

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**

**FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL**



**USO DE LA MAGNETITA NATURAL COMO COAGULANTE  
EN LA CLARIFICACION DEL AGUA**

**TESIS**

**Para optar el Título Profesional de  
INGENIERO SANITARIO**

**Liliana Gamarra León  
Arturo Zapata Payco**

**LIMA - PERU**

**1995**

**A Nuestro Padre Creador, por  
su bondad en permitirnos la  
culminación de este trabajo.**

A las memorias de Mi Acun,  
Julia y Simón mis abuelos.

A mis queridos PADRES de quienes  
recibo enseñanzas y estímulos  
para seguir luchando en la vida.

**A la memoria de mi madre:**

Este trabajo te lo dedico a ti MAMA,  
que te encuentras en el cielo. Con  
todo mi cariño, en reconocimiento a  
todas las atenciones y amor que me  
brindastes.

**A mi padre:**

Por el apoyo que me ha dado en  
toda la trayectoria de mi vida,  
por estar siempre a nuestro lado y  
ser el ejemplo de firmeza y  
honestidad. Gracias PAPA.

### **NUESTRA GRATITUD A:**

- **Ingeniero Víctor Maldonado Yactayo, asesor y amigo, por sus enseñanzas e incondicional apoyo brindado en la realización de esta tesis.**
- **Ingeniero Otto Rosasco Gerkes, ex-Jefe del Laboratorio N° 20. Por darnos las facilidades en el uso de los ambientes y equipos del laboratorio, durante su gestión.**
- **Licenciado Leonardo Alcayhuamán, por su colaboración y sugerencias, las cuales, marcaron el camino a seguir, en la construcción del equipo electromagnético.**
- **Ingenieros Ricardo Zacarías Díaz y Edwilde Yoplac Castromonte, ex-jefe y jefe del Laboratorio de Procesamiento de Minerales de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica, por brindarnos el uso del Laboratorio, para el acondicionamiento de la magnetita.**
- **Ingeniero Jorge Villena, Director de la Dirección General de Salud Ambiental, DIGESA, por la ayuda prestada en la determinación de los análisis de color.**
- **Ingeniero Fausto Roncal Vergara, por sus sugerencias y su amistad brindada.**
- **Ingeniero Miguel Tipacti Milachay, director del Centro de Tecnología y Desarrollo ARUY, por su apoyo económico en la construcción del equipo electromagnético.**
- **Sr. Juan Rolando Zapata Payco, por facilitarnos el equipo de informática.**
- **Nuestros hermanos y amigos, que de una u otra forma ofrecieron su apoyo, en la realización de esta tesis.**

# USO DE LA MAGNETITA NATURAL COMO COAGULANTE EN LA CLARIFICACION DEL AGUA

## CONTENIDO

RESUMEN

INTRODUCCION

OBJETIVOS

ANTECEDENTES

PAGINA N°

### CAPITULO 1: CALIDAD DEL AGUA

1.1 CARACTERISTICAS DEL AGUA . . . . .	1
1.1.1 CARACTERISTICAS FISICAS . . . . .	1
1.1.2 CARACTERISTICAS QUIMICAS . . . . .	5
1.1.3 CARACTERISTICAS BACTERIOLOGICAS . . . . .	16
1.2 NORMAS DE CALIDAD . . . . .	22
1.2.1 NORMA NACIONAL . . . . .	22
1.2.2 GUIAS PARA LA CALIDAD DEL AGUA POTABLE . . . . .	23

### CAPITULO 2: COAGULACION

2.1 GENERALIDADES . . . . .	29
2.2 COLOIDES . . . . .	29
2.2.1 DEFINICION . . . . .	29
2.2.2 TAMARO . . . . .	30
2.2.3 FORMA DE LOS COLOIDES . . . . .	31
2.2.4 CLASIFICACION . . . . .	31
2.2.5 PROPIEDADES . . . . .	32
2.2.6 ESTABILIDAD E INESTABILIDAD DE LOS COLOIDES . . . . .	34
2.3 MECANISMOS DE DESESTABILIZACION DE LOS COLOIDES . . . . .	37
2.3.1 TEORIA FISICA . . . . .	38
2.3.2 TEORIA QUIMICA . . . . .	40
2.4 FACTORES QUE INFLUYEN SOBRE LA COAGULACION . . . . .	40

2.4.1	EFFECTO DEL pH . . . . .	40
2.4.2	EFFECTO DE LAS SALES . . . . .	40
2.4.3	EFFECTO DE LA NATURALEZA DE LA TURBIEDAD . . . . .	41
2.4.4	EFFECTO DEL COAGULANTE . . . . .	41
2.4.5	EFFECTO DE LA TEMPRATURA . . . . .	42
2.5	TIPOS DE COAGULACION . . . . .	42
2.5.1	COAGULACION POR ADSORCION . . . . .	42
2.5.2	COAGULACION POR BARRIDO . . . . .	43

