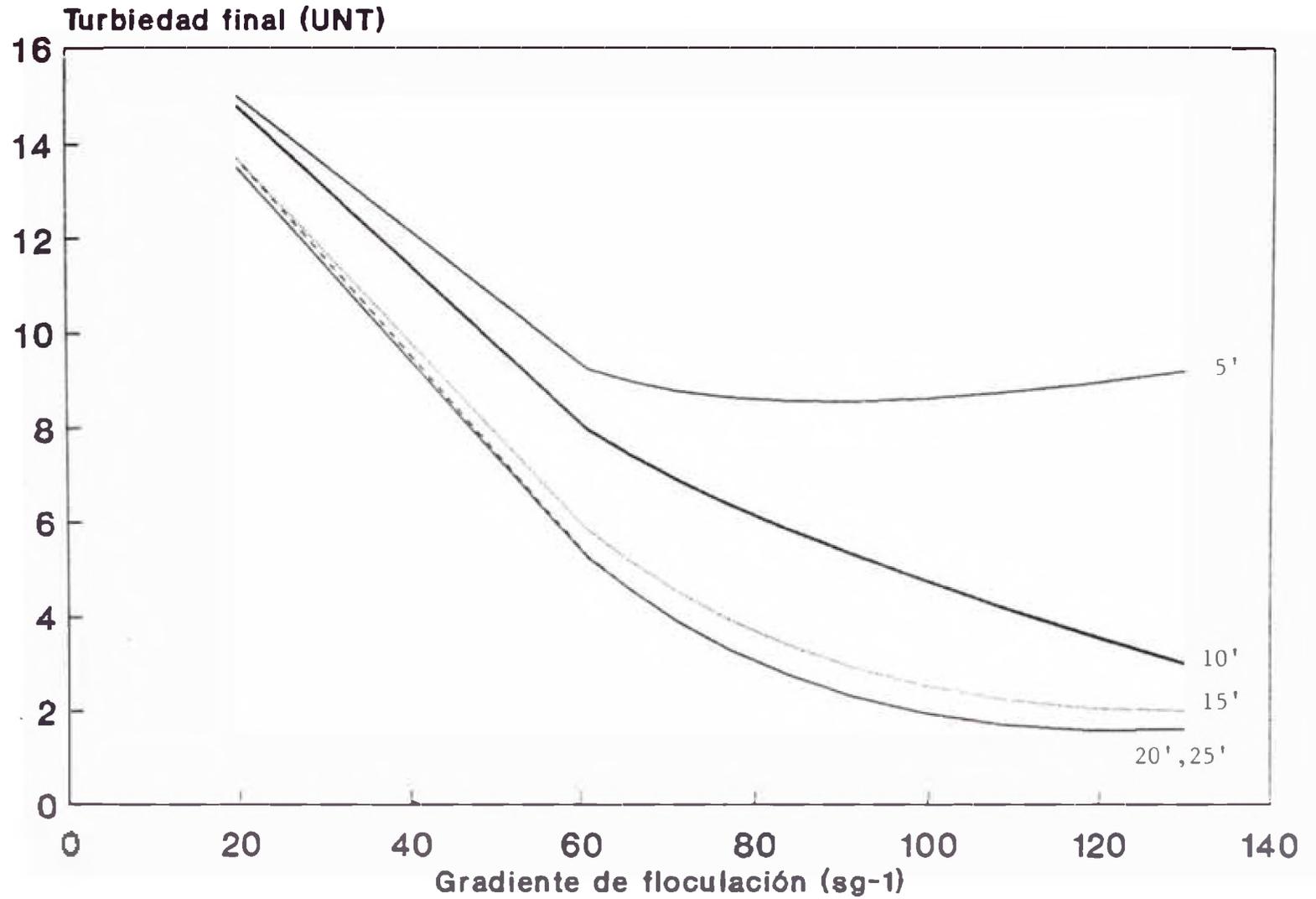


Figura 9.IV.11

CORRELACION DE GRADIENTES Y TIEMPOS OPTIMOS DE FLOCULACION

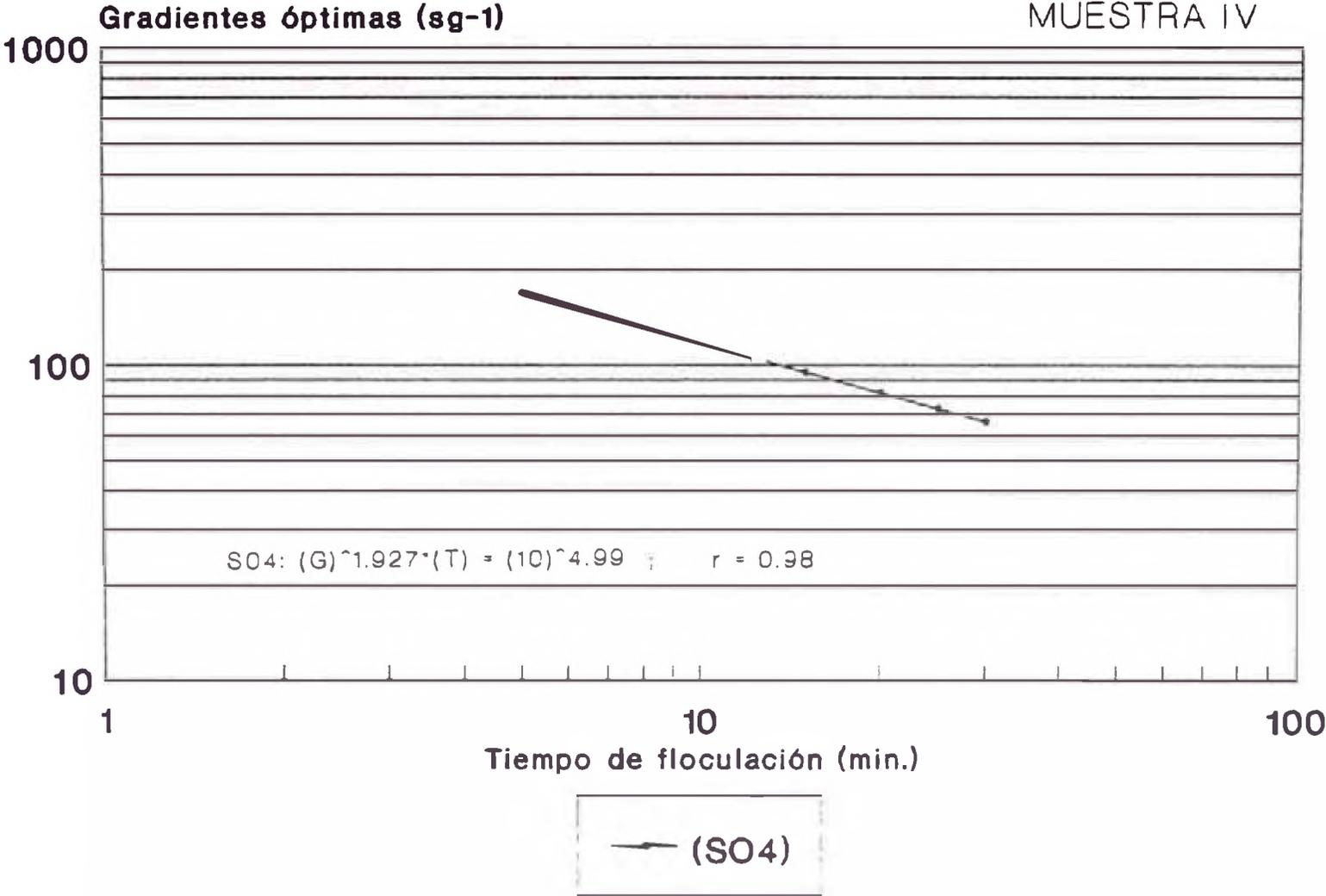


Figura 9.IV.12

EFICIENCIA DE SEDIMENTABILIDAD MUESTRA IV (SO4)

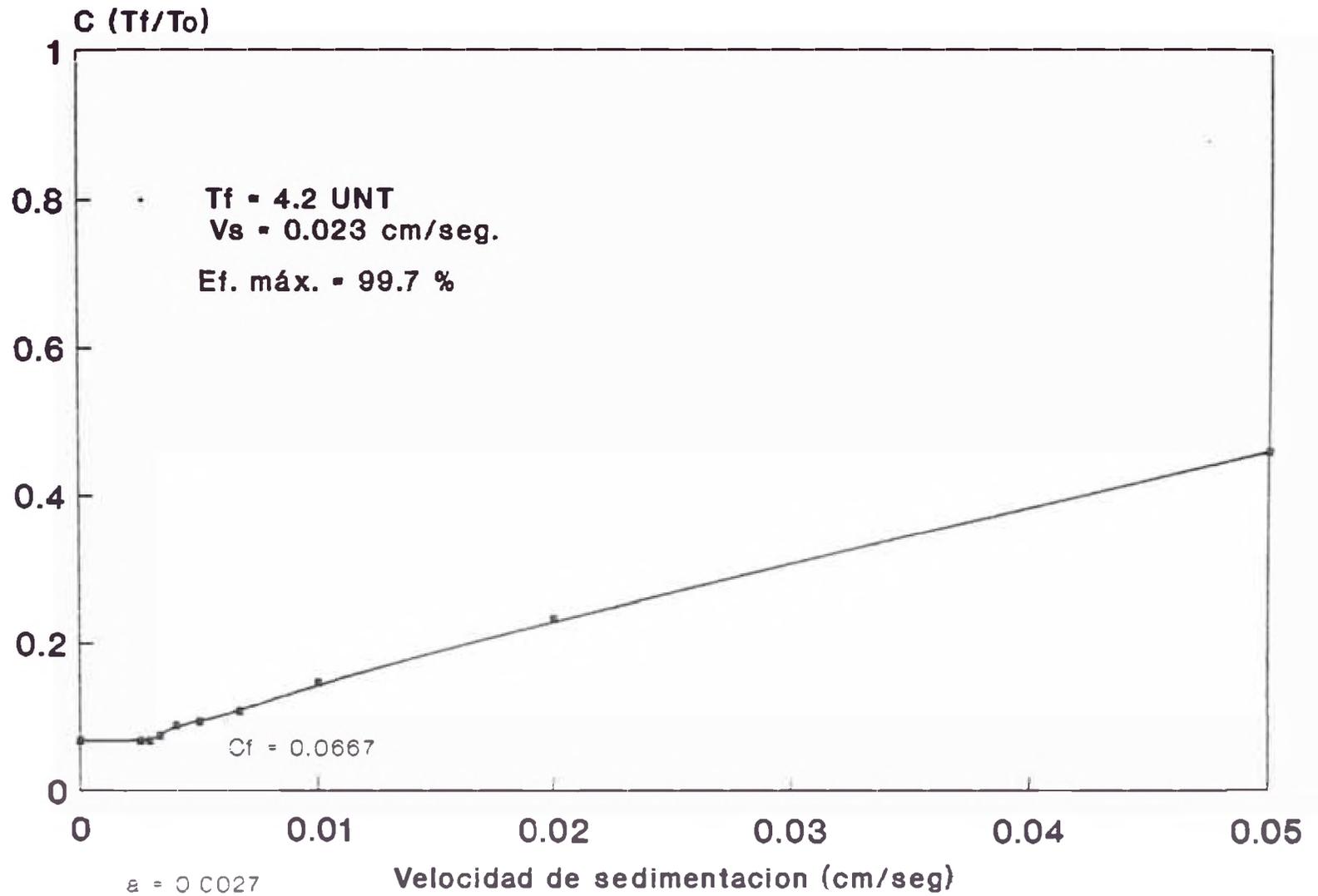


Figura 9.IV.13

EFICIENCIA DE SEDIMENTABILIDAD MUESTRA IV (RED. SO4 + ALM)

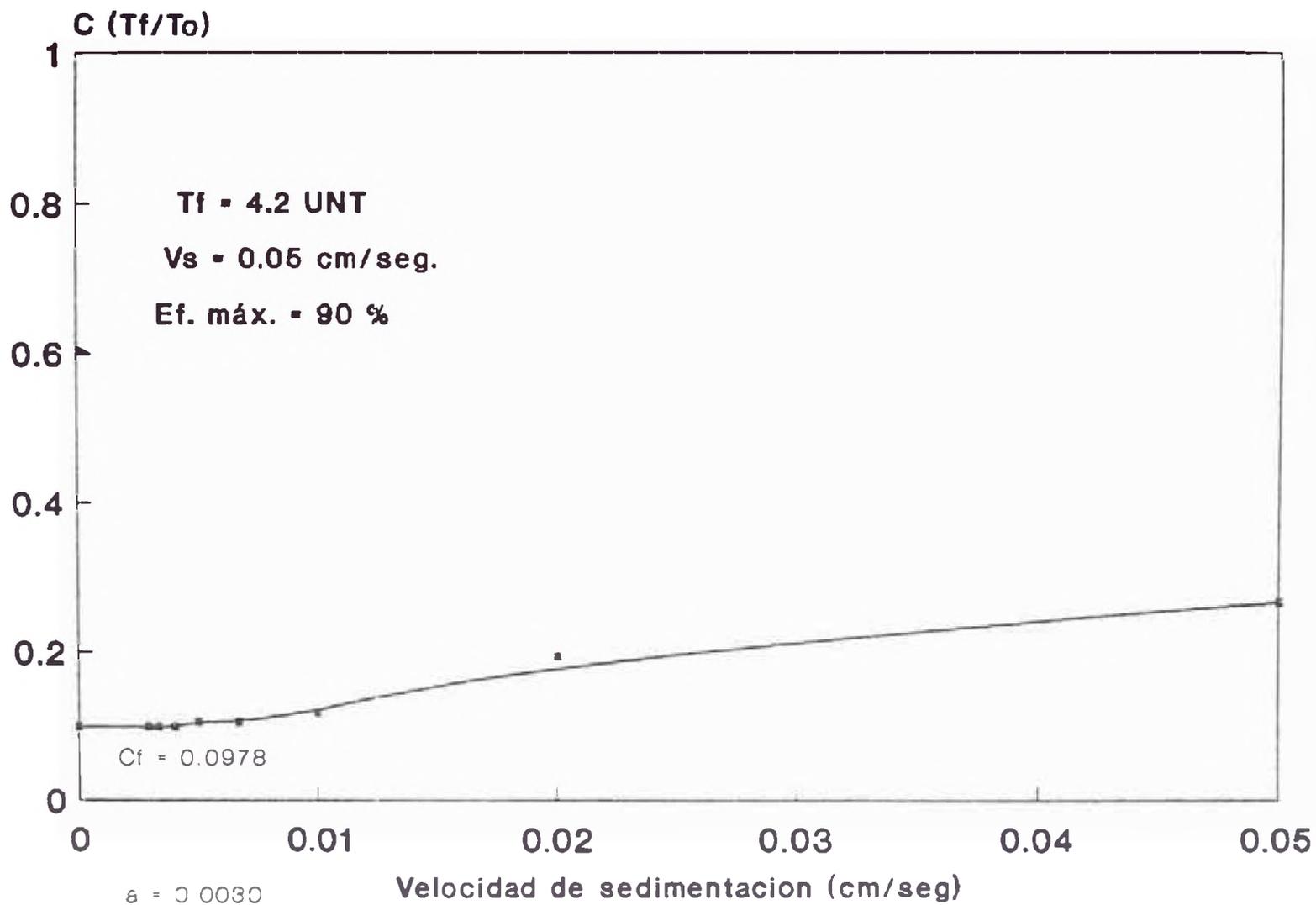


Figura 9.IV.14

EFICIENCIA REMOCIONAL MUESTRA IV

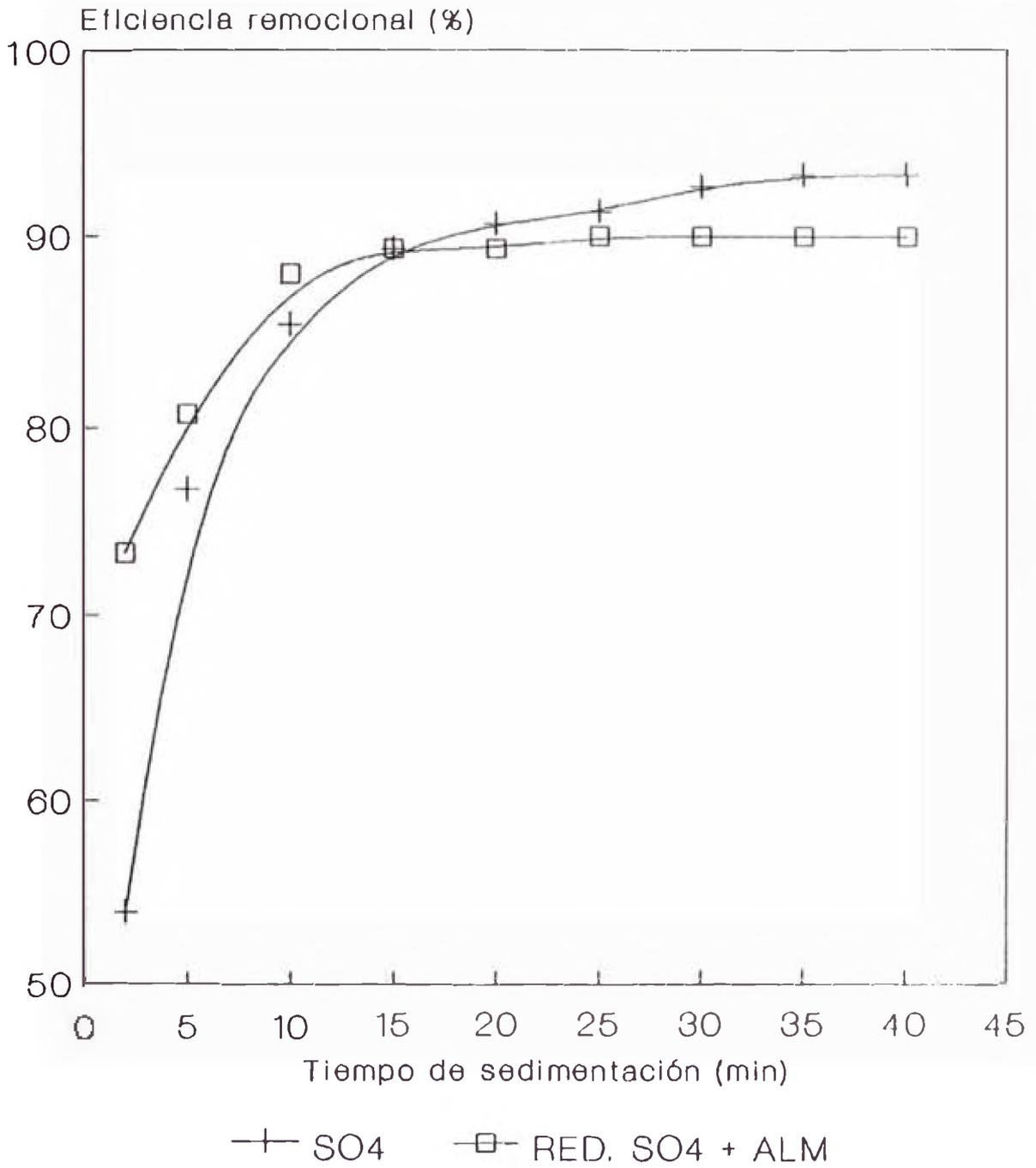


Figura 9.IV.15

10. EMPLEO DEL ALMIDON SELECCIONADO CON AGUA NATURAL

10. EMPLEO DEL ALMIDON SELECCIONADO CON AGUA NATURAL

10.1 PROCEDENCIA DEL AGUA NATURAL

Agua del Río Rímac

La Planta de tratamiento de aguas "Gustavo Laurie Solis", se encuentra localizada en lo que hoy se denomina "La Atarjea". Esta zona está ubicada a orillas del río Rímac, a 6 Km. de la Plaza de Armas de Lima, y al pie de los cerros Santa Rosa y Quiróz, en un terreno de aproximadamente 120 hectáreas.