**CAPITULO 3: FLOCULACION**

3.1	DEFINICION . . . . .	44
3.2	MECANICA DE LA FLOCULACION . . . . .	44
3.2.1	FLOCULACION PERICINETICA . . . . .	44
3.2.2	FLOCULACION ORTOCINETICA . . . . .	44
3.3	FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FLOCULACION . . . . .	45
3.3.1	NATURALEZA DEL AGUA . . . . .	45
3.3.2	TIEMPO DE FLOCULACION . . . . .	45
3.3.3	GRADIENTE DE VELOCIDAD . . . . .	45
3.3.4	PARAMETROS OPERACIONALES . . . . .	46

**CAPITULO 4: LA MAGNETITA**

4.1	COMPOSICION Y CARACTERISTICAS . . . . .	47
4.2	PROPIEDADES MAGNETICAS . . . . .	47
4.3	LA MAGNETITA COMO COAGULANTE . . . . .	49
4.4	RESERVA NACIONAL . . . . .	49
4.5	PRODUCCION . . . . .	51

**CAPITULO 5: EL CAMPO MAGNETICO**

5.1	MAGNETISMO . . . . .	53
5.1.1	EL IMAN Y SU CLASIFICACION . . . . .	53
5.1.2	CAMPO MAGNETICO . . . . .	54
5.2	ELECTROMAGNETISMO . . . . .	55
5.2.1	CAMPO ELECTROMAGNETICO . . . . .	55
5.2.2	ELECTROIMANES . . . . .	56

5.3	ACCION DE UN CAMPO MAGNETICO SOBRE UNA CARGA MOVIL . . . . .	58
-----	--	----

**CAPITULO 6: ENSAYOS DE LABORATORIO**

6.1	LA PRUEBA DE JARRAS . . . . .	59
6.1.1	EQUIPO DE PRUEBA DE JARRAS . . . . .	59
6.1.2	DOSIFICADORES . . . . .	61
6.1.3	SIFONES . . . . .	62
6.1.4	TURBIDIMETRO . . . . .	63
6.1.5	COMPARADOR DE COLOR . . . . .	63
6.1.6	MEDIDOR DE pH . . . . .	64
6.1.7	EQUIPO AUXILIAR . . . . .	64
6.2	OBSERVACIONES . . . . .	64
6.2.1	TAMAÑO DEL FLOC PRODUCIDO . . . . .	64
6.2.2	TIEMPO INICIAL DE FORMACION DEL FLOC . . . . .	67
6.3	RECOMENDACIONES . . . . .	67
6.4	AGUA USADA EN LOS ENSAYOS . . . . .	68
6.5	COMPOSICION MINERALOGICA Y ACONDICIONAMIENTO DE LA MAGNETITA . . . . .	71
6.6	DESCRIPCION DE LA METODOLOGIA . . . . .	72
6.6.1	CARACTERIZACION DE LAS MUESTRAS . . . . .	72
6.6.2	METODOLOGIA DE LOS ENSAYOS A NIVEL DE LABORATORIO . . . . .	73
6.7	METODO EXPERIMENTAL DE LA RECUPERACION Y REGENERACION DE LA MAGNETITA . . . . .	112
6.7.1	PARTE EXPERIMENTAL . . . . .	113

**CAPITULO 7: RESULTADOS**

7.1	TAMARO DE LAS PARTICULAS DE MAGNETITA . . . . .	118
7.2	EPECTO DE LA DOSIS DE MAGNETITA . . . . .	118
7.3	INFLUENCIA DEL pH . . . . .	120
7.4	INFLUENCIA DE LA GRADIENTE DE VELOCIDAD . . . . .	122
7.5	TIEMPO DE CONTACTO . . . . .	124
7.6	SEDIMENTACION . . . . .	125



7.7	INFLUENCIA DEL CAMPO MAGNETICO EN LA SEDIMENTACION . . . . .	132
7.8	INFLUENCIA DE LA ALCALINIDAD . . . . .	137
7.9	RANGO DE TURBIEDAD . . . . .	139
7.9.1	TRATAMIENTO MAGNETITA . . . . .	139
7.9.2	TRATAMIENTO MAGNETITA-COAGULANTE . . . . .	141
7.10	RECUPERACION Y REGENERACION DE LA MAGNETITA . . . . .	141
7.10.1	PREPARACION DEL AGUA DE LAVADO . . . . .	141
7.10.2	LAVADO DE LA MAGNETITA . . . . .	142

**CAPITULO 8: DESCRIPCION DEL PROCESO DE CLARIFICACION**

8.1	PROCESO DE TRATAMIENTO MAGNETITA . . . . .	217
8.2	PROCESO DE TRATAMIENTO MAGNETITA-COAGULANTE . . . . .	220

**CAPITULO 9: DESCRIPCION DEL PROCESO DE RECUPERACION Y REGENERACION DE LA MAGNETITA**

9.1	DESCRIPCION DEL PROCESO . . . . .	223
-----	-----------------------------------	-----

**CAPITULO 10: EVALUACION TECNICO-ECONOMICA**

10.1	EVALUACION TECNICA . . . . .	227
10.2	EVALUACION ECONOMICA . . . . .	228
10.2.1	COSTO DE LOS INSUMOS QUIMICOS DEL TRATAMIENTO MAGNETITA . . . . .	229
10.2.2	COSTO DE LOS INSUMOS QUIMICOS DEL DE TRATAMIENTO MAGNETITA-SULFATO . . . . .	230
10.2.3	COSTO DE INSUMOS QUIMICOS DEL TRATAMIENTO CONVENCIONAL . . . . .	232
10.2.4	ANALISIS COMPARATIVO . . . . .	233

**CAPITULO 11: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

CONCLUSIONES . . . . .	234
RECOMENDACIONES . . . . .	237

ANEXOS . . . . .	238
------------------	-----

**REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

## RESUMEN DE FIGURAS

FIGURA N°	DESCRIPCION	PAGINA N°
2-1	TAMAÑO DE LAS PARTICULAS COLOIDALES . . . . .	30
2-2	EL COLOIDE Y SU DOBLE CAPA ELECTRICA. . . . .	36
2-3	VARIACION DEL ESPESOR DE LA CAPA DIFUSA EN RELACION A LA CONCENTRACION DE IONES. . . . .	39
4-1	ORIENTACION DE LOS MOMENTOS DIPOLOS MAGNETICOS EN UN DOMINIO. . . . .	48
4-2	UBICACION DE LOS YACIMIENTOS MINEROS QUE CONTIENEN MAGNETITA. . . . .	50
4-3	PRODUCCION DE HIERRO ANUAL . . . . .	52
5-1	LINEAS DE FUERZA DEL CAMPO MAGNETICO . . . . .	55
5-2	ESPIRA DE UN ALAMBRE . . . . .	57
5-3	LINEAS DE FUERZA . . . . .	57
5-4	FUERZA SOBRE UNA PARTICULA CARGADA EN MOVIMIENTO . . . . .	58
6-1	EQUIPO DE PRUEBA DE JARRAS . . . . .	60
6-2	SIFON O TOMADOR DE MUESTRAS . . . . .	63
6-3	COMPARADOR PARA ESTIMAR EL TAMAÑO DEL FLOC PRODUCIDO EN LA COAGULACION (SEGÚN WRA) . . . . .	66
6-4	DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO MAGNETITA . . . . .	75
6-5	DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO MAGNETITA-COAGULANTE . . . . .	75
6-6	ESQUEMA DEL PROCEDIMIENTO SEGUIDO EN LA FASE MAGNETITA PARA LA MUESTRA TIPO I . . . . .	77
6-7	ESQUEMA DEL PROCESO SEGUIDO EN LA FASE MAGNETITA-COAGULANTE PARA LA MUESTRA TIPO I . . . . .	78
6-8	ESQUEMA DEL PROCEDIMIENTO SEGUIDO EN LA FASE MAGNETITA PARA LA MUESTRA TIPO II . . . . .	79
6-9	ESQUEMA DEL PROCESO SEGUIDO EN LA FASE MAGNETITA-COAGULANTE PARA LA MUESTRA TIPO II . . . . .	80
6-10	ESQUEMA DEL PROCEDIMIENTO SEGUIDO EN LA FASE MAGNETITA PARA LA MUESTRA TIPO III . . . . .	81
6-11	ESQUEMA DEL PROCESO SEGUIDO EN LA FASE MAGNETITA-COAGULANTE PARA LA MUESTRA TIPO III . . . . .	82
6-12	ESQUEMA DEL PROCEDIMIENTO SEGUIDO EN LA FASE MAGNETITA PARA LA MUESTRA TIPO IV . . . . .	83
6-13	ESQUEMA DEL PROCESO SEGUIDO EN LA FASE MAGNETITA-COAGULANTE PARA LA MUESTRA TIPO IV . . . . .	84
6-14	ESQUEMA DEL PROCESO DE LA LIMPIEZA Y REGENERACION DE LA MAGNETITA . . . . .	85
7-1	COMPARACION DE LAS CURVAS DE SEDIMENTABILIDAD PARA LAS MUESTRAS DE TIPO I Y III CUANDO SE UTILIZA EL PROCESO MAGNETITA . . . . .	126

FIGURA N°	DESCRIPCION	PAGINA N°
7-2	COMPARACION DE LAS CURVAS DE SEDIMENTABILIDAD PARA LAS MUESTRAS DE TIPO II Y IV CUANDO SE UTILIZA EL PROCESO MAGNETITA . . . . .	127
7-3	VELOCIDAD DE SEDIMENTACION VS. TURBIEDAD REMANENTE MUESTRA TIPO I . . . . .	128
7-4	VELOCIDAD DE SEDIMENTACION VS. TURBIEDAD REMANENTE MUESTRA TIPO II . . . . .	129
7-5	VELOCIDAD DE SEDIMENTACION VS. TURBIEDAD REMANENTE MUESTRA TIPO III . . . . .	130
7-6	VELOCIDAD DE SEDIMENTACION VS. TURBIEDAD REMANENTE MUESTRA TIPO IV . . . . .	131
7-7	INFLUENCIA DEL CAMPO MAGNETICO EN LA SEDIMENTACION . . . . .	134
7-8	IMAN ARTIFICIAL (SOLENOIDE) . . . . .	135
7-9	IMAN NATURAL . . . . .	136
7-10	INFLUENCIA DE LA ALCALINIDAD (PROCESO MAGNETITA) . . . . .	138
7-11	DOSIS DE MAGNETITA VS. TURBIEDAD CUANDO SE EMPLEA EL PROCESO MAGNETITA . . . . .	140