La Planta trata las aguas del río Rímac, cuya turbiedad promedio es muy variable durante el año: según el Cuadro estadístico presentado (Anexo N° 2), durante el 65% del año se presentan turbiedades medias de 60 UNT, correspondientes a los meses de Mayo a Noviembre, aproximadamente. Las turbiedades promedio altas, mayores de 60 UNT se presenta generalmente durante los meses de Diciembre, Enero, Febrero, Marzo y Abril, lo que equivale a un 35% del año. En algunas ocasiones se han registrado picos de turbiedad, llegándose hasta un máximo de 100,000 UNT.

La Figura 10.1, muestra las variaciones promedio mensual de turbiedad, alcalinidad y pH del río Rímac, durante el año 1989, año en que se realizó el presente trabajo. El Cuadro N° 1 del Anexo 2, presenta los valores puntuales

de turbiedad promedio, los que dieron origen a la Figura 10.1.

La capacidad de la planta de tratamiento, durante el período de trabajo fue de 46 m³/hora (12.8 m³/s), realizándose la producción en dos etapas:

Etapa 1 (Planta N° 1): En 1917, se crea la Junta de Agua Potable de Lima, bajo la cual se inicia la construcción de las galerías filtrantes, y del primer sistema de tratamiento de aguas. Pero, su funcionamiento data de 1957, y está esencialmente compuesta por unidades hidráulicas (éstas son más antiguas que las patentadas) de operación manual a excepción de los decantadores que son de patente DEGREMONT y últimamente las unidades de filtración que están siendo remodeladas para que su funcionamiento sea accionado por tableros eléctricos de patente DEGREMONT.

Etapa 2 (Planta N°2): Puesta en funcionamiento en el año 1983. Es una Planta compacta DEGREMONT, en todos sus componentes, y operada eléctricamente, cuya producción hasta 1989, era de 18,000 m³/hora (5 m³/s).

10.2 CARACTERISTICAS DEL AGUA NATURAL

Las características del agua natural utilizado para determinar los parámetros de floculación y sedimentación fueron

las siguientes:

Turbiedad inicial = 15 UNT

pH inicial = 7.75 uPH

Alcalinidad inicial = 108 ppm como CaCO_3

Conductividad específica inicial = 600 umohs

Dureza total inicial = 128 ppm como CaCO_3

10.3 PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

La muestra de agua natural analizada presenta características similares a la Muestra II, preparada artificialmente, siendo la alcalinidad de 108 ppm como CaCO_3 .

La dosis óptima de sulfato de aluminio ocurre con 20 mg/l, correspondiendo a una turbiedad final de 1.8UNT, como se aprecia en la Figura 10.3, en este caso la alcalinidad produce un efecto amortiguador al cambio brusco de pH, al igual que las muestras de agua artificial en donde se mantuvo un valor alto de alcalinidad.

La Figura 10.4, muestra que la concentración óptima es de 0.5%, la misma obtenida para la Muestra II, mejorando el proceso de coagulación-floculación.

No fue necesario variar el pH del agua cruda, debido a que los mejores resultados, al final de la decantación, fueron

obtenidos dentro del rango de realización de la coagulación [6.5-8.5]. La Figura 10.5, justifica la influencia de este parámetro.

Con 20 mg/l de sulfato de aluminio, las curvas de determinación de tiempos óptimos de floculación (Figura 10.6), presentan el resultado más favorable, alcanzándose valores de remoción de turbiedad relativamente altos, 91.3%.

En base a la Figura 10.7, fue posible determinar los parámetros cinéticos para el sulfato de aluminio, actuando solo:

$$G^* = 61 \text{ s}^{-1}$$

$$G^* t_{\text{floc}} = 73,200$$

$$(T_o/T_f)_{\text{m}ax.} = 9.80$$

$$K_A = 7.37 \times 10E^{-05}$$

$$K_B = 1.23 \times 10E^{-07} \text{ seg.}$$

$$K_C = 1.67 \times 10E^{-03} \text{ seg.}$$

La Figura 10.8, presenta las gradientes óptimas de velocidad para distintos tiempos de floculación, determinándose con estos valores la ecuación de regresión descrita a continuación:

$$G^{1.43} \times t = 10^{3.43}$$

siendo: $r = 0.85$

La dosis óptima de almidón de papa (Figura 10.9), fue de 0.2 mg/l, cuando es adicionado conjuntamente con 20 mg/l de sulfato de aluminio. (Se puede apreciar que conforme se incrementa la dosis de almidón, aumenta el pH del agua decantada).

Nótese que la calidad del agua decantada es mucho mayor que cuando se utiliza sólo sulfato de aluminio, pues los valores de turbiedad final son menores.

Además, fue posible reducir en 30% la dosis de sulfato de aluminio, como se aprecia en la Figura 10.10, pudiendo aumentar esta reducción en función de la calidad del agua tratada. Al igual que en el caso anterior, la calidad del efluente fue mejor que aquella en donde sólo se empleó sulfato de aluminio.

Las Figuras 10.11 y 10.12, permiten determinar los parámetros cinéticos de floculación, para las mejores condiciones producidas por el trabajo conjunto de aluminio y almidón, siendo los siguientes:

$$G^* = 62 \text{ s}^{-1}$$

$$T \text{ floc} = 20 \text{ min.}$$

$$\begin{aligned}G t_{floc} &= 74,400 \\(T_o/T_f)_{\max} &= 6.7 \\K_A &= 6.31 \times 10.E^{-05} \\K_B &= 1.52 \times 10E^{-07} \text{ seg.} \\K_C &= 2.41 \times 10E^{-03} \text{ Seg.}\end{aligned}$$

Si comparamos resultados, se aprecia que dichos parámetros permanecen casi invariables, siendo la eficiencia de floculación cuando se usa el almidón como coadyuvante.

La ecuación de correlación cuando son empleados ambos productos es la siguiente:

$$G^{1.54} \times t = 10^{4.06}$$

para un valor de $r = 0.95$.

La curva de eficiencia de sedimentabilidad, Figuras 10.15 y 10.16, dan a notar que cuando se utiliza el almidón como auxiliar de floculación, se obtienen velocidades de sedimentación de flóculo 1.89 mayores que cuando se utiliza sólo sulfato de aluminio, reflejándose en un alto grado de remoción de partículas, 94.67%.

En las curvas de eficiencia remocional, Figuras 10.17,

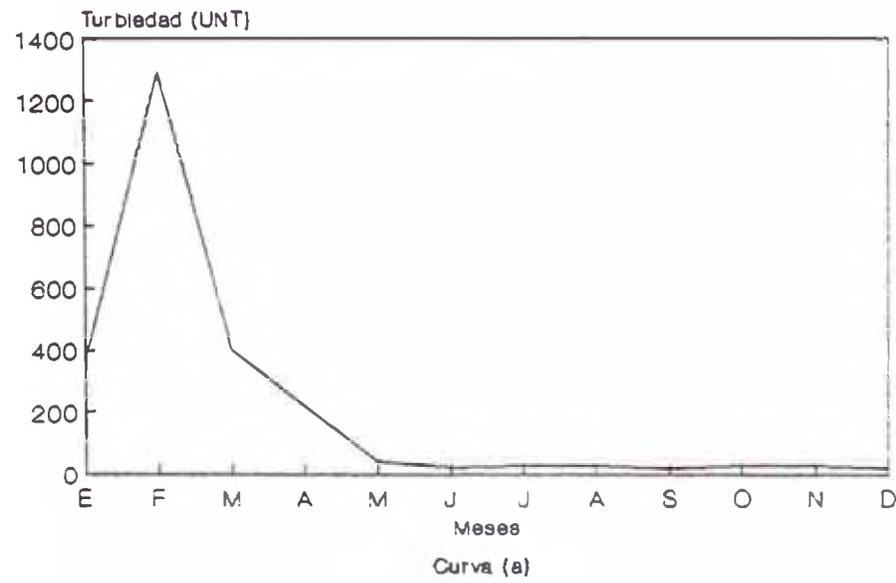
durante los primeros 8 minutos de decantación, el almidón de papa ejerce un efecto favorable, para luego de allí ser el sulfato de aluminio, quien actuando sólo produzca una leve mejoría remocional.

10.4 CONCLUSIONES

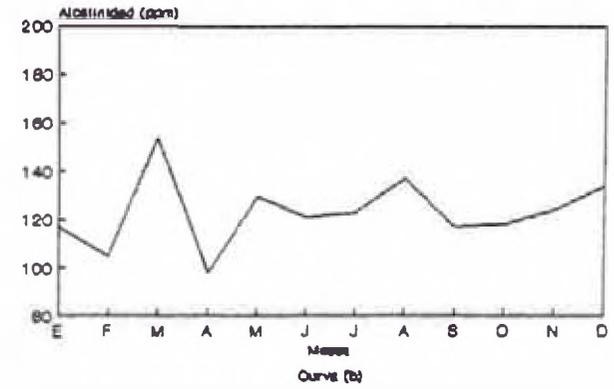
Al aplicar el almidón de papa, al agua procedente del Río Rímac, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Se puede obtener un ahorro del 30% en la dosis de sulfato de aluminio, cuando se aplica conjuntamente con almidón de papa.
- Se acentúa la tasa de aglomeración de partículas, y la resistencia a la ruptura del flóculo.
- En igualdad de condiciones: calidad del efluente y área del sedimentador, es posible tratar casi el doble de caudal, ya que la tasa se incrementa en 1.89 veces.

**VARIACION PROMEDIO MENSUAL DE TURBIEDAD
RIMAC - 1989**



**VARIACION PROMED. MENSUAL DE ALCALINIDAD
RIMAC - 1989**



**VARIACION PROMEDIO MENSUAL DE PH
RIMAC - 1989**

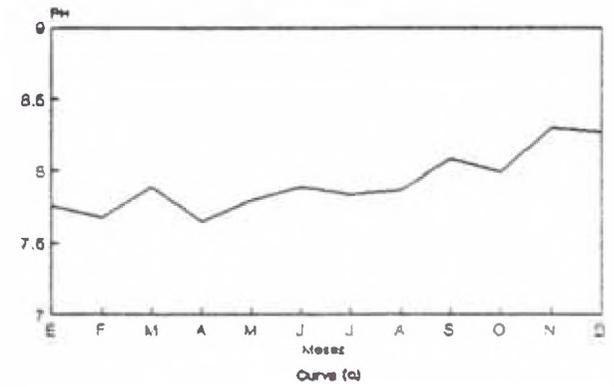
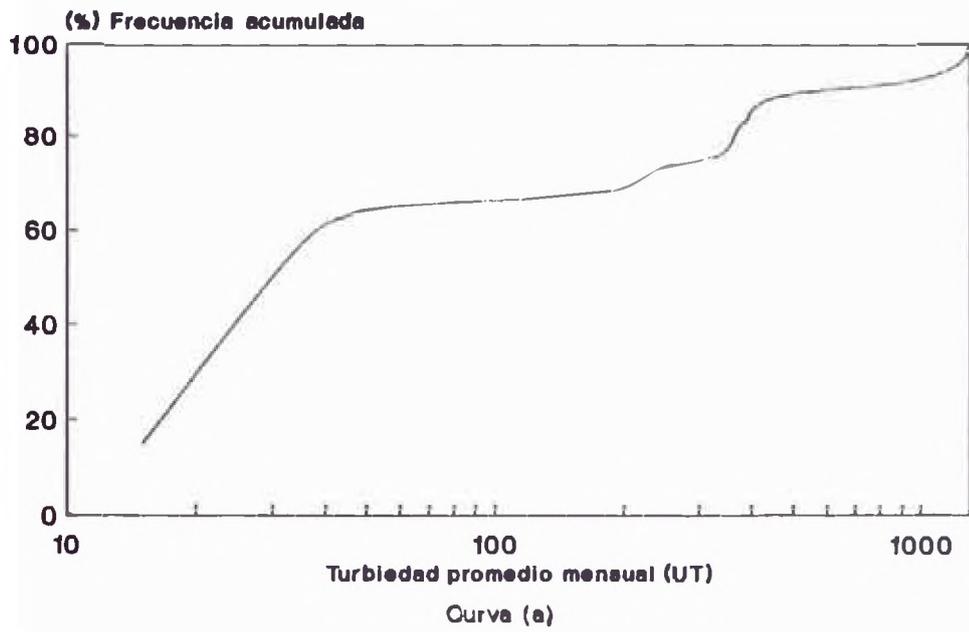


Figura 10.1

CURVA DE FRECUENCIA ACUMUL. DE TURBIEDAD RIO RIMAC - 1989



CURVA DE FRECUENCIA ACUM. DE ALCALINIDAD RIO RIMAC - 1989

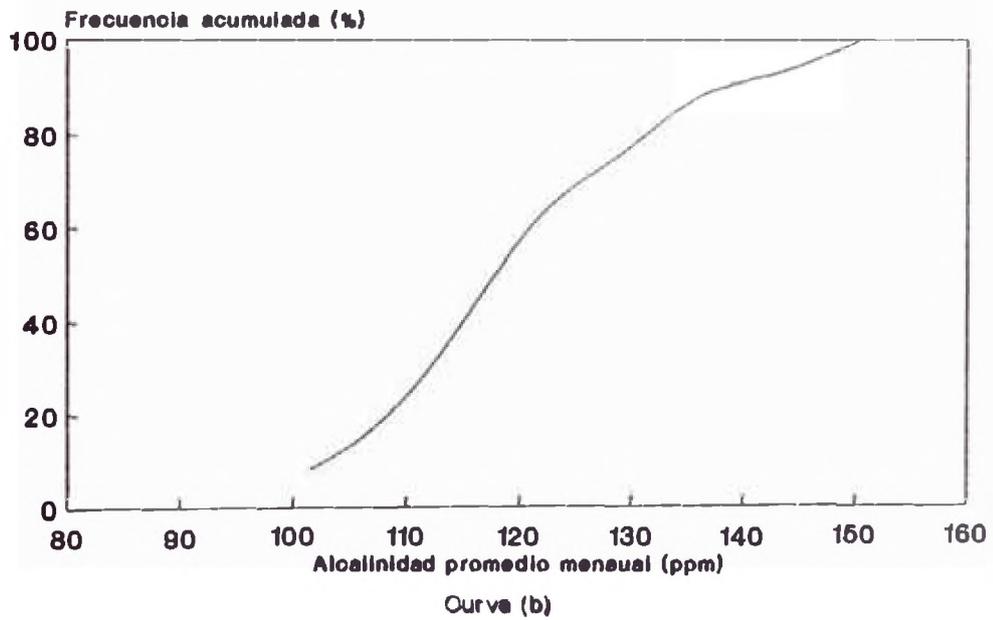


Figura 10.2

DOSIS OPTIMA DE COAGULANTE MUESTRA RIMAC

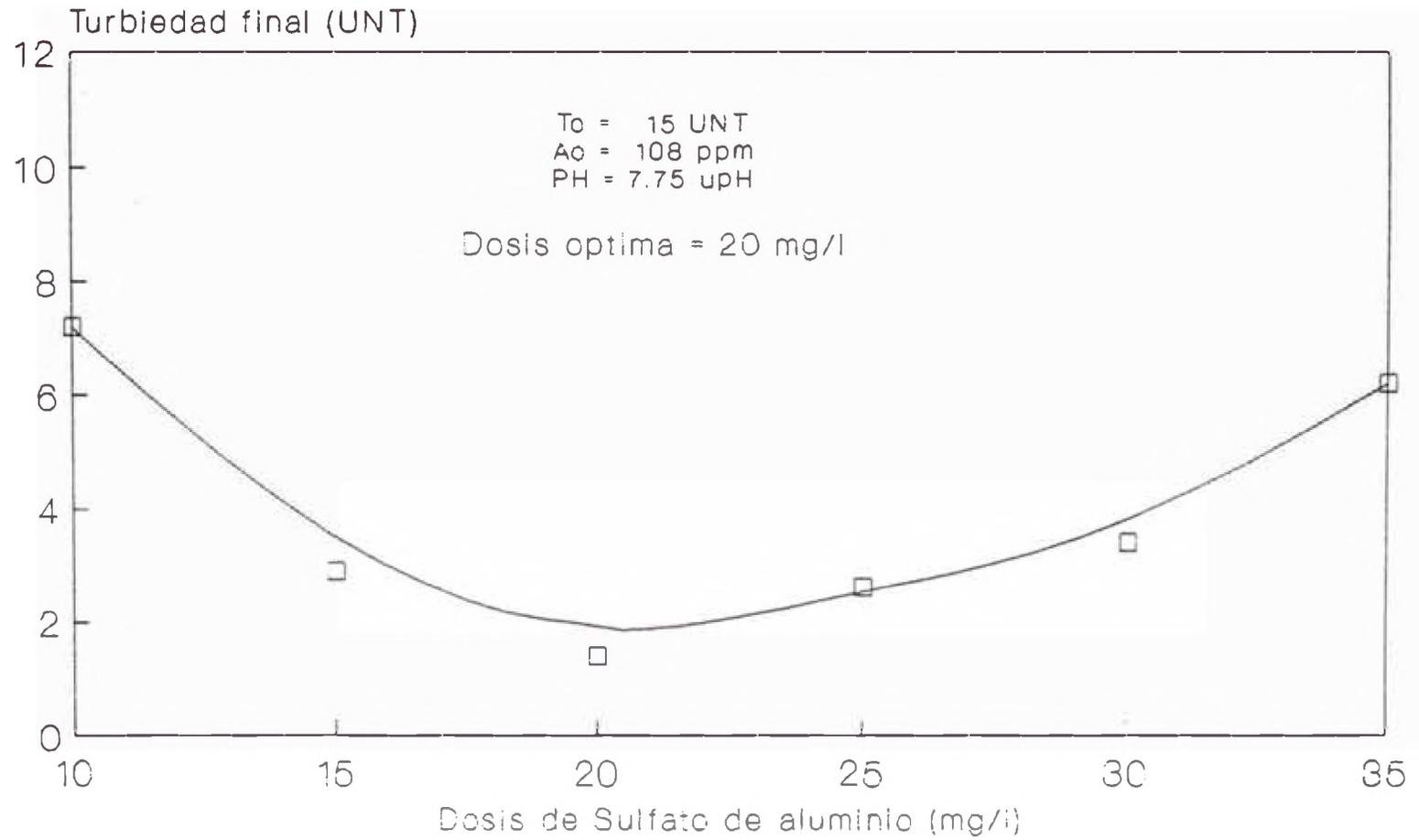


Figura 10.3

CONCENTRACION OPTIMA DE COAGULANTE MUESTRA RIMAC

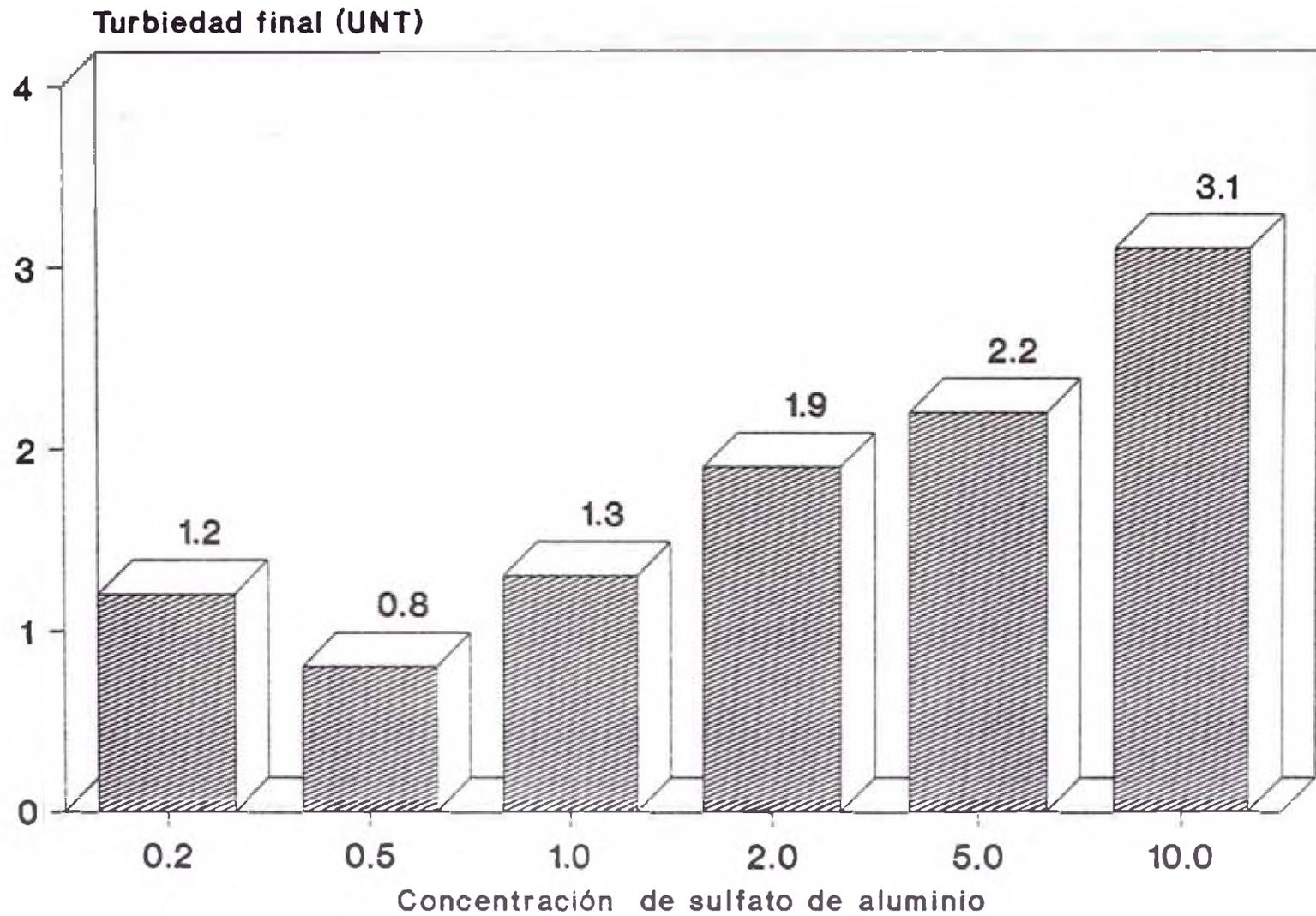


Figura 10.4

PH OPTIMO DE SULFATO DE ALUMINIO MUESTRA RIMAC

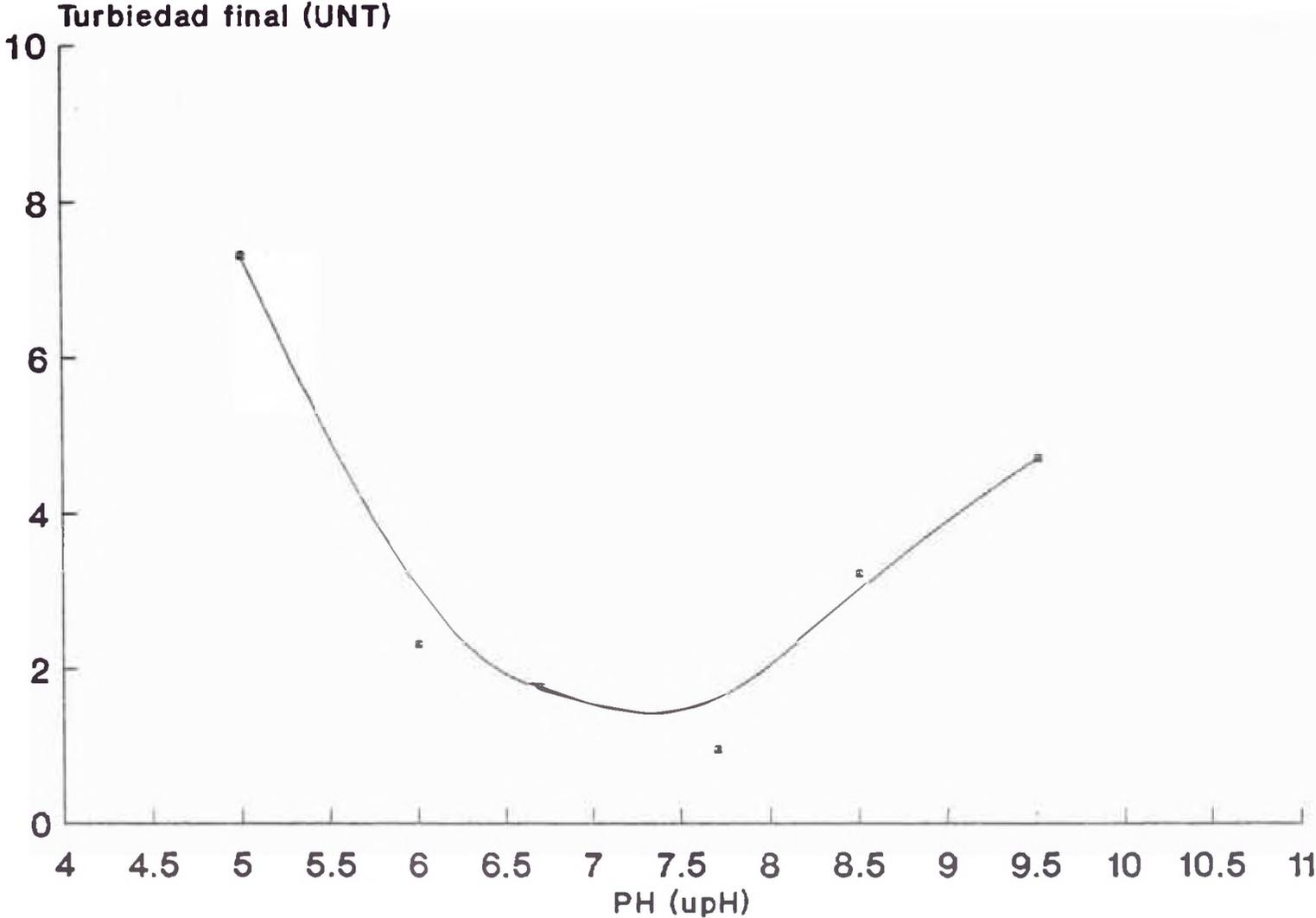


Figura 10.5

TIEMPOS OPTIMOS DE FLOCULACION

MUESTRA RIMAC (SO4)

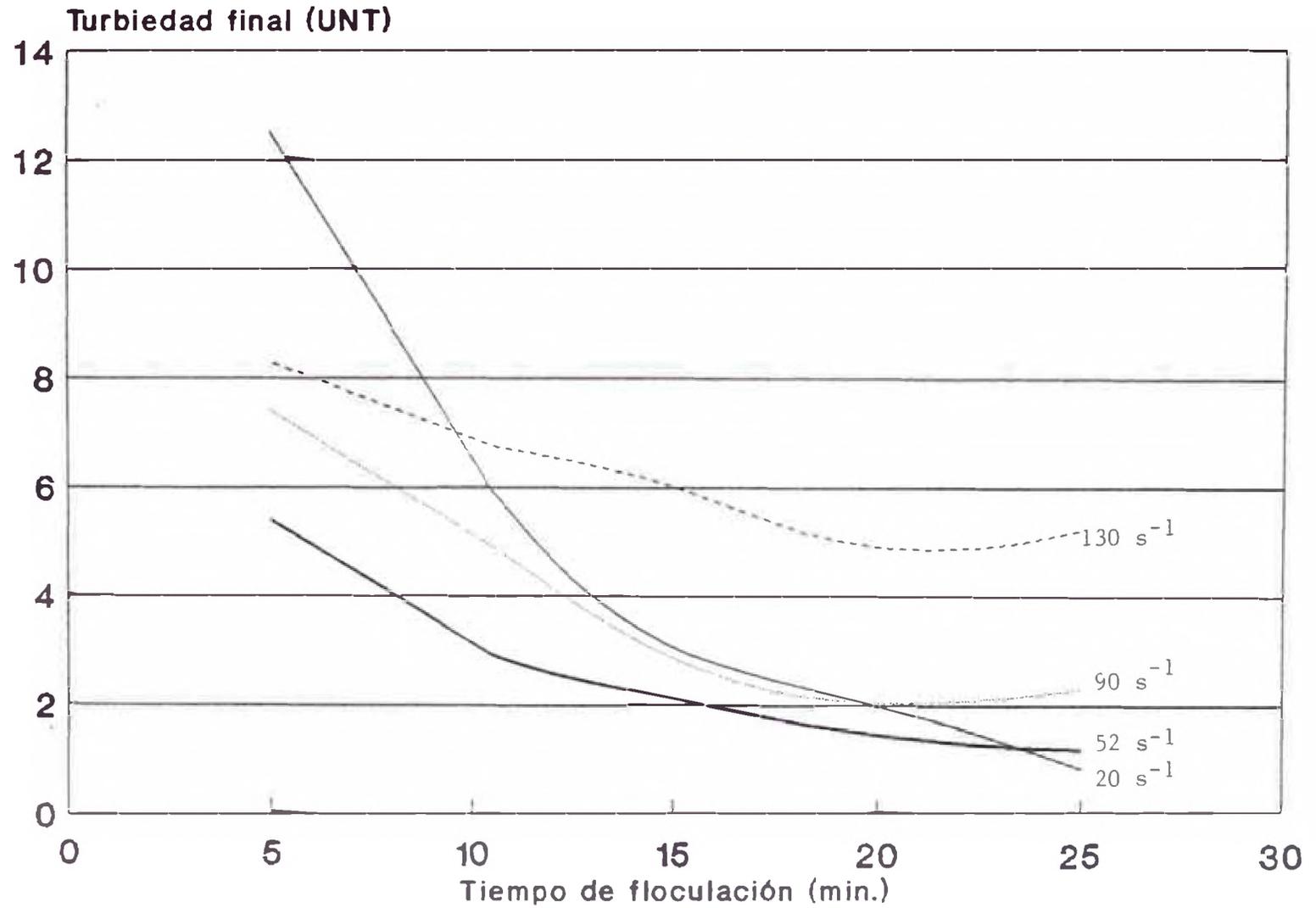


Figura 10.6

CURVA DE EFICIENCIA DE FLOCULACION EN FUNCION DE LA GRADIENTE (SO4)

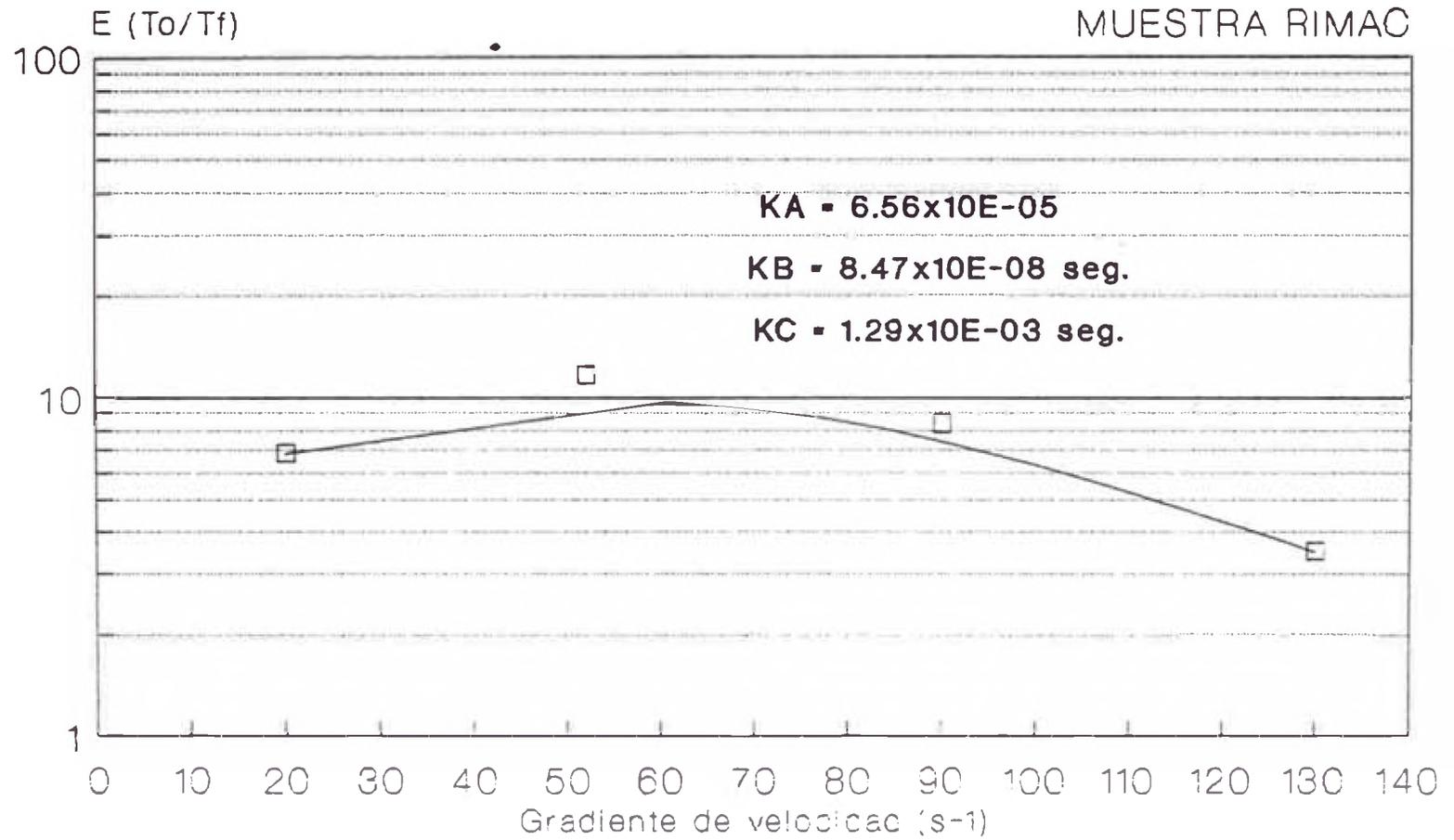


Figura 10.7

GRADIENTES OPTIMOS DE FLOCULACION

MUESTRA RIMAC (SO4)