**AGUA TIPO I**

**PROCESO MAGNETITA :**

7-12	DOSIS OPTIMA DE MAGNETITA . . . . .	144
7-13	pH OPTIMO . . . . .	145
7-14	NUEVA DOSIS OPTIMA DE MAGNETITA . . . . .	146
7-15	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE MEZCLA RAPIDA . . . . .	147
7-16	TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION MAGNETICA Y SEDIMENTACION . . . . .	148
7-17	EFICIENCIA DE SEDIMENTABILIDAD . . . . .	149
7-18	DOSIS OPTIMA DE SULFATO DE ALUMINIO . . . . .	150

**PROCESO MAGNETITA-SULFATO :**

7-19	NUEVA DOSIS OPTIMA DE MAGNETITA . . . . .	151
7-20	CONCENTRACION OPTIMA DE SULFATO DE ALUMINIO . . . . .	152
7-21	pH OPTIMO . . . . .	153
7-22	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR1 . . . . .	154
7-23	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR2 . . . . .	155
7-24	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION . . . . .	156
7-25	TURBIEDAD FINAL VS. GRADIENTE DE VELOCIDAD . . . . .	157
7-26	VARIACION DEL GRADIENTE DE VELOCIDAD OPTIMA EN FUNCION DEL TIEMPO DE FLOCULACION . . . . .	158
7-27	TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION MAGNETICA Y SEDIMENTACION . . . . .	159

FIGURA N°	DESCRIPCION	PAGINA N°
7-28	EFICIENCIA DE SEDIMENTABILIDAD . . . . .	160
7-29	DOSIS OPTIMA DE SULFATO DE ALUMINIO . . . . .	161
7-30	EFICIENCIA DE SEDIMENTABILIDAD . . . . .	162

**AGUA TIPO II**

**PROCESO MAGNETITA :**

7-31	DOSIS OPTIMA DE MAGNETITA . . . . .	163
7-32	pH OPTIMO . . . . .	164
7-33	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE MEZCLA RAPIDA . . . . .	165
7-34	TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION MAGNETICA Y SEDIMENTACION . . . . .	166
7-35	EFICIENCIA DE SEDIMENTABILIDAD . . . . .	167

**PROCESO MAGNETITA-SULFATO :**

7-36	DOSIS OPTIMA DE SULFATO DE ALUMINIO . . . . .	168
7-37	NUEVA DOSIS OPTIMA DE MAGNETITA . . . . .	169
7-38	CONCENTRACION OPTIMA DE SULFATO DE ALUMINIO . . . . .	170
7-39	pH OPTIMO . . . . .	171
7-40	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR1 . . . . .	172
7-41	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR2 . . . . .	173
7-42	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION . . . . .	174
7-43	TURBIEDAD FINAL VS. GRADIENTE DE VELOCIDAD . . . . .	175
7-44	VARIACION DEL GRADIENTE DE VELOCIDAD OPTIMO EN FUNCION DEL TIEMPO DE FLOCULACION . . . . .	176
7-45	TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION MAGNETICA Y SEDIMENTACION . . . . .	177
7-46	EFICIENCIA DE SEDIMENTABILIDAD . . . . .	178

**PROCESO SULFATO DE ALUMINIO :**

7-47	DOSIS OPTIMA DE SULFATO DE ALUMINIO . . . . .	179
7-48	EFICIENCIA DE SEDIMENTABILIDAD . . . . .	180

**AGUA TIPO III**

**PROCESO MAGNETITA :**

7-49	DOSIS OPTIMA DE MAGNETITA . . . . .	181
7-50	pH OPTIMO . . . . .	182
7-51	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE MEZCLA RAPIDA . . . . .	183
7-52	TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION MAGNETICA Y SEDIMENTACION . . . . .	184
7-53	EFICIENCIA DE SEDIMENTABILIDAD . . . . .	185