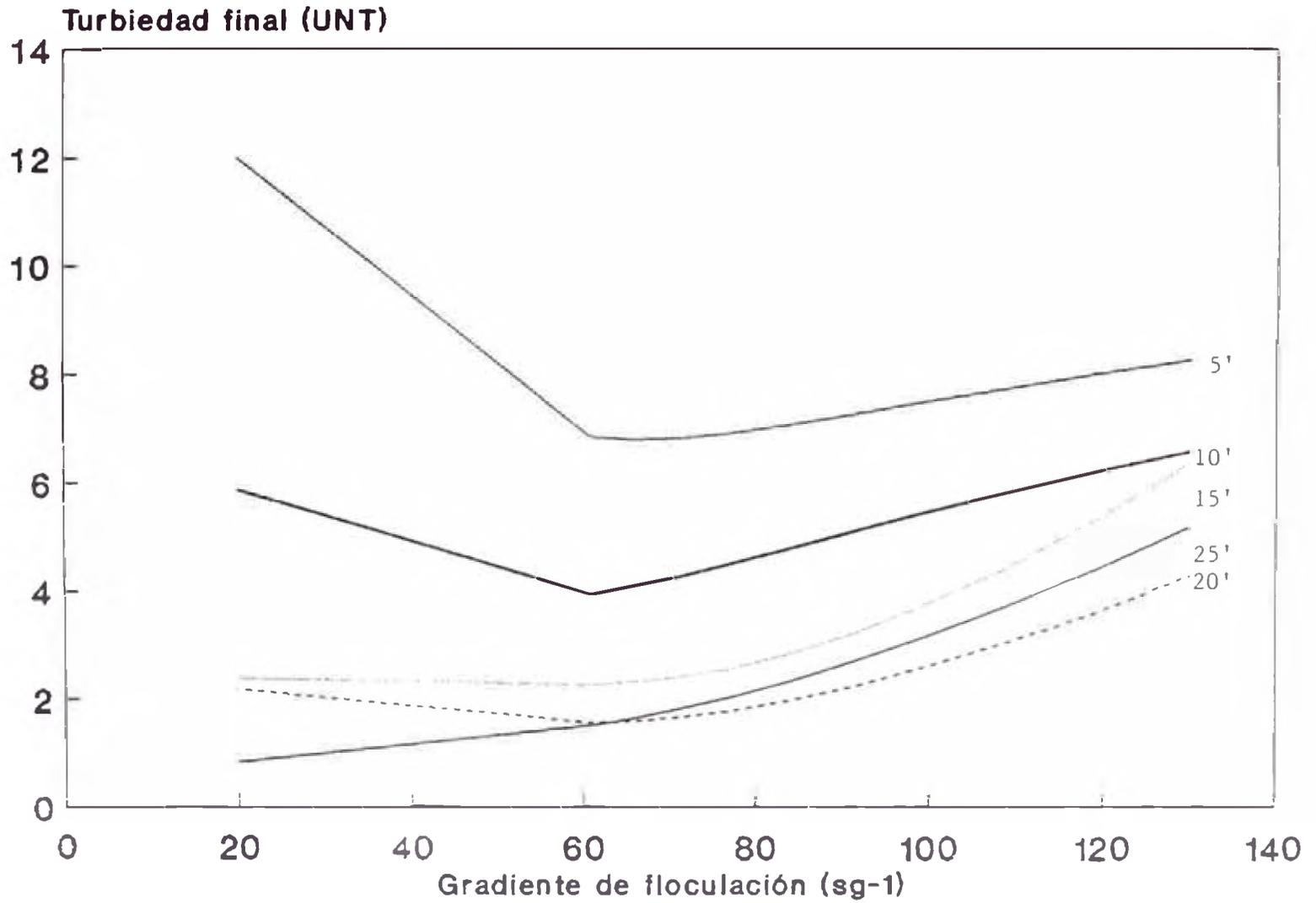


Figura 10.8

DOSIS OPTIMA DE ALMIDON

MUESTRA RIMAC

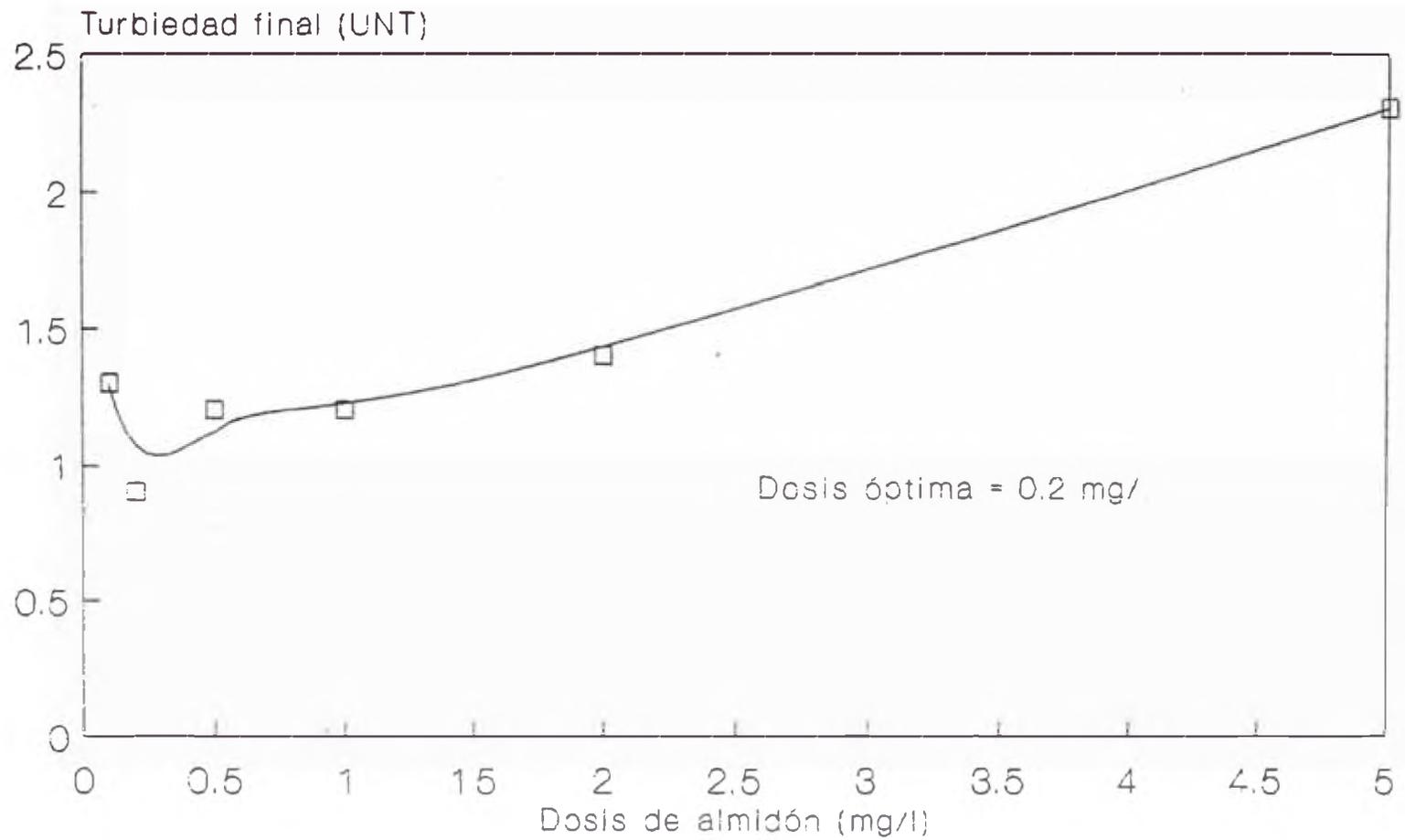


Figura 10.9

REDUCCION DE DOSIS DE SULFATO DE ALUMIN. MUESTRA RIMAG

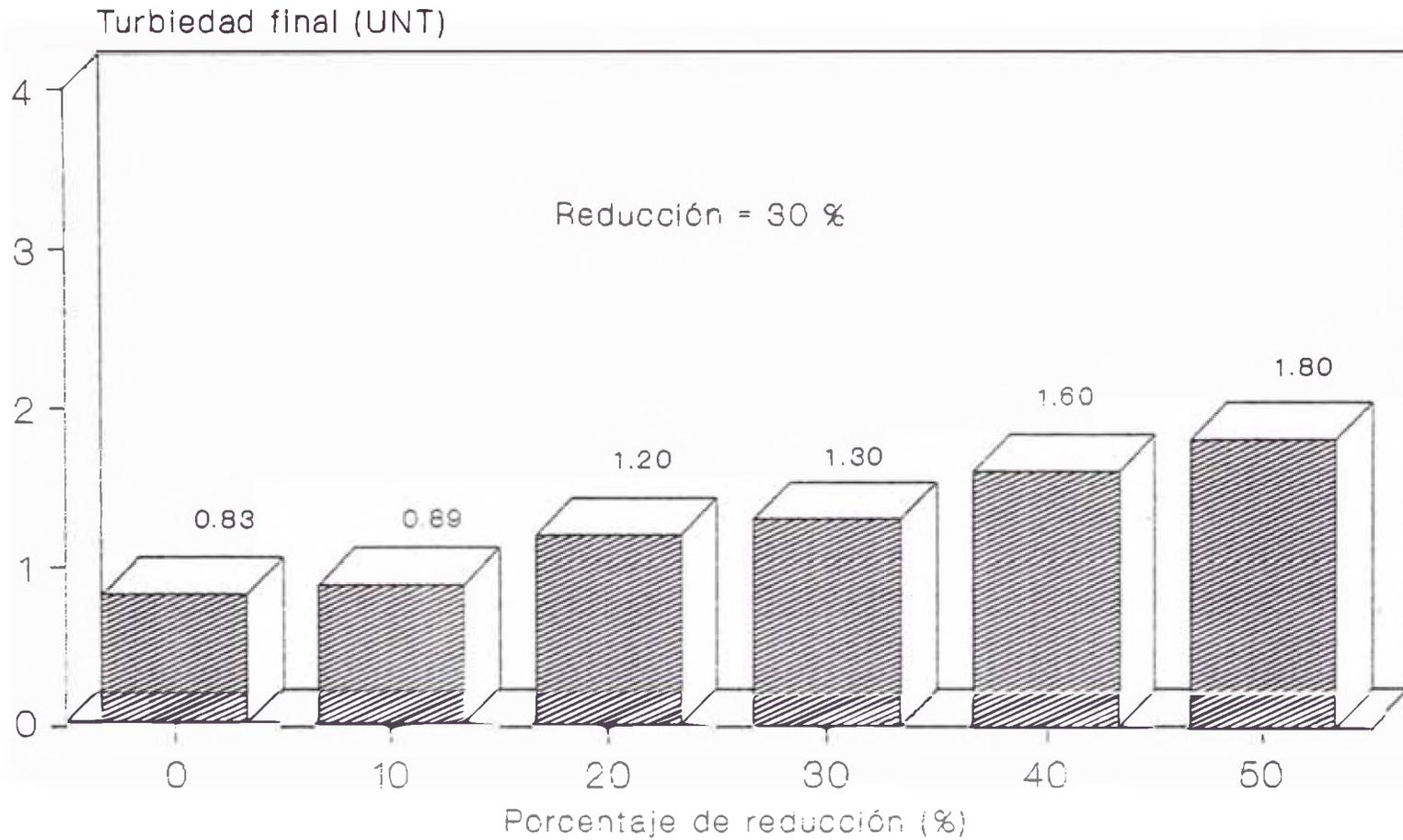


Figura 10.10

TIEMPOS OPTIMOS DE FLOCULACION

MUESTRA RIMAC (RED. SO4 + ALM)

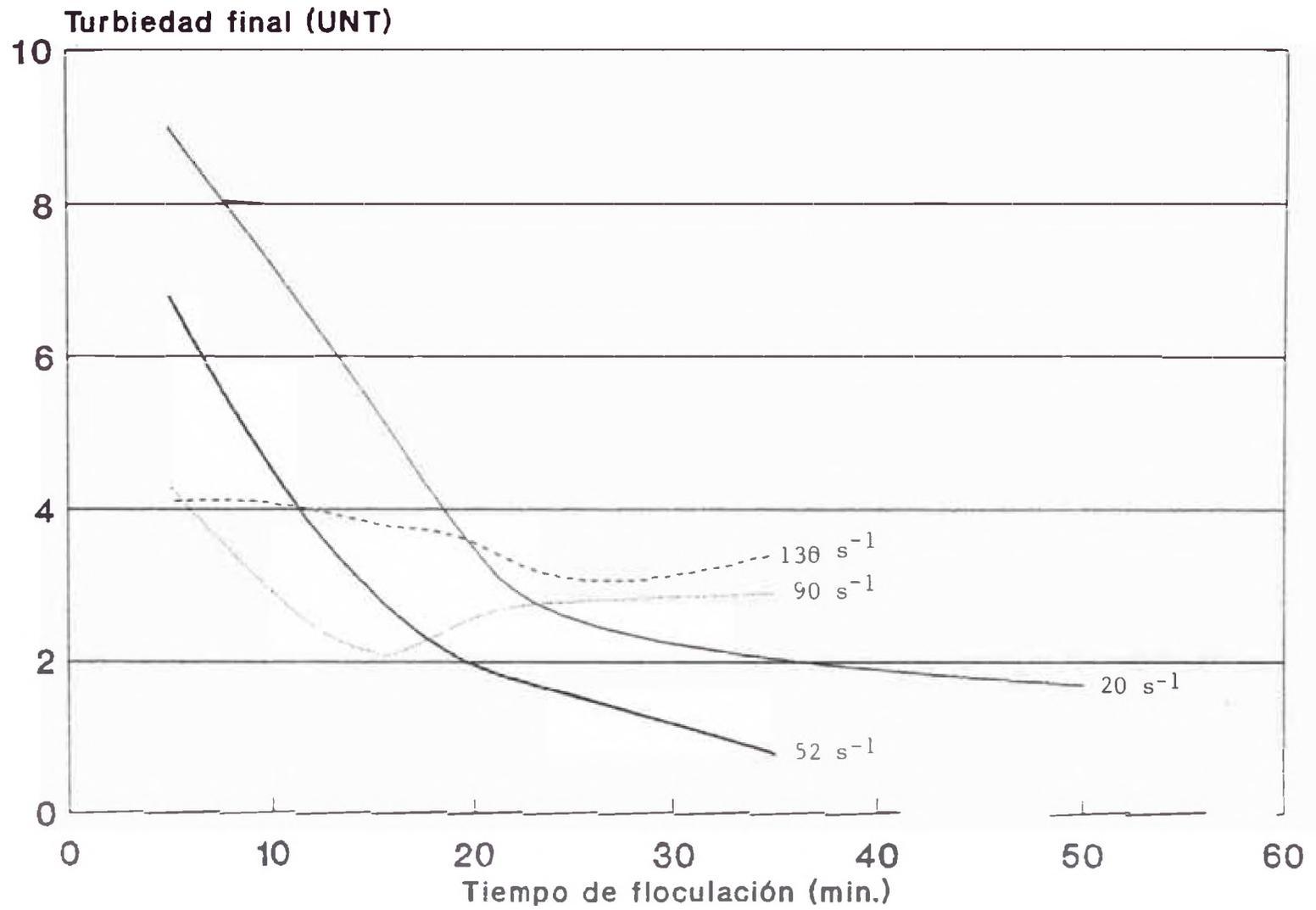


Figura 10.11

CURVA DE EFICIENCIA DE FLOCULACION EN FUNCION DE LA GRADIENTE (RED. SO4 + ALM)

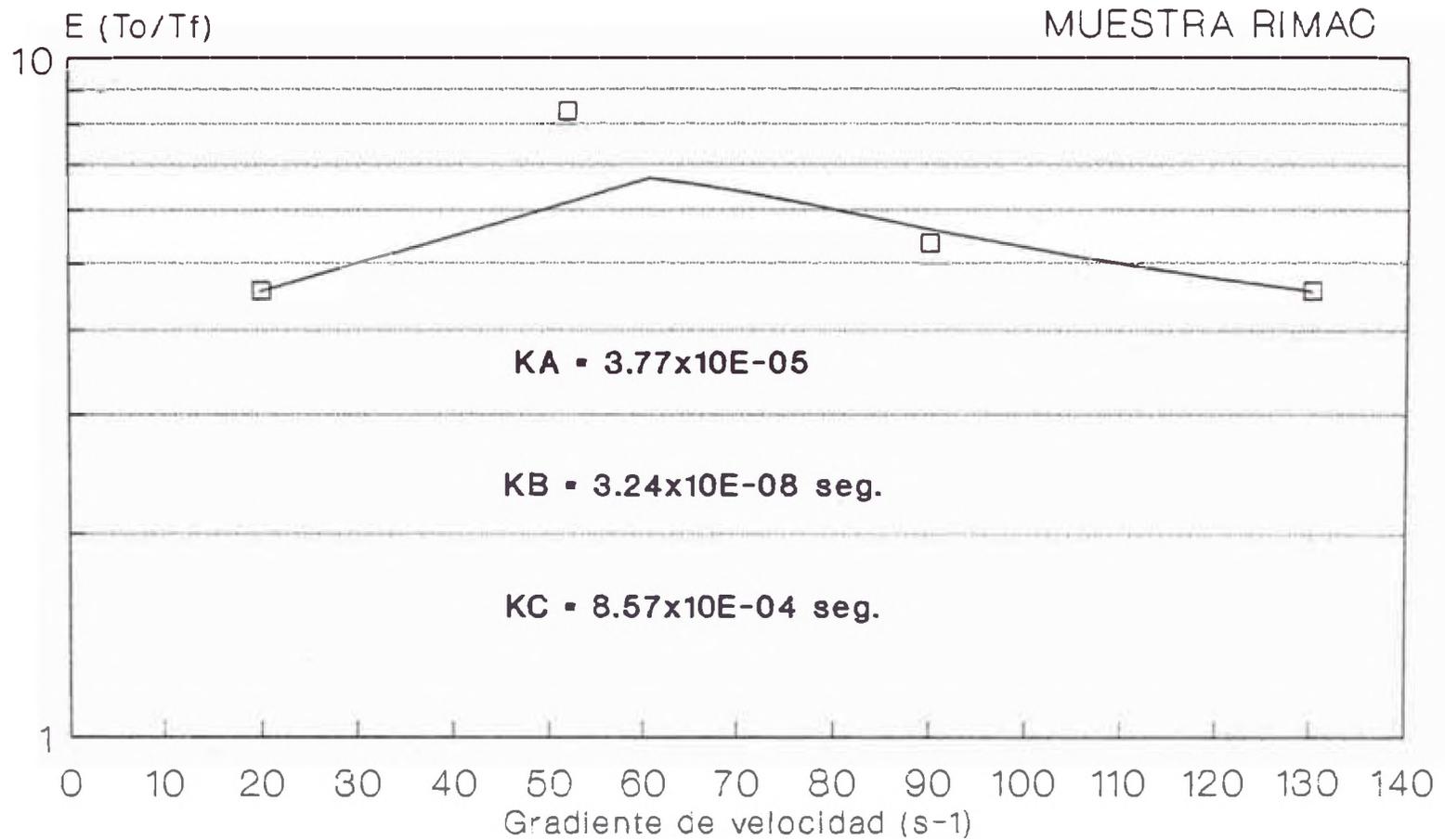


Figura 10.12

GRADIENTES OPTIMOS DE FLOCULACION

MUESTRA RIMAC (RED. SO4 + ALM)

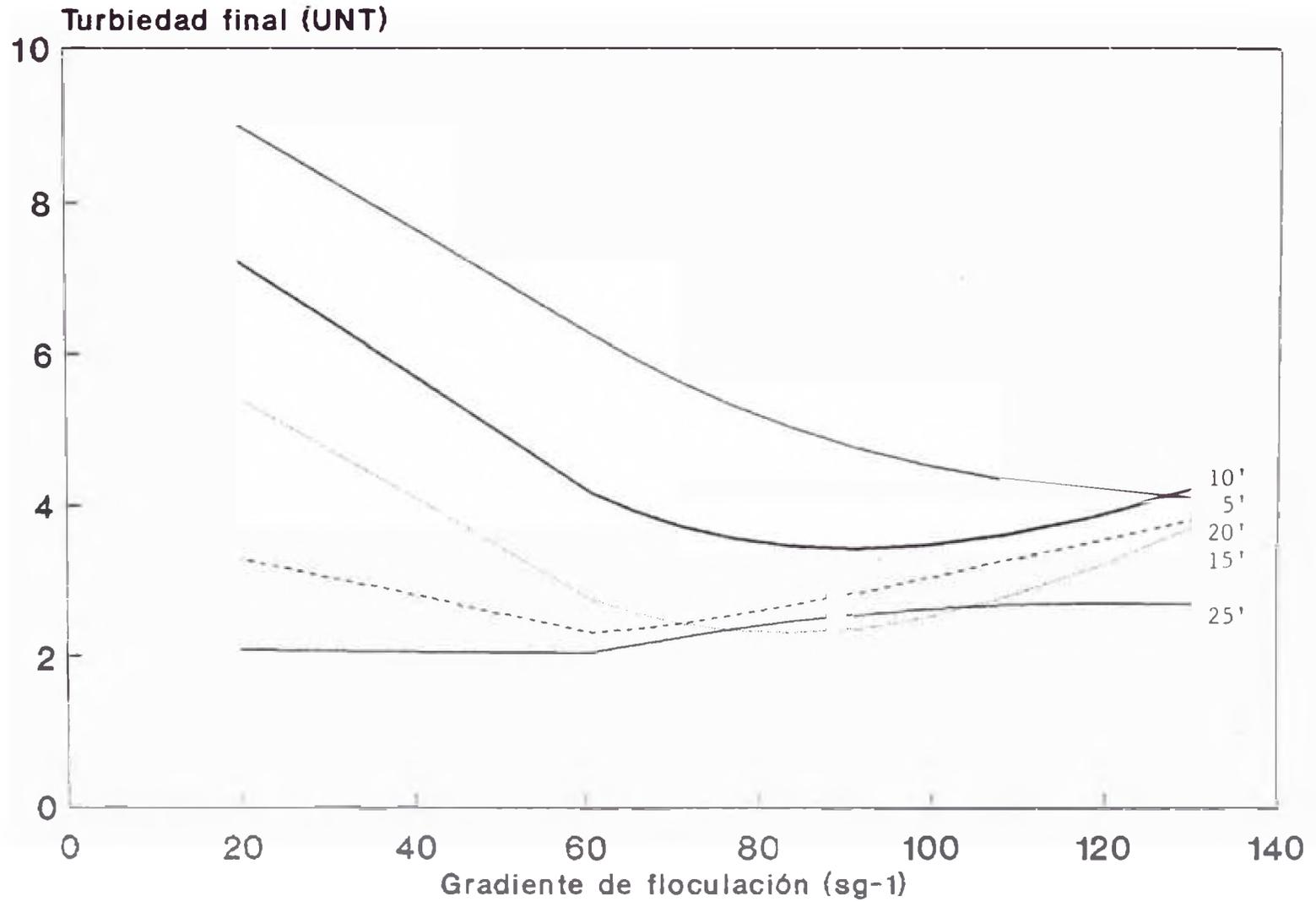


Figura 10.13

CORRELACION DE GRADIENTES Y TIEMPOS OPTIMOS DE FLOCULACION

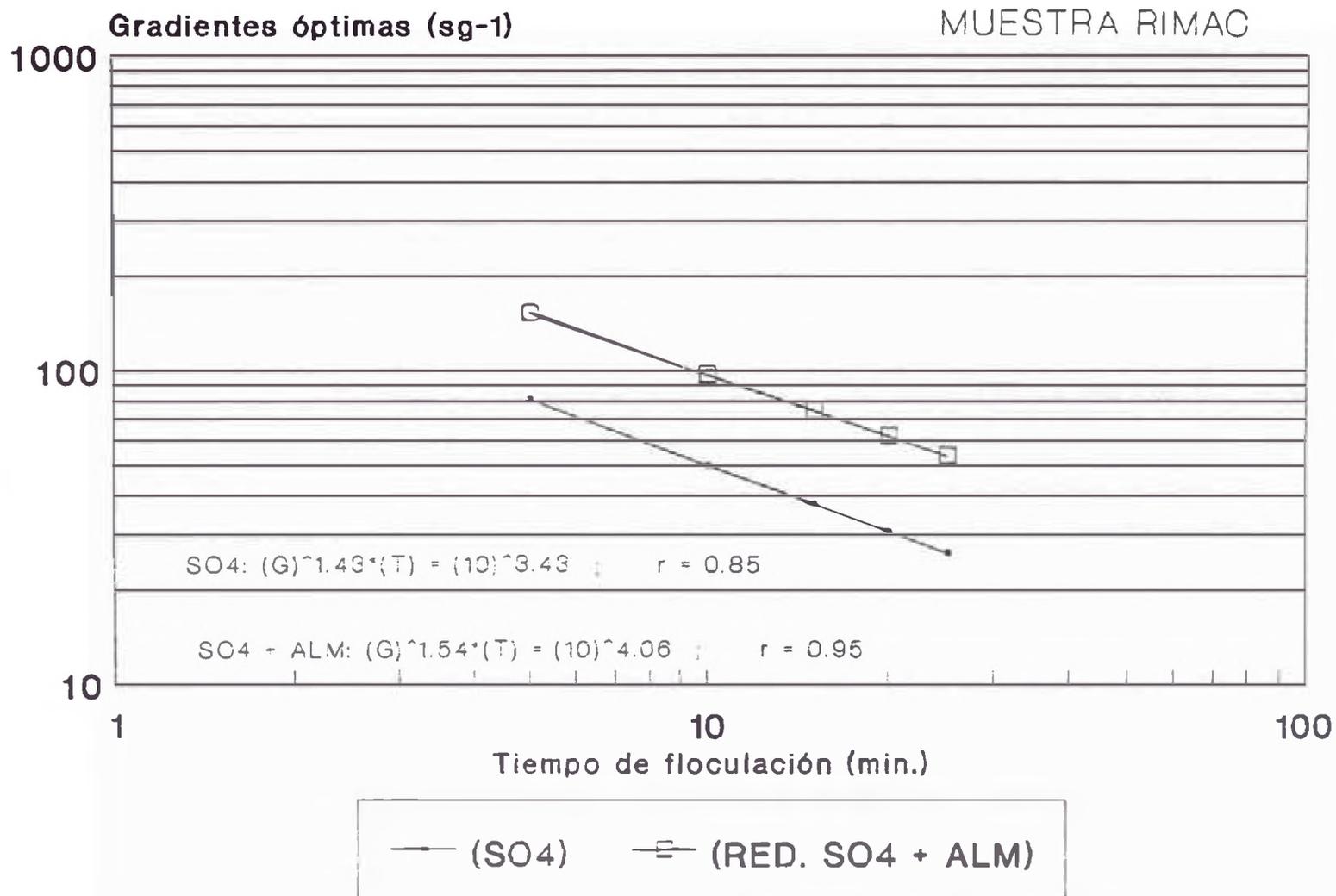


Figura 10.14

EFICIENCIA DE SEDIMENTABILIDAD MUESTRA RIMAC (SO4)

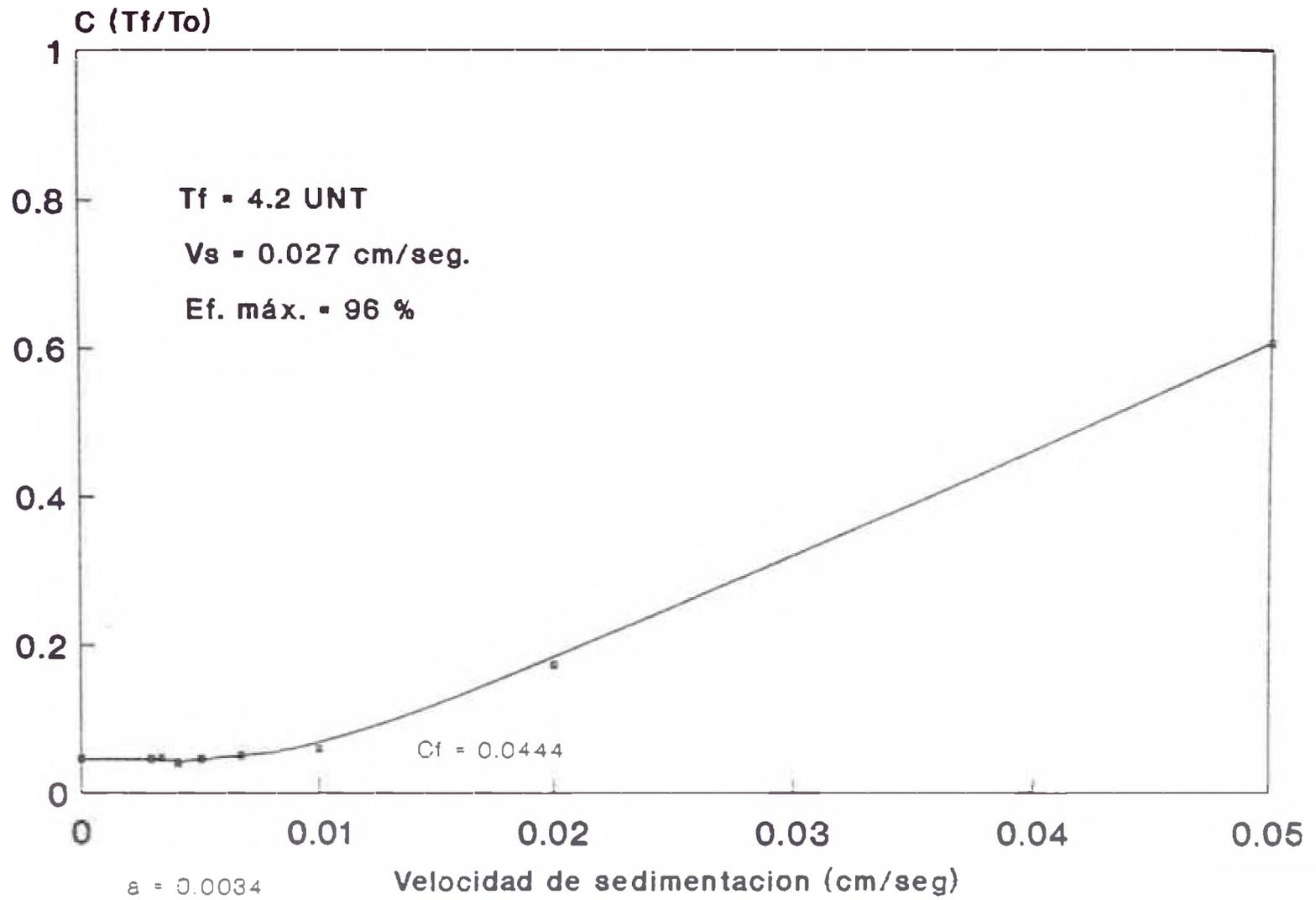


Figura 10.15

EFICIENCIA DE SEDIMENTABILIDAD

MUESTRA RIMAC (RED. SO₄ + ALM)