**PROCESO MAGNETITA-SULFATO :**

7-54	DOSIS OPTIMA DE SULFATO DE ALUMINIO . . . . .	186
------	---	-----

FIGURA N°	DESCRIPCION	PAGINA N°
7-55	NUEVA DOSIS OPTIMA DE MAGNETITA . . . . .	187
7-56	CONCENTRACION OPTIMA DE SULFATO DE ALUMINIO . . . . .	188
7-57	pH OPTIMO . . . . .	189
7-58	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR1 . . . . .	190
7-59	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR2 . . . . .	191
7-60	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION . . . . .	192
7-61	TURBIEDAD FINAL VS. GRADIENTE DE VELOCIDAD . . . . .	193
7-62	VARIACION DEL GRADIENTE DE VELOCIDAD OPTIMA EN FUNCION DEL TIEMPO DE FLOCULACION . . . . .	194
7-63	TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION MAGNETICA Y SEDIMENTACION . . . . .	195
7-64	EFICIENCIA DE SEDIMENTABILIDAD . . . . .	196
<b>PROCESO SULFATO DE ALUMINIO :</b>		
7-65	DOSIS OPTIMA DE SULFATO DE ALUMINIO . . . . .	197
7-66	EFICIENCIA DE SEDIMENTABILIDAD . . . . .	198
<b>AGUA TIPO IV</b>		
<b>PROCESO MAGNETITA :</b>		
7-67	DOSIS OPTIMA DE MAGNETITA . . . . .	199
7-68	pH OPTIMO . . . . .	200
7-69	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE MEZCLA RAPIDA . . . . .	201
7-70	TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION MAGNETICA Y SEDIMENTACION . . . . .	202
7-71	EFICIENCIA DE SEDIMENTABILIDAD . . . . .	203
<b>PROCESO MAGNETITA-SULFATO :</b>		
7-72	DOSIS OPTIMA DE SULFATO DE ALUMINIO . . . . .	204
7-73	NUEVA DOSIS OPTIMA DE MAGNETITA . . . . .	205
7-74	CONCENTRACION OPTIMA DE SULFATO DE ALUMINIO . . . . .	206
7-75	pH OPTIMO . . . . .	207
7-76	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR1 . . . . .	208
7-77	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR2 . . . . .	209
7-78	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION . . . . .	210
7-79	TURBIEDAD FINAL VS. GRADIENTE DE VELOCIDAD . . . . .	211
7-80	VARIACION DEL GRADIENTE DE VELOCIDAD OPTIMA EN FUNCION DEL TIEMPO DE FLOCULACION . . . . .	212
7-81	TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION MAGNETICA Y SEDIMENTACION . . . . .	213
7-82	EFICIENCIA DE SEDIMENTABILIDAD . . . . .	214
<b>PROCESO SULFATO DE ALUMINIO :</b>		
7-83	DOSIS OPTIMA DE SULFATO DE ALUMINIO . . . . .	215
7-84	EFICIENCIA DE SEDIMENTABILIDAD . . . . .	216

FIGURA N°	DESCRIPCION	PAGINA N°
8-1	DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE TRATAMIENTO MAGNETITA . . . . .	218
8-2	DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE TRATAMIENTO MAGNETITA-COAGULANTE . . . . .	221
9-1	DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO REGENERACION DE LA MAGNETITA . . . . .	224

**ANEXOS**

A-1	DOSIFICADOR EN SECO . . . . .	348
A-2	DOSIFICADOR DE SOLUCIONES, VISTA DE PRENTE . . . . .	348
A-3	DOSIFICADOR DE SOLUCIONES, VISTA DE PERFIL . . . . .	349
A-4	AGUA CRUDA . . . . .	350
A-5	FLOCULACION DEL AGUA . . . . .	350
A-6	LA MAGNETITA . . . . .	351
A-7	MUESTRA MACROSCOPICA DEL MINERAL DE HIERRO . . . . .	351

## RESUMEN DE CUADROS

CUADRO N°	DESCRIPCION	PAGINA N°
1-1	NORMA NACIONAL . . . . .	23
1-2	CALIDAD MICROBIOLOGICA Y BIOLOGICA . . . . .	24
1-3	COMPONENTES INORGANICOS QUE INFLUYEN SOBRE LA SALUD . . . . .	25
1-4	QUIMICOS ORGANICOS DE SIGNIFICACION A LA SALUD EN EL AGUA DE BEBIDA . . . . .	25
1-5	CALIDAD ORGANOLEPTICA . . . . .	28
1-6	COMPONENTES RADIOACTIVOS . . . . .	28
6-1	INDICE DE FLOCULACION DE WILLCOMB . . . . .	65
6-2	METODOLOGIA DE ANALISIS . . . . .	73
6-3	SECUENCIA DEL PROCESO DE LAS PRUEBAS PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE MEZCLA RAPIDA Y TIEMPOS DIFERENTES DE PERMANENCIA . . . . .	86
6-4	SECUENCIA DEL PROCESO DE LAS PRUEBAS PARA DIFERENTES TIEMPOS DE FLOCULACION MAGNETICA Y TIEMPOS DE PERMANENCIA . . . . .	88
6-5	SECUENCIA DEL PROCESO PARA LA OPTIMIZACION DEL GRADIENTE DE MEZCLA RAPIDA Y TIEMPO DE PERMANENCIA . . . . .	92
6-6	SECUENCIA DEL PROCESO DE OPTIMIZACION DE MEZCLA RAPIDA Y TIEMPO DE PERMANENCIA EN LA UNIDAD . . . . .	94
6-7	SECUENCIA DEL PROCESO DE OPTIMIZACION DEL GRADIENTE DE MEZCLA LENTA Y TIEMPO DE PERMANENCIA . . . . .	96
6-8	SECUENCIA DEL PROCESO DE OPTIMIZACION DE FLOCULACION MAGNETICA Y TIEMPO DE SEDIMENTACION . . . . .	97
6-9	SECUENCIA DEL PROCESO DE LAS PRUEBAS PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE MEZCLA RAPIDA Y TIEMPOS DE PERMANENCIA . . . . .	99
6-10	SECUENCIA DEL PROCESO DE LAS PRUEBAS PARA DIFERENTES TIEMPOS DE FLOCULACION MAGNETICA Y TIEMPOS DE SEDIMENTACION . . . . .	101
6-11	SECUENCIA DEL PROCESO PARA LA OPTIMIZACION DEL GRADIENTE DE MEZCLA RAPIDA Y TIEMPO DE PERMANENCIA . . . . .	105
6-12	SECUENCIA DEL PROCESO DE OPTIMIZACION DE MEZCLA RAPIDA Y TIEMPO DE PERMANENCIA EN LA UNIDA . . . . .	106
6-13	SECUENCIA DEL PROCESO DE OPTIMIZACION DEL GRADIENTE DE MEZCLA LENTA Y TIEMPO DE PERMANENCIA . . . . .	108
6-14	SECUENCIA DEL PROCESO DE OPTIMACION DE FLOCULACION MAGNETICA Y TIEMPO DE SEDIMENTACION . . . . .	109
6-15	VALORES DE MEZCLA RAPIDA, LENTA Y SEDIMENTACION, UTILIZADOS EN LOS DIFERENTES ENSAYOS, PARA CADA TIPO DE AGUA . . . . .	111
7-1	RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS PARA CADA TIPO DE AGUA EN ESTUDIO . . . . .	116