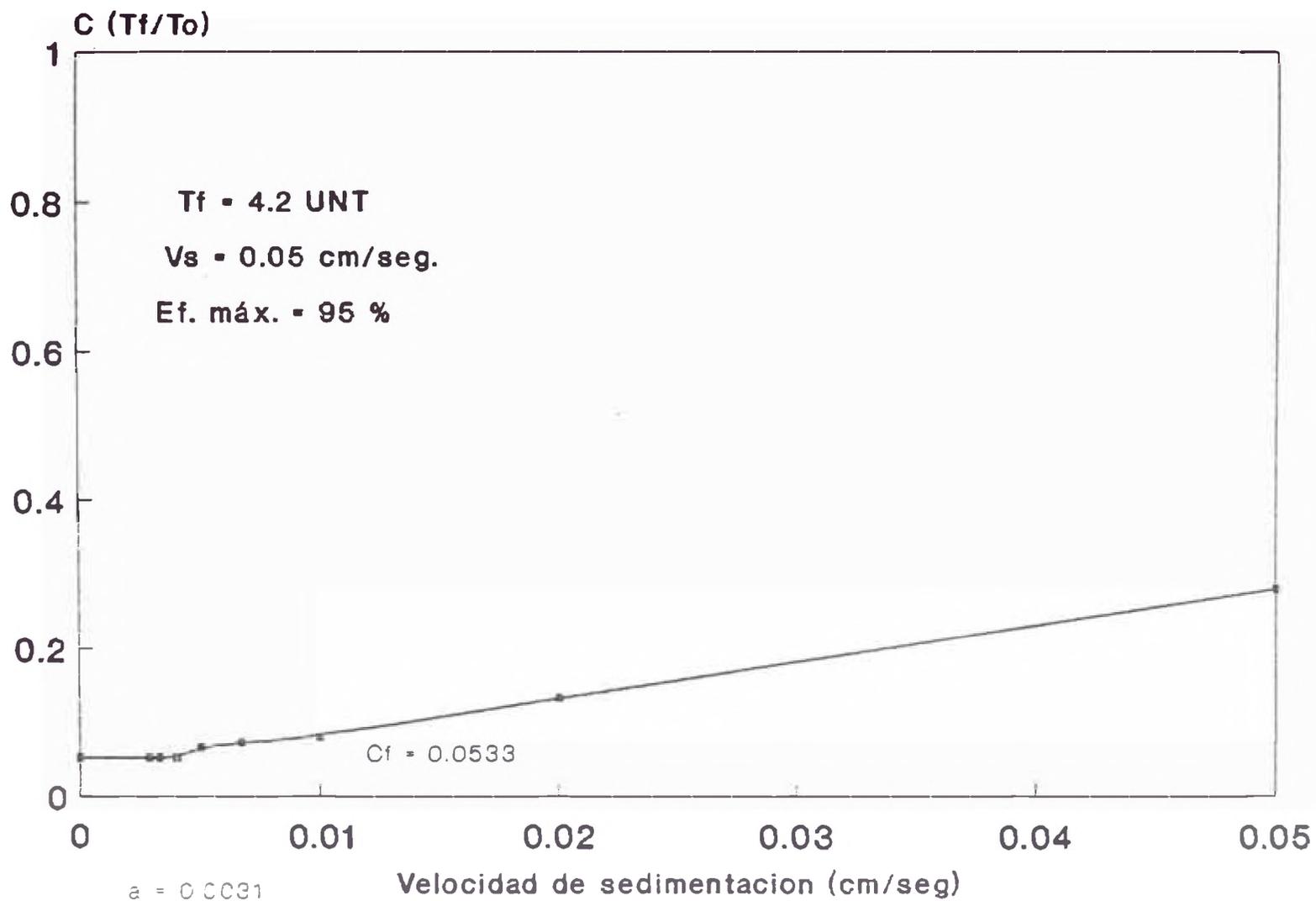


Figura 10.16

EFICIENCIA REMOCIONAL MUESTRA RIMAC

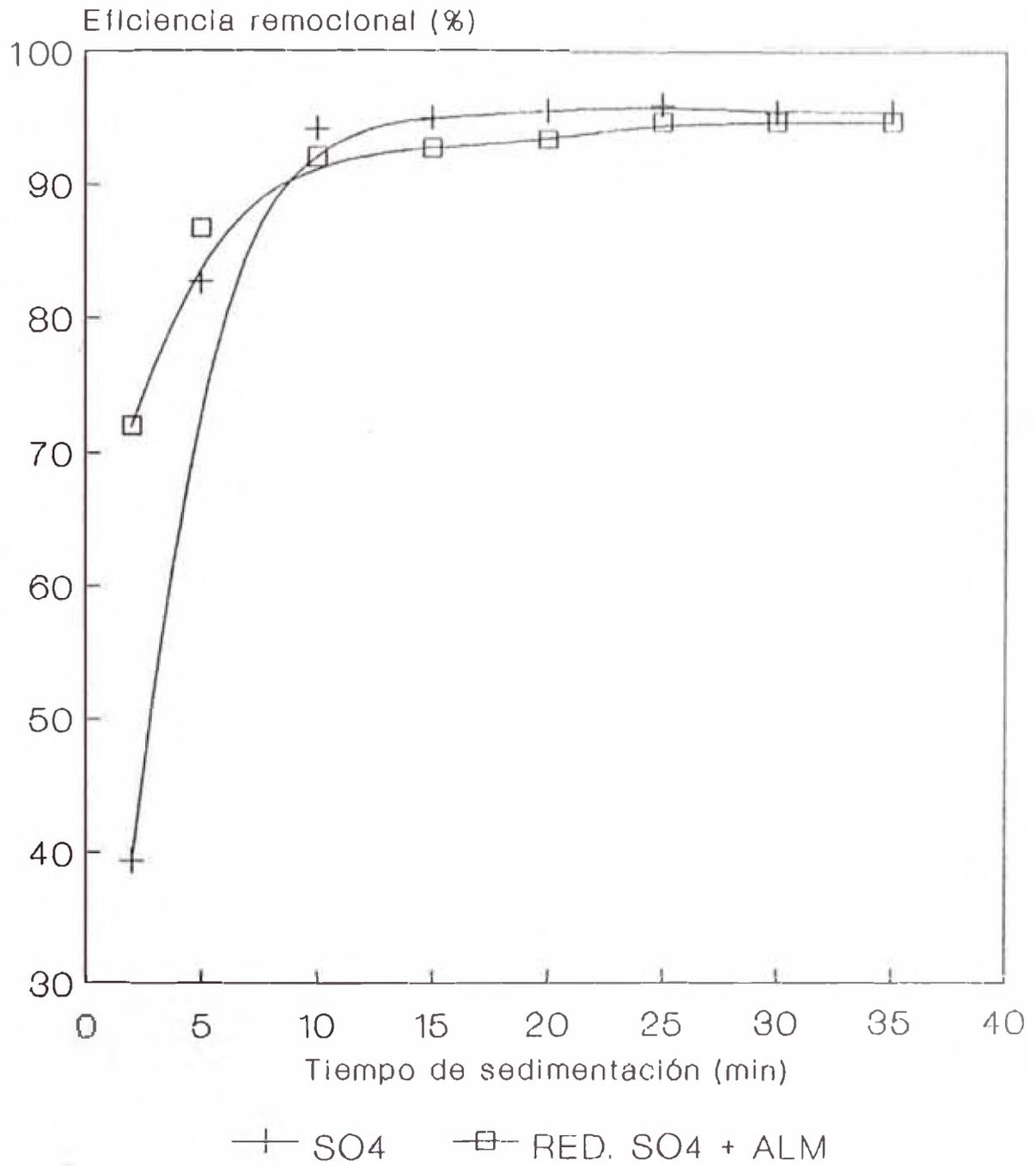


Figura 10.17

11. PRUEBAS COMPLEMENTARIAS CON ALMIDON DE PAPA

11. PRUEBAS COMPLEMENTARIAS CON ALMIDON DE PAPA

Con la finalidad de verificar el comportamiento del almidón de papa y sus efectos en los procesos de coagulación-floculación-sedimentación, fueron realizadas pruebas adicionales para mejorar las condiciones de aplicación de este producto, incidiendo en los siguientes puntos:

- Almidón de papa como coagulante primario
- Orden y tiempo de adición del coagulante
- Comparación de eficiencia entre polielectrolitos: almidón de papa y CAT FLOC C.
- Análisis de volumen de lodos.

Estos ensayos fueron efectuados con agua natural afluyente a la Planta N°2, de la Estación de Tratamiento de Aguas, de La Atarjea, del 13 al 15 de agosto de 1989, cuyas características fueron las siguientes:

$T_o = 30$ UNT

$pH_o = 8.00$ UpH

$A_o = 122$ ppm. como $Ca Co_3$

$D_o = 120$ ppm como $Ca Co_3$

11.1 ALMIDON COMO COAGULANTE PRIMARIO

Los polielectrolitos utilizados en tratamiento de aguas también se clasifican por su modo de acción, ya habiéndose demostrado los efectos beneficiosos del almidón de papa

como ayudante de floculación.

Otro modo de acción podría constituir el uso de este producto como coagulante primario, es decir, cuando el almidón de papa es agregado como único coagulante en reemplazo del sulfato de aluminio.

Esta prueba consiste en agregar dosis progresivas de almidón de papa, a la muestra de agua, efectuando los ensayos de Prueba de Jarras siguiendo la metodología descrita en el presente trabajo, y determinando la metodología descrita en el presente trabajo y determinando al final del ensayo, la turbiedad final del agua tratada. Los parámetros utilizados en la ejecución de estas pruebas fueron:

<u>Mezcla rápida</u>	<u>Mezcla lenta</u>	<u>Sedimentación</u>
$T_{MR} = 90 \text{ seg.}$	$T_{ML} = 15 \text{ min.}$	$T_{sed.} = 15 \text{ min.}$
$V_{MR} = 100 \text{ rpm}$	$V_{ML} = 45 \text{ rpm.}$	$h = 6 \text{ cm.}$
$G = 182 \text{ seg}^{-1}$	$G = 61 \text{ seg}^{-1}$	

El Cuadro N° 11.1, muestra los resultados de la presente prueba, en la cual se aprecia una pobre remoción de partículas coloidales, alcanzándose una eficiencia remocional de 13.13%, correspondiente a una turbiedad final de 26 UNT, para una dosis de 10 mg/lt de almidón de papa.

El bajo rendimiento del almidón de papa como coagulante primario, se debe a que por presentar propiedades aniónica (por la presencia del Grupo OH^-), provoca una repulsión electrostática interparticular, afectando negativamente a la adsorción mutua del polímero y los coloides, haciendo además, muy difícil la formación de "puentes químicos" capaces de promover la desestabilización del coloido.

Otro factor a considerar es la cantidad de polielectrolito que debe usarse. Generalmente las dosis utilizadas suelen estar entre 0.01 mg/lt y 1.0 mg/lt, compensando el costo del polímero, lo que no sucede con el almidón de papa cuando es empleado como coagulante primario, es decir, si se sigue incrementando la dosis de almidón de papa, los costos de productos químicos se elevarían notablemente, muy por encima de los costos cuando el tratamiento es efectuado con sulfato de aluminio.

11.2 ORDEN DE ADICION DEL COAGULANTE

Cuando se utilizan conjuntamente con sulfato de aluminio y almidón de papa, el orden de adición del coagulante ejerce un efecto considerable y directo sobre la eficiencia de floculación. Por tal motivo, fue estudiada la eficiencia de éste polímero, además del tiempo de adición del sulfato

de aluminio y polímero, mediante la ejecución de ensayos previos, habiéndose reproducido las siguientes situaciones:

- Adición del almidón de papa 30 seg. antes que el sulfato de aluminio.
- Adición conjunta de sulfato de aluminio y almidón de papa.
- Adición del almidón de papa 20, 30, 40, 60 y 90 seg. después que el sulfato de aluminio.

La fig. N° 11.1, presenta las variaciones de la eficiencia de floculación ($E = T_o/T_f$), en función del tiempo de sedimentación para las distintas situaciones de adición de coagulante. En ella se puede apreciar que el mejor efecto en la floculación, se produce cuando el almidón de papa es agregado 30 seg. después que el sulfato de aluminio, pues en éste caso se obtuvieron los mejores resultados de remoción de turbiedad. En otras palabras, el almidón de papa, cuando es utilizado como ayudante de floculación, presenta mayor eficiencia de floculación, que cuando es agregado antes o conjuntamente con el sulfato de aluminio.

11.3 COMPARACION DE EFICIENCIA ENTRE POLIELECTROLITOS: ALMIDON DE PAPA Y CAT FLOC C.

Se realizó esta experiencia con el propósito de comparar

la eficiencia del almidón de papa frente al CAT FLOC C, polímero sintético utilizado en la actualidad en la Planta de Tratamiento de La Atarjea.

El CAT FLOC C, es un polímero líquido catiónico, altamente concentrado, puede utilizarse como reemplazo de coagulantes inorgánicos, tales como sales férricas o sulfato de aluminio, o como ayudante de floculación.

Las propiedades del CAT FLOC C, son las siguientes:

AparienciaLíquido incoloro amarillo claro
Salubilidad.....Soluble en agua en todas las proporciones
Densidad8.88 Libras/galón
ViscosidadA:75°F, 3000 cps. máximo
Punto de combustión..Incombustible
Punto de congelación.26°F.
pH3.5⁺ 0.2 (al suplirse)

En todos los casos se emplearon los mismos parámetros de mezcla rápida, floculación y sedimentación para facilitar el estudio de éstos productos.

En la Fig. N° 11.2, se puede apreciar que con dosificación entre 12 y 18 mg/lt, la eficiencia es similar cuando se utiliza sulfato de aluminio con o sin almidón de papa. Antes de ése rango es el sulfato de aluminio, que actuando

sólo, presenta una eficiencia sustancialmente mayor; por encima de éste rango se hace mucho más efectiva la acción combinada del sulfato de aluminio con el almidón de papa.

La experiencia realizada con CAT FLOC C, demostró la eficiencia de éste producto como ayudante de floculación, pero en menor proporción que el almidón de papa.

Los resultados del presente ensayo se describen en el Cuadro N° 11.3, en el Anexo N° 2.

11.4 ANALISIS DE VOLUMEN DE LODOS

Uno de los principales problemas asociados al tratamiento de aguas para consumo humano, es el excesivo volumen de lodos que se acumula en los decantadores.

La disposición final de esa gran masa de lodos representa una carga adicional a los cuerpos receptores, incrementando además los costos de operación y mantenimiento de la estación de tratamiento, una vez que los volúmenes a ser dispuestos son mayores que aquellos que ingresan con el afluente a ser tratado, puesto que a los volúmenes de impurezas, que van con el agua, se suman las usualmente elevadas cantidades de coagulante, adicionados durante el proceso de coagulación. Por tanto, un ahorro en la dosis de sulfato

de aluminio, al ser reemplazada por dosis muy pequeñas de almidón de papa, significa también una disminución en el volumen de lodos.

Esta prueba tiene por objetivo determinar el volumen de lodos resultante después de la decantación, en un ensayo estático de prueba de jarras, y cuando se utiliza sulfato de aluminio más almidón, y cuando se utiliza sulfato de aluminio más Cat Floc C, en función de dosis variables de sulfato de aluminio.

Las curvas de la Fig. N° 11.3, muestran como a medida que va aumentando la dosis de sulfato de aluminio, aumenta el volumen de lodos, para los casos en que el sulfato de aluminio es utilizado sólo, conjuntamente con el almidón de papa, y con el Cat Floc C.

Se aprecia que los volúmenes de lodos sedimentados se reducen considerablemente cuando se emplean polielectrolitos, siendo esta reducción mayor, cuando se utiliza el almidón de papa como ayudante de floculación. Si cuantificamos esta reducción con la ayuda de la Fig. N° 11.3, podemos determinar los valores máximos y mínimos de reducción en el volumen de lodos, para la muestra estudiada, llegándose al siguiente Cuadro:

AYUDANTE DE FLOCULACION	REDUCCION (%)	
	MAX.	MIN.
Almidón de papa	50.0	23.0
Cat Flocc C	32.0	8.0

Es fácil entender esta reducción por el hecho de que el lodo formado con polielectrolitos, es más compacto y cohesivo, indicando que éste se deshidrata más rápidamente que el producido por sales inorgánicas (en este caso los lodos son extremadamente difíciles de deshidratar), reduciendo los problemas de manejo de lodo de desecho aun más, significando un ahorro sustancial en los costos de operación y mantenimiento de la Planta, provocando además, que las unidades de decantación aumenten su rango de frecuencia en la limpieza de estas unidades.

Asimismo, esta experiencia ha demostrado que el lodo resultante del tratamiento con polielectrolitos, en especial el almidón de papa, es mucho más fácil de maniobrar que los flóculos gelatinosos de hidróxido producido por el sulfato de aluminio, previendo su fácil evacuación en plantas de tratamiento de aguas.

El presente trabajo ha demostrado que la reducción en

la dosis de sulfato de aluminio, es una de las principales ventajas en el uso del almidón de papa como ayudante de floculación, lo que contribuye a reducir aún más, tanto el peso como el volumen del lodo sedimentado. La reducción en este caso se debe al hecho de que 0.5 mg/lt de almidón de papa reemplaza a 20 ó 25 mg/lt de sulfato de aluminio (dependiendo de la calidad del agua cruda), y en algunos casos a otro producto alcalino requerido para neutralizar la alúmina, disminuyendo tremendamente los costos de manejo y descarga de lodos.

En cada corriente de agua artificial, utilizada en el tratamiento de aguas para consumo humano, debe ser evaluado individualmente este parámetro, para establecer el tratamiento adecuado y determinar el efecto del almidón de papa, para lograr economía en los costos y contribuir a su máxima eficiencia.

11.5 CONCLUSIONES

De los análisis adicionales efectuados en el presente Capítulo, para una agua con las características mencionadas, se desprenden las siguientes conclusiones:

- El almidón de papa, utilizado como coagulante primario, no representa una alternativa de solución en el tratamiento de aguas para consumo humano,

y ésto se debe a las propiedades aniónicas que presenta en su configuración.

- Se verificó que el almidón de papa tiene mejor desempeño cuando es utilizado como ayudante de floculación, que cuando es agregado antes que el sulfato de aluminio o simultáneamente, produciendo la mayor eficiencia de floculación cuando es adicionado 30 seg. después que el sulfato de aluminio.

- El empleo del almidón de papa es más eficiente que el Cat Floc C, polímero utilizado en la Planta de Tratamiento de Aguas de La Atarjea, cuando ambos son utilizados como ayudantes de floculación.

- Cuando el almidón de papa se utiliza como ayudante de floculación, se reduce considerablemente el volumen de lodos producido después de la decantación. Esta reducción es mayor que cuando se utiliza el Cat Floc C, y mucho más que cuando sólo se emplea el sulfato de aluminio.

Como consecuencia de este fenómeno, se produce un ahorro sustancial en los costos de operación y mantenimiento de la Planta de Tratamiento.

- El lodo producido del tratamiento con almidón de papa, se deshidrata más rápidamente que el originado por el sulfato de aluminio, lo que explica el porque de un menor volumen de lodos.

Además el lodo tratado con almidón de papa es mucho más fácil de maniobrar que los flóculos gelatinosos de hidróxido producido por el sulfato de aluminio.

Cuadro 11.1 ALMIDON COMO COAGULANTE PRIMARIO

VASD No	DOSIS (mg/l)	VOLUMEN (ml)	PH final (upH)	TR (UNT)	CONDUCTIV. final (uMHOS)
1	0.5	0.1	7.70	28	---
2	1.0	0.2	7.80	27	---
3	2.0	0.4	7.85	28	---
4	5.0	1.0	8.05	27	---
5	10.0	2.0	8.25	26	---
6	15.0	3.0	8.45	28	---
7	20.0	4.0	8.55	29	590
8	25.0	5.0	8.70	29	595
9	30.0	6.0	8.80	30	595
10	35.0	7.0	8.90	30	595
11	40.0	8.0	8.95	30	595
12	45.0	9.0	8.85	31	585

Cuadro 11.2 ORDEN DE ADICION DEL COAGULANTE

FORMA DE ADICION DEL ALMIDON	t _a (seg)	TIEMPO DE SEDIMENTACION													
		0 min.		5 min.		10 min.		15 min.		20 min.		25 min.		30 min.	
		Tf	E	Tf	E	Tf	E	Tf	E	Tf	E	Tf	E	Tf	E
ALM ---> SD4=	30	6.0	5.00	2.3	113.04	2.0	115.00	2.0	115.00	2.0	115.00	2.0	115.00	2.0	115.00
Simultáneo	--	5.5	5.45	3.5	112.00	2.0	115.0	2.0	115.00	2.0	115.00	2.0	115.00	2.0	115.00
SD4= ---> ALM	20	4.2	6.07	2.2	113.64	1.8	116.67	1.4	121.45	1.4	121.45	1.4	121.45	1.4	121.45
SD4= ---> ALM	30	4.5	7.14	1.7	117.64	1.3	123.10	1.1	127.27	1.1	127.27	1.1	127.27	1.1	127.27
SD4= ---> ALM	40	4.5	6.67	1.8	116.67	1.3	123.10	1.2	125.99	1.2	125.99	1.2	125.99	1.2	125.99
SD4= ---> ALM	60	4.5	6.67	1.8	116.67	1.5	120.00	1.2	125.00	1.2	125.00	1.2	125.00	1.2	125.00
SD4= ---> ALM	90	4.4	6.82	1.6	118.75	1.4	121.43	1.3	123.10	1.3	123.10	1.3	123.10	1.3	123.10

Cuadro 11.3 EFICIENCIA ENTRE POLIELECTROLITOS:
ALMIDON DE PAPA Y CAT FLOC C

DOSIS DE SULFATO: DE ALUMINIO (mg/l)	TURBIEDAD FINAL (%)		
	SO4	SO4 + ALM.	SO4 + CFC
5	12.0	18.8	16.0
10	5.3	5.0	8.0
15	2.6	3.0	4.9
20	2.4	2.2	2.9
25	2.3	2.2	3.3
30	3.9	3.1	3.9
35	6.6	3.4	8.0
40	7.1	2.8	10.0
45	7.2	2.6	12.0