CUADRO N°	DESCRIPCION	PAGINA N°
7-2	PRINCIPALES CARACTERISTICAS INICIALES DE LAS MUESTRAS ESTUDIADAS . . . . .	117
7-3	CARACTERISTICAS FINALES PARA CADA TIPO DE AGUA . . . . .	117
7-4	DOSIS OPTIMA DE MAGNETITA REQUERIDA EN CADA TIPO DE AGUA CUANDO SE EMPLEA LA ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO MAGNETITA . . . . .	119
7-5	pH FINALES PARA CADA TIPO DE MUESTRA CUANDO SE EMPLEA LA ALTERNATIVA MAGNETITA . . . . .	121
7-6	pH FINALES PARA CADA TIPO DE MUESTRA CUANDO SE EMPLEA LA ALTERNATIVA MAGNETITA-COAGULANTE . . . . .	121
7-7	% DE ALCALINIDAD CONSUMIDA EN CADA UNO DE LOS TIPOS DE AGUA Y TRATAMIENTOS ESTUDIADOS . . . . .	137
9-1	NUEVOS REQUERIMIENTOS DE LAVADO CUANDO SE REUTILIZA EL AGUA ALCALINA . . . . .	226
10-1	COSTOS DE LOS INSUMOS QUIMICOS . . . . .	228
10-2	COSTOS DE LOS INSUMOS QUIMICOS UTILIZADOS EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA CON MAGNETITA . . . . .	230
10-3	COSTOS DE LOS INSUMOS QUIMICOS UTILIZADOS EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA CUANDO SE EMPLEA EL PROCESO SULFATO-MAGNETITA . . . . .	232
10-4	COSTOS DE LOS INSUMOS QUIMICOS UTILIZADOS EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA CON SULFATO DE ALUMINIO . . . . .	233
10-5	COSTOS COMPARATIVOS DE LOS TRATAMIENTOS ESTUDIADOS . . . . .	233

**ANEXOS**

**AGUA TIPO I**

**PROCESO MAGNETITA :**

A-1	DOSIS ÓPTIMA DE MAGNETITA . . . . .	238
A-2	PH OPTIMO . . . . .	239
A-3	NUEVA DOSIS DE MAGNETITA . . . . .	240
A-4	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE MEZCLA RAPIDA (v = 100 rpm) . . . . .	241
A-5	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE MEZCLA RAPIDA (v = 200 rpm) . . . . .	242
A-6	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE MEZCLA RAPIDA (v = 300 rpm) . . . . .	243
A-7	TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACIÓN MAGNETICA . . . . .	244
A-8	NUEVA DOSIS OPTIMA DE MAGNETITA . . . . .	245
A-9	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE MEZCLA RAPIDA (v = 100 rpm) . . . . .	246
A-10	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE MEZCLA RAPIDA (v = 200 rpm) . . . . .	247
A-11	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE MEZCLA RAPIDA (v = 300 rpm) . . . . .	248
A-12	TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION MAGNETICA Y SEDIMENTACION . . . . .	249



**PROCESO MAGNETITA-SULFATO :**

A-13	DOSIS OPTIMA DE SULFATO DE ALUMINIO . . . . .	250
A-14	NUEVA DOSIS OPTIMA DE MAGNETITA . . . . .	251
A-15	CONCENTRACION OPTIMA DE SULFATO DE ALUMINIO . . . . .	252
A-16	PH OPTIMO . . . . .	253
A-17	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR1 (v = 100 rpm) . . . . .	254
A-18	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR1 (v = 200 rpm) . . . . .	255
A-19	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR1 (v = 300 rpm) . . . . .	256
A-20	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR2 (v = 100 rpm) . . . . .	257
A-21	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR2 (v = 200 rpm) . . . . .	258
A-22	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR2 (v = 300 rpm) . . . . .	259
A-23	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION (G = 40 s <sup>-1</sup> ) . . . . .	260
A-24	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION (G = 60 s <sup>-1</sup> ) . . . . .	261
A-25	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION (G = 68 s <sup>-1</sup> ) . . . . .	262
A-26	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION (G = 80 s <sup>-1</sup> ) . . . . .	263
A-27	TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION MAGNETICA Y SEDIMENTACION . . . . .	264

**PROCESO SULFATO DE ALUMINIO :**

A-28	DOSIS OPTIMA Y SEDIMENTACION DEL SULFATO DE ALUMINIO . . . . .	265
------	--	-----

**AGUA TIPO II****PROCESO MAGNETITA :**

A-29	DOSIS OPTIMA DE MAGNETITA . . . . .	266
A-30	PH OPTIMO . . . . .	267
A-31	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE MEZCLA RAPIDA (v = 150 rpm) . . . . .	268
A-32	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE MEZCLA RAPIDA (v = 200 rpm) . . . . .	269
A-33	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE MEZCLA RAPIDA (v = 250 rpm) . . . . .	270
A-34	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE MEZCLA RAPIDA (v = 300 rpm) . . . . .	271
A-35	TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION MAGNETICA . . . . .	272

**PROCESO MAGNETITA-SULFATO :**

A-36	DOSIS OPTIMA DE SULFATO DE ALUMINIO . . . . .	273
A-37	NUEVA DOSIS OPTIMA DE MAGNETITA . . . . .	274
A-38	CONCENTRACION OPTIMA DE SULFATO DE ALUMINIO . . . . .	275
A-39	PH OPTIMO . . . . .	276
A-40	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR1 (v = 200 rpm) . . . . .	277
A-41	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR1 (v = 250 rpm) . . . . .	278
A-42	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR1 (v = 300 rpm) . . . . .	279
A-43	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR2 (v = 150 rpm) . . . . .	280
A-44	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR2 (v = 200 rpm) . . . . .	281

CUADRO N°	DESCRIPCION	PAGINA N°
-----------	-------------	-----------

A-45	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR2 ( $v = 250 \text{ rpm}$ ) . . . . .	282
A-46	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR2 ( $v = 300 \text{ rpm}$ ) . . . . .	283
A-47	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION ( $G = 40 \text{ s}^{-1}$ ) . . . . .	284
A-48	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION ( $G = 60 \text{ s}^{-1}$ ) . . . . .	285
A-49	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION ( $G = 68 \text{ s}^{-1}$ ) . . . . .	286
A-50	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION ( $G = 80 \text{ s}^{-1}$ ) . . . . .	287
A-51	TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION MAGNETICA Y SEDIMENTACION . . . . .	288

**PROCESO SULFATO DE ALUMINIO :**

A-52	DOSIS OPTIMA Y SEDIMENTACION DEL SULFATO DE ALUMINIO . . . . .	289
------	--	-----

**AGUA TIPO III**

**PROCESO MAGNETITA :**

A-53	DOSIS OPTIMA DE MAGNETITA . . . . .	290
A-54	PH OPTIMO . . . . .	291
A-55	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE MEZCLA RAPIDA ( $v = 150 \text{ rpm}$ ) . . . . .	292
A-56	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE MEZCLA RAPIDA ( $v = 200 \text{ rpm}$ ) . . . . .	293
A-57	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE MEZCLA RAPIDA ( $v = 250 \text{ rpm}$ ) . . . . .	294
A-58	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE MEZCLA RAPIDA ( $v = 300 \text{ rpm}$ ) . . . . .	295
A-59	TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION MAGNETICA Y SEDIMENTACION . . . . .	296
A-60	DOSIS OPTIMA DE SULFATO DE ALUMINIO . . . . .	297
A-61	NUEVA DOSIS OPTIMA DE MAGNETITA . . . . .	298
A-62	CONCENTRACION OPTIMA DE SULFATO DE ALUMINIO . . . . .	299
A-63	PH OPTIMO . . . . .	300
A-64	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR1 ( $v = 150 \text{ rpm}$ ) . . . . .	301
A-65	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR1 ( $v = 200 \text{ rpm}$ ) . . . . .	302
A-66	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR1 ( $v = 250 \text{ rpm}$ ) . . . . .	303
A-67	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR1 ( $v = 300 \text{ rpm}$ ) . . . . .	304
A-68	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR2 ( $v = 150 \text{ rpm}$ ) . . . . .	305
A-69	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR2 ( $v = 200 \text{ rpm}$ ) . . . . .	306
A-70	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR2 ( $v = 250 \text{ rpm}$ ) . . . . .	307
A-71	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR2 ( $v = 300 \text{ rpm}$ ) . . . . .	308
A-72	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION ( $G = 40 \text{ s}^{-1}$ ) . . . . .	309
A-73	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION ( $G = 60 \text{ s}^{-1}$ ) . . . . .	310
A-74	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION ( $G = 68 \text{ s}^{-1}$ ) . . . . .	311
A-75	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION ( $G = 80 \text{ s}^{-1}$ ) . . . . .	312
A-76	TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION MAGNETICA Y SEDIMENTACION . . . . .	313