Cuadro 11.4 DETERMINACION DE VOLUMEN DE LODOS

DOSIS DE SULFATO: DE ALUMINIO (mg/l)	ML DE LODOS/2000 ML DE AGUA		
	SO4 (ml)	SO4 + ALM. (ml)	SO4 + CFC (ml)
5	1.6	---	---
10	2.5	1.0	1.0
15	5.5	2.5	3.5
20	8.5	4.0	5.5
25	8.5	5.5	7.5
30	9.5	7.5	8.0
35	10.0	7.5	10.0
40	15.0	9.5	12.0
45	16.5	10.5	12.0

ORDEN DE ADICION DE COAGULANTES MUESTRA RIMAC

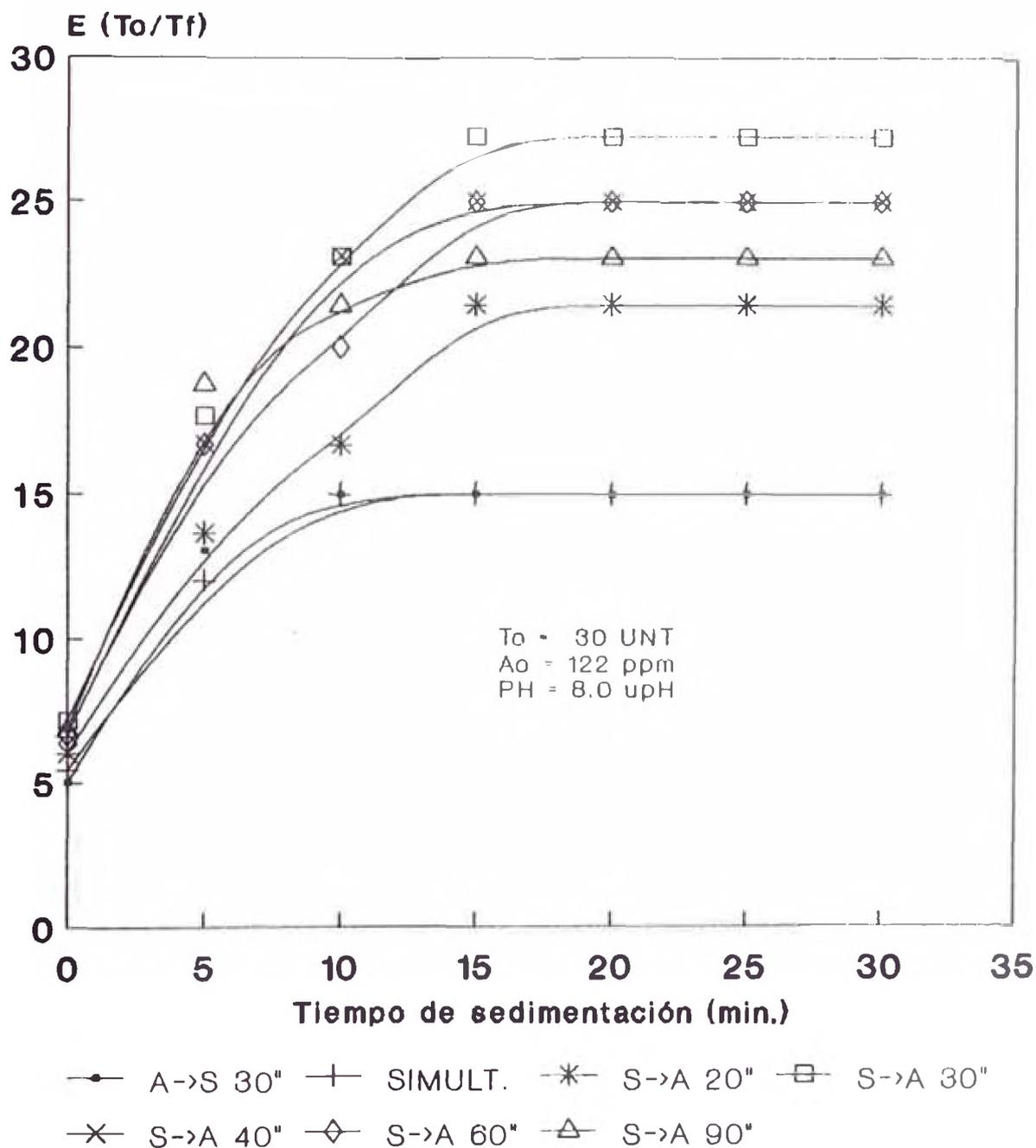


Figura 11.1

COMPARACION DE EFICIENCIA DE POLIMEROS MUESTRA RIMAC

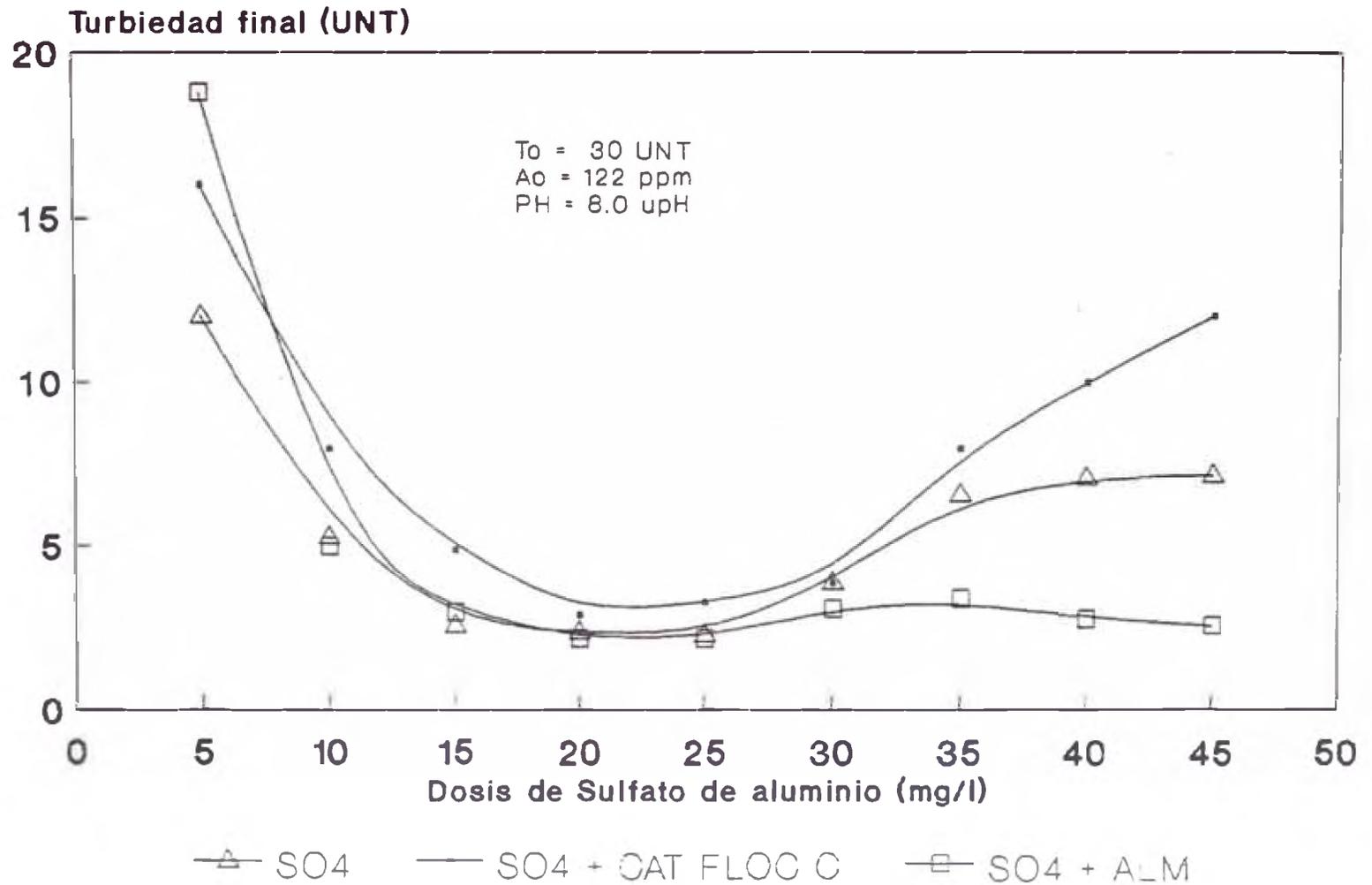


Figura 11.2

DETERMINACION DE VOLUMEN DE LODOS MUESTRA RIMAC

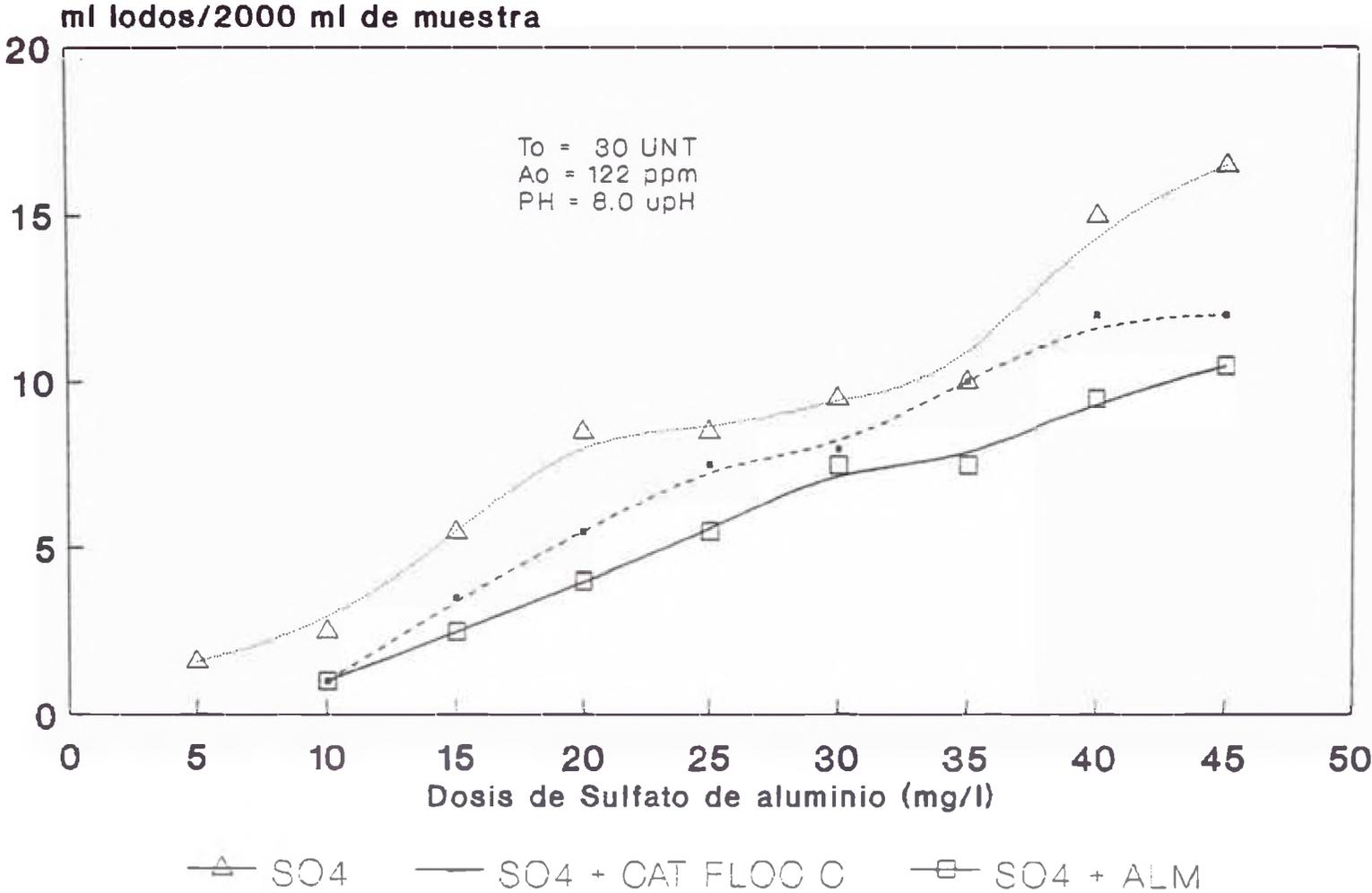


Figura 11.3

12. ANALISIS DE COSTOS DE PRODUCTOS QUIMICOS

12. ANALISIS DE COSTOS DE PRODUCTOS QUIMICOS

En base a los resultados obtenidos en el presente trabajo de tesis, y para la misma muestra de agua utilizada en el Capítulo 11, se pueden hacer algunas consideraciones sobre los estimativos de costos de sulfato de aluminio cuando es utilizado conjuntamente con el almidón de papa, determinándose si existe ahorro alguno en los costos de productos químicos, cuando se produce una reducción en la dosis de sulfato de aluminio, como consecuencia del uso del almidón de papa como ayudante de floculación.

Además, es importante determinar si existe alguna ventaja económica en el empleo del almidón de papa como auxiliar de floculación, frente a los polímeros sintéticos utilizados actualmente en la Planta de Tratamiento de Aguas, La Atarjea; básicamente el polímero catiónico Cat Flocc C.

El precio del Kilogramo de Sulfato de Aluminio y polímero sintético, CAT FLOCC C., se estableció de acuerdo con los valores pagados por la Planta de Tratamiento de Aguas, en el mes de Enero de 1990, es decir: sulfato de aluminio I/. 3,852.5 (0.275 \$/Kg); polímero sintético, CAT FLOCC C, I/. 46,340 (3.31 \$/Kg).

El costo por Kilogramo del almidón de papa fue correspondiente al precio de venta en los mercados de la gran Lima, en el mes de Enero de 1990, es decir: I/. 20,000. (\$ 1.48).

El costo del hidróxido de sodio (NaOH), empleado para la solubili-

zación del almidón, fue de I/. 13,225. (\$ 1.04), por Kilogramo, y a la misma fecha.

Las dosis de productos químicos utilizados en el presente análisis para la muestra de agua natural en estudio ($T_o = 30$ UNT, $A_o = 122$ ppm, $pH_o = 8.0$), fueron:

Dosis de Sulfato de Aluminio : $D_{SO_4} = 25$ mg/lt.

Dosis CAT FLOC : $d'_{cfc} = 0.5$ mg/lt.

Dosis de Almidón : $d_{Alm.} = 0.5$ mg/lt.

12.1 Para el porcentaje de reducción de sulfato de aluminio

La cantidad de sulfato de aluminio utilizado por 1000 m^3 de agua tratada corresponde a:

$$25 \frac{mg}{l} \times 0.275 \frac{\$}{Kg} = 6.375 \frac{\$}{1000m^3} \quad (1)$$

Considerando un ahorro promedio de sulfato de aluminio del 20%, cuando se utiliza almidón de papa como ayudante de floculación, la cantidad de sulfato de aluminio para la referida reducción por cada 1000 m^3 de agua tratada, es equivalente a:

Dosis reducida [$D' = 0.80 \times 2.5 \frac{mg}{l} = 20$ mg/lt]

$$20 \frac{mg}{l} \times 0.275 \frac{\$}{Kg} = 5.5 \frac{\$}{1000 m^3} \quad (2)$$

El ahorro en la dosis de sulfato de aluminio fue como consecuencia de la aplicación conjunta con el almidón de papa, siendo reemplazada por una dosis de 0.5 mg/l.

Entonces la cantidad de almidón de papa por cada 1000 m³ de agua tratada corresponde a:

$$0.5 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \times 1.58 \frac{\$}{\text{Kg}} = 0.79 \frac{\$}{1000\text{m}^3} \quad (3)$$

Luego el costo del tratamiento por cada 1000 m³, cuando se utiliza el almidón de papa como ayudante de floculación, será:

$$5.5 \frac{\$}{1000 \text{ m}^3} + 0.79 \frac{\$}{1000\text{m}^3} = 6.29 \frac{\$}{1000\text{m}^3} \quad (4)$$

Si comparamos el tratamiento con o sin almidón de papa, podemos obtener un significativo ahorro en los costos de productos químicos.

12.2 Costos comparativos con polímeros sintéticos

El costo del tratamiento por 1000 m³ de agua, cuando el almidón de papa se utiliza como ayudante de floculación será:

$$0.50 \frac{\text{mg}}{\text{lt}} \times 1.58 \frac{\$}{\text{Kg}} = 0.790 \frac{\$}{1000\text{m}^3} \quad (5)$$

Para las mismas condiciones de aplicación, la cantidad de CAT FLOC C, por 1000 m³ de agua tratada corresponde a:

$$0.50 \frac{\text{mg}}{\text{lt}} \times 3.31 \frac{\$}{\text{Kg}} = 1.655 \frac{\$}{1000 \text{ m}^3} \quad (6)$$

Si comparamos los resultados de ambas situaciones (5) y (6), se puede apreciar que el almidón de papa resulta muy ventajoso, frente al CAT FLOC C, puesto que el costo de productos químicos se reduce en un 52.3%, con respecto al costo del tratamiento con CAT FLOC C.

12.3 CONCLUSIONES

Del estudio comparativo de costos, se concluye que:

- La utilización del almidón de papa como ayudante de floculación, representa un ahorro significativo en los costos de productos químicos.

Además, si tomamos en cuenta que los filtros tratan afluentes de hasta 10 UNT, se obtendría una reducción mayor en la dosis de sulfato de aluminio, y por consiguiente una mayor disminución de dichos costos.

En lugares en donde el transporte de productos

químicos eleva considerablemente sus costos, son más apreciables las ventajas económicas del almidón de papa, cuando es empleado como auxiliar de floculación.