**PROCESO SULFATO DE ALUMINIO :**

A-77	DOSIS OPTIMA Y SEDIMENTACION DEL SULFATO DE ALUMINIO . . . . .	314
------	--	-----

## AGUA TIPO IV

## PROCESO MAGNETITA :

A-78	DOSIS OPTIMA DE MAGNETITA . . . . .	315
A-79	PH OPTIMO . . . . .	316
A-80	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE MEZCLA RAPIDA ( $v = 150 \text{ rpm}$ ) . . . . .	317
A-81	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE MEZCLA RAPIDA ( $v = 200 \text{ rpm}$ ) . . . . .	318
A-82	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE MEZCLA RAPIDA ( $v = 250 \text{ rpm}$ ) . . . . .	319
A-83	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE MEZCLA RAPIDA ( $v = 300 \text{ rpm}$ ) . . . . .	320
A-84	TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION MAGNETICA Y SEDIMENTACION . . . . .	321

## PROCESO MAGNETITA-SULFATO :

A-85	DOSIS OPTIMA DE SULFATO DE ALUMINIO . . . . .	322
A-86	NUEVA DOSIS OPTIMA DE MAGNETITA . . . . .	323
A-87	CONCENTRACION OPTIMA DE SULFATO DE ALUMINIO . . . . .	324
A-88	PH OPTIMO . . . . .	325
A-89	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR1 ( $v = 150 \text{ rpm}$ ) . . . . .	326
A-90	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR1 ( $v = 200 \text{ rpm}$ ) . . . . .	327
A-91	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR1 ( $v = 250 \text{ rpm}$ ) . . . . .	328
A-92	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR1 ( $v = 300 \text{ rpm}$ ) . . . . .	329
A-93	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR2 ( $v = 150 \text{ rpm}$ ) . . . . .	330
A-94	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR2 ( $v = 200 \text{ rpm}$ ) . . . . .	331
A-95	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR2 ( $v = 250 \text{ rpm}$ ) . . . . .	332
A-96	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR2 ( $v = 300 \text{ rpm}$ ) . . . . .	333
A-97	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION ( $G = 40 \text{ s}^{-1}$ ) . . . . .	334
A-98	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION ( $G = 60 \text{ s}^{-1}$ ) . . . . .	335
A-99	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION ( $G = 68 \text{ s}^{-1}$ ) . . . . .	336
A-100	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION ( $G = 80 \text{ s}^{-1}$ ) . . . . .	337
A-101	TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION MAGNETICA Y SEDIMENTACION . . . . .	338

## PROCESO SULFATO DE ALUMINIO :

A-102	DOSIS OPTIMA Y SEDIMENTACION DEL SULFATO DE ALUMINIO . . . . .	339
A-103	CALIBRACION DE LA SONDA UGN-3501T . . . . .	346
A-104	INTENSIDAD MAGNETICA DEL IMAN NATURAL . . . . .	347
A-105	INTENSIDADES MAGNETICAS DEL SOLENOIDE . . . . .	347

## NOMENCLATURA GENERAL

A <sub>1</sub>	ALCALINIDAD DEL AGUA DESIONIZADA
A <sub>2</sub>	ALCALINIDAD DEL AGUA DE LA RED PUBLICA
A <sub>f</sub>	ALCALINIDAD FINAL
V <sub>1</sub>	VOLUMEN DE AGUA DESIONIZADA
V <sub>2</sub>	VOLUMEN DE AGUA DE LA RED PUBLICA
DM	DOSIS DE MAGNETITA
Dm	DOSIS DE MAGNETITA
MR	MEZCLA RAPIDA
Mr	MEZCLA RAPIDA
MR1	MEZCLA RAPIDA PARA LA MAGNETITA
MR2	MEZCLA RAPIDA PARA EL SULFATO DE ALUMINIO
ML	MEZCLA LENTA
PM	FLOCULACION MAGNETICA
SED	SEDIMENTACION
t	TIEMPO
T	TIEMPO DE FLOCULACION
TPM	TIEMPO DE FLOCULACION MAGNETICA
t <sub>mr</sub>	TIEMPO DE MEZCLA RAPIDA
T <sub>mr1</sub>	TIEMPO DE MEZCLA RAPIDA PARA LA MAGNETITA
T <sub>mr2</sub>	TIEMPO DE MEZCLA RAPIDA PARA EL SULFATO DE ALUMINIO
T <sub>ml</sub>	TIEMPO DE MEZCLA LENTA
Cc	CONCENTRACION DE COAGULANTE
Dc	DOSIS DE COAGULANTE
V	VELOCIDAD
V <sub>s</sub>	VELOCIDAD DE SEDIMENTACION
V <sub>mr</sub>	VELOCIDAD DE MEZCLA RAPIDA
V <sub>mr1</sub>	VELOCIDAD DE MEZCLA RAPIDA PARA LA MAGNETITA
V <sub>mr2</sub>	VELOCIDAD DE MEZCLA RAPIDA PARA EL SULFATO DE ALUMINIO
V <sub>ml</sub>	VELOCIDAD DE MEZCLA LENTA
ppm	PARTES POR MILLON
UNT	UNIDADES NEPELOMETRICAS DE TURBIEDAD
UC	UNIDADES DE COLOR
A <sup>o</sup>	ALCALINIDAD INICIAL
T <sup>o</sup>	TURBIEDAD INICIAL
C	COLOR INICIAL
G	GRADIENTE DE