- El almidón de papa constituye una ventaja económica frente al CAT FLOC C, cuando ambos son utilizados como ayudantes de floculación.

13. CONSIDERACIONES SOBRE LA ELABORACION Y UTILIZACION DEL
ALMIDON DE PAPA EN LABORATORIO

13. CONSIDERACIONES SOBRE LA ELABORACION Y UTILIZACION DEL ALMIDON DE PAPA EN LABORATORIO

La efectividad de los polímeros naturales en el tratamiento de aguas para consumo humano, depende básicamente del conocimiento que de éstos se tenga.

La aplicación correcta del almidón de papa conllevaría a obtener una alta eficiencia de estos productos como auxiliares de floculación, es por ello que para su utilización deben concerse a detalle, algunas consideraciones sobre su elaboración, manipuleo, precauciones y limitaciones.

13.1 PREPARACION DEL ALMIDON. GELATINIZACION

13.1.1 Preparación del almidón nativo de papa

En el caso de que se presente la imposibilidad de obtención del almidón en el comercio, se recomienda su extracción en el laboratorio, mediante el siguiente proceso:

- Limpieza inicial y lavado del tubérculo.
Eliminación de la cáscara.

- Triturar el material, por un tiempo de hasta 40 minutos.

- Filtración de la suspensión acuosa a través de un tejido fino.

- Secado del material filtrado en cápsulas de porcelana colocadas en una estufa de 36°C, durante aproximadamente 72 horas.
- Trituración del material seco, cirniéndola posteriormente de modo a obtener un polvo muy fino, en condiciones de ser empleado en los ensayos de floculación.

La metodología descrita, si es ejecutada con el debido cuidado, asegurará un almidón de buena calidad.

13.1.2 GELATINIZACION

Con la finalidad de obtener la solubilización completa del almidón de papa, es necesario que los reactivos utilizados para su activación sean adicionados en las cantidades adecuadas, haciendo uso de la relación empírica determinada en los ensayos de solubilización (Capítulo 8):

$$C_{\text{NaOH}} = \frac{0.80 \text{ Bm} + 1.80 \text{ Ap}}{100}$$

C_{NaOH} : Cantidad de soda cáustica (gr)

AP : Peso de almidón nativo de papa (gr)

Bm : Peso de agua, (gr)

Asimismo, se determinó que la proporción más adecuada de almidón con relación al peso de agua, es de 1:10, ya que de ésta manera se evita el gasto excesivo de soda cáustica (NaOH), como consecuencia de la reacción con el agua (no hay que olvidar que el NaOH, es altamente hidrostópico); además es comendable obtener un producto muy concentrado para luego efectuar la dilución deseada, fácil de manipular y de efectiva aplicación como ayudante de floculación.

El almidón de papa debe ser solubilizado 24 horas antes de su aplicación, con el propósito de permitirle alcanzar su viscosidad real.

A continuación se presenta una tabla donde se indica el gasto de soda cáustica necesaria para la activación, para distintas cantidades de almidón nativo y agua, siguiendo la proporción de 1:10:

PESO DE ALMIDON (gr.)	PESO DE AGUA (gr.)	PESO DE NaOH (gr.)
1	10	0.098
10	100	0.980
100	1000	9.800
1000	10000	98.000
100000	100000	980.000

Es recomendable que al producto obtenido se le considere equivalente a un 100%, para luego de allí efectuar las diluciones.

También debe considerarse la temperatura a la cual se está activando el almidón, puesto que influye directamente sobre la viscosidad.

La disolución adecuada para ser aplicada en planta, debe ser previamente determinada en ensayos de JAR TEST, y debe ser aquella que produzca los resultados más eficientes en las pruebas de floculación.

13.2 LA GENTE: otro factor que afecta a la aplicación exitosa de los polímeros.

Debido a la complejidad del tratamiento de aguas, la aplicación de polímeros es tanto un arte como una ciencia. Esto significa que los resultados esperados sólo se pueden obtener a través de cuidadosas evaluaciones de laboratorio y ensayos en planta a gran escala, utilizando los compuestos químicos correctos y buenos sistemas de alimentación. Pero sobre todo el éxito en el programa de tratamiento con polímeros naturales depende del conocimiento y experiencia del especialista en polímeros. Aún así, sólo las

demostraciones a nivel de planta pueden determinar la efectividad de los polímeros.

"El grado de experiencia y la pericia o práctica que posea el especialista en polímeros, probablemente es tan importante como el producto en sí mismo".

13.3 PRECAUCIONES - ALMACENAJE

13.3.1 Precauciones

- a. En el momento de la activación del almidón, se debe evitar la formación de grumos, manteniéndola siempre en agitación constante.
- b. Se debe solubilizar el almidón con una solución muy concentrada de hidróxido de sodio, la que debe utilizarse casi instantáneamente, de lo contrario se podría hidrolizar.
- c. Una vez activado el almidón, dejar que alcance su viscosidad real, pasada las 24 horas. Mantenerla siempre en recipientes que no sean de vidrio, pues la soda puede deteriorarlo.
- d. La dosificación del coagulante y almidón de

papa, en los ensayos de Pruebas de Jarras, debe ser efectuada con el mayor control posible, en cuanto a la velocidad de agitación y tiempo de orden de adición.

13.3.2 ALMACENAJE

- a. El almidón debe almacenarse en un lugar especialmente dispuesto, y de fácil acceso.
- b. Su almacenamiento debe hacerse en lugares secos, el contacto con la humedad podría deteriorarlo.
- c. Debe guardarse en lugares aislados del suelo, y fuera del posible contacto con insectos y roedores.
- d. Debido a que su activación se efectúa diariamente, se recomienda mantener una existencia para 60 días.
- e. Con respecto al hidróxido de sodio, este debe almacenarse en recipientes de plástico opaco, fuera del contacto con el medio ambiente.

14 . CONCLUSIONES

14. CONCLUSIONES FINALES

Los resultados obtenidos en esta investigación, demostraron que el almidón de papa posee características muy buenas como ayudante de floculación, con ventajas en el aspecto técnico, sanitario, y muy probablemente en el aspecto económico.

Con relación a los ensayos de Jar Test, se concluye lo siguiente:

- De los almidones ensayados, es el almidón de papa el que presenta propiedades altamente floculantes, mientras que los almidones de maíz, al producir resultados insatisfactorios, fueron descartados como ayudantes de floculación, en los ensayos posteriores a su solubilización.
- El almidón de papa demostró ser un polímero natural con características excepcionales como auxiliar de floculación, en aguas con baja turbiedad y alta alcalinidad (similar a la Muestra II), produciendo resultados eficientes en el aspecto técnico, y probablemente económico.
- La técnica de solubilización en frío para el almidón, con hidróxido de sodio (NaOH), puede ser utilizada fácilmente por operadores, en las estaciones de tratamiento de aguas que permitan su aplicación.
- El aumento en la dosis de almidón de papa no implica

necesariamente, una mejoría en la calidad del agua tratada.

Los ensayos comprobaron que la dosis óptima de este producto, varía entre 0.2 mg/lt y 1.00 mg/lt, habiéndose obtenido como condición óptima, la dosis de 0.5 mg/lt. Por tanto, no existe una correlación entre la dosis óptima de almidón de papa y la turbiedad del agua cruda, favoreciendo a su aplicación en plantas de tratamiento.

- El almidón de papa estudiado, trabaja eficientemente en el mismo rango de pH inicial óptimo, que para el sulfato de aluminio, es decir: 6.5 a 8.5.

- Fue posible una reducción del 20%, en la dosis del sulfato de aluminio, cuando fue aplicado almidón de papa, provocando en esta situación, una mejora sustancial en la calidad del agua decantada, convirtiéndola en menos corrosiva.

Esta reducción, en la práctica, podría ser mayor (40% en promedio), si se entiende que los filtros aceptan efluentes de hasta 10 UNT.

Cuando esta reducción se efectúa, los resultados son realmente significativos, lográndose cierta economía en el empleo de productos químicos.

- Para la muestra de agua en la cual el almidón resulta

ser eficiente, la gradiente de velocidad para floculación es similar a la gradiente de velocidad para la floculación de la misma muestra, cuando es utilizado solamente sulfato de aluminio.

Este resultado permite concluir que, en estaciones de tratamiento de aguas, en donde las unidades de floculación están diseñadas con valores de gradiente de velocidad apropiados para el tratamiento de sulfato, no sea necesario efectuar variaciones en las mismas, en caso de aplicarse almidón como auxiliar de floculación.

- El almidón de papa cuando actúa como auxiliar de floculación, produce un flóculo más resistente a la ruptura, y con una menor capacidad de aglomeración, que cuando se utiliza solamente sulfato de aluminio.

- Los ensayos de floculación demostraron que la aplicación del almidón de papa como auxiliar de floculación, permite la formación más rápida de los flóculos, que cuando se usa, únicamente, el sulfato de aluminio.

Además de eso, los flóculos formados son más densos, provocando velocidades de sedimentación mayores.

- El almidón de papa utilizado como coagulante primario,

no representa una alternativa de solución en el tratamiento de aguas para consumo humano, debido a las propiedades aniónicas que presenta.

- Los volúmenes de lodos producidos después del tratamiento con almidón de papa, son mucho menores que los resultantes del tratamiento solo con sulfato, significando un ahorro considerable en los costos de operación y mantenimiento de las unidades de decantación.

- Los ensayos de Jar Test con muestras de agua natural, lograron reproducir resultados similares a los obtenidos con muestra artificial de alta turbiedad y baja alcalinidad, verificando la alta eficiencia del almidón de papa como ayudante de floculación.

- El almidón de papa presenta ventajas técnico-económicas frente al Cat Floc C cuando ambos son utilizados como ayudantes de floculación. Además, minimizaría la dependencia de importación de este polielectrolito sintético.

- En aguas claras del Río Rímac, para las mismas condiciones de calidad del efluente y área de los sedimentadores, el empleo del almidón de papa como auxiliar de floculación, permite tratar casi el doble de caudal, debido a que la tasa de sedimentación se incrementa en 1.89 veces, mejorando notablemente la eficiencia de estas unidades.

15. RECOMENDACIONES

15. RECOMENDACIONES

Tomándose en cuenta los resultados obtenidos en los estudios experimentales, desarrollados en los ensayos de laboratorio, es recomendable:

- Estudiar con mayor profundidad los almidones de papa, en lo que concierne a su producción industrial, y condición de aplicabilidad como auxiliares de floculación, ejecutando experiencias en régimen continuo, es decir, ensayar este producto en Plantas, a nivel Piloto y/o Real, que traten aguas con características similares a aquella en donde el almidón de papa produce resultados ventajosos y muy eficientes.
- Utilizar la metodología aplicada en el presente trabajo en el estudio o evaluación de otros polímeros, tanto sintéticos como naturales.
- Profundizar los estudios sobre los efectos producidos por el almidón de papa en el proceso de filtración, cuando es utilizado como ayudante de floculación y/o filtración, con el propósito de determinar si es posible una mejor clarificación del agua tratada, aumento del tiempo de duración de la carrera de filtración, así como del período de lavado de los filtros, y procurando finalmente, la posible obtención de una agua menos corrosiva, que la obtenida cuando es utilizado sólo un coagulante

primario.

- Emplear el almidón de papa en zonas en donde el transporte de productos químicos elevan considerablemente los costos de los mismos.

- Recomendar el uso de este polímero natural en zonas donde la calidad del agua cruda lo permita, como podría ser el lado de la sierra peruana.

- Estudiar almidones provenientes de otras fuentes naturales, producidos en nuestro país, pasando a una nueva etapa de investigación, procurando que a través de procesos de polimerización, obtener compuestos con pesos moleculares más altos.

16. BIBLIOGRAFIA

16. BIBLIOGRAFIA

1. CANEPA L.; Aspectos de salud involucrados en el uso de polielectrolitos en tratamiento de aguas para consumo humano. Informe Técnico N° 345. Diciembre de 1985.
2. VOGH P.; WARRINGTON, J.L. BLACK, A.P. Potato Starch as a Sludge Conditions. J. Awwa, 61(6): 276-284, June 1969.
3. LANGLOIS, D.P.; WAGONER, J.A. Production and use of amilose. Londres, 1967.
4. CAMPOS, J.R.; AZEVEDO NETTO, J.M., Empleo de amido de batata como auxiliar de floculación de aguas para abastecimiento. Congreso AIDIS. La Paz, 1980.
5. KIRCHMER, C.J.; ARBOLEDA, J.A.; CASTRO, M.L., Polímeros naturales y su aplicación como ayudantes de floculación. Lima (PE), CEPIS, 1975.
6. JAHN, S., Traditional water clarification methods; using scientific observation to maximize efficiency. January 1984. London.
7. CAMPOS, J.R.; DE SOUZA VIEIRA, B. & OLMO VILLELA, L.M., Comparação da eficiencia de amido de diversas fontes naturais, quando empregado como auxiliar de floculação de aguas para abastecimento. Revista DAE. Junio 1984.

8. ORTEGA, Y., Informe Técnico sobre aplicación de polímeros naturales y sintéticos en el tratamiento de aguas. ACODAL. Nov.-Dic. 1984.
9. MANUAL DTIAPA, Evaluación de Plantas de tratamiento de agua. Tomo I. Diciembre 1984.
10. ARBOLEDA, J.A., Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación deL agua. Serie Técnica N° 13. Abril 1973.
11. KIRCHMER, C.J., Aspectos químicos y físicos de la coagulación del agua. Manual CIFCA/CEPIS/OPS/OMS. Diciembre 1977.
- 1.2 HESPANHOL, I.; GIOGETTI, M.P.; BERNARDO, L., Tratamiento de agua. Companhia de Saneamiento Básico do Estado de São Paulo (SABESP). São Paulo, Brasil.
13. HESPANHOL, I., Cinética de floclacao de suspensoes coloidais com polielectrolitos naturais. Escola de Engenharia de São Carlos - USP - Brasil. São Paulo 1982.
14. GIOGETTI, M.F.; BERNARDO, L. Di, Tratamento de Agua. Companhia de Saneamiento Básico do Estado de São Paulo. (São Paulo, Brasil). SABESP.

15. ARGAMAN, Y.; KAUFMAN N.J., Turbulence and Flocculation. Proc. of the Amer. Soc. of Civil Eng., I. Sanit. Eng. Div.. Abril 1979.
16. BILIMEYER, F., Polimerización- La ciencia de las macromoléculas. UNI-Lima/Perú.
17. PEREZ, R., Uso de polielectrolitos como coadyuvantes de coagulación en plantas potabilizadoras. Congreso AIDIS.
18. EPA, Report., Coagulants aids for water treatment, Journal AWWA. August 1975.
19. BIKALES, N.M., Water-Soluble Polymers. New York (US), Plenum Press, 1973. August 1972.
20. REUTER, J.M., Polyelectrolites in water treatment, London (GB), 1986.
21. REUHRWIN, R.A.; WARD, D.W., Mechanism of clay agregation by polyelectrolites. Soil Sci. 1952.
22. MICHAELIS, A.S., Agregations of suspensions by polyelectrolites. J. Ingd. Eng. Chem. Julho 1954.
23. MICHAELIS, A.S.; MORELLOS, D., Polyelectrolite adsorption by

- kaolinite. Ind. And Eng. Chem. November 1955.
24. LA MER, J.; LA MER, V.K.; LINDFORD, H.B., The filtration of silica dispersions flocculated by high polymers. October 1963.
 26. O'MELLIA, C.R., A review of the coagulation process. Public Works. May 1969.
 27. SIMHA, R.; FRISH, H.L.; EIRISH, P.R., The adsorption of flexible macromolecules. J. Phys. Chem. 1953.
 28. LINK, W.F.; BOOTH, R.B., Physical chemical aspects of flocculation by polymers. Trans. Amex. Inst. Min. Met. Eng., 1960.
 29. LA MER, V.K.; HEALEY, T.M., Adsorption-flocculation of macromolecules of solid-liquid interfaces. Rev. Pure and Appl. Chem. 1963.
 30. HELIER, W.; PUGH, T.L., Steric stabilization of colloidal suspensions by adsorption of flexible macromolecules, J. Polymer Sci. 1960.
 31. KACTCHALSKI, A. Solutions of Polyelectrolytes and mechanochemical system. J. Polymer. Sci. 1951.
 32. KIM, W. The effect of polyelectrolytes on water clarification.

- Univ. of California, Berkeley. 1963.
33. PRESMAN, M. Cationic polyelectrolits as prime coagulant in natural water treatment. Journal AWWA. Febrero, 1967.
 34. BLACK, A.P.; BIRKNER, F.B.; MORGAN, J.J. The effect of polymer adsorption on the electrokinetic stability of dilute clay suspensions. J. Colloid SCI. 1966.
 35. HESPANHOL, I.; SEL LECK, R.E. The role of polyelectrolits on flocculation kinetics. Univ. of California, Berkeley. Report N° 75-2. Junio 1975.
 36. POSSELT, H.S.; REIDIES, A.H. Controlled coagulation of manganese dioxide hydrate in permanganate treated waters. ACS, Philadelphia. Abril 1964.
 37. BLACK, A.P. Effectiveness of polyelectrolite coagulant aids in turbidity removal. Journal AWWA. Febrero 1959.
 38. SCHOCH, T.J. Fractionating starch. U.S. Pat. July 1950.
 39. IIT. Estudios bibliográficos sobre derivados del almidón. Universidad Nacional Agraria - UNA. 1970.

40. PAEZ H. [Almidón de mandioca. Su empleo como coadyuvante en el tratamiento de aguas] Administración de obras sanitarias. Corrientes, Argentina 1981.

41. MINISTERIO DE AGRICULTURA, Oficina Sectorial de Estadística (OSE). Anuarios de Producción. 1980-1984.

42. PEREZ, J.M.; CASTRO, M.L.; L. CANEPA DE VARGAS, Ciencias básicas de tratamiento de aguas. Procesos unitarios-ensayos de laboratorios OPS/EHP/OMS/CEPIS. Abril, 1981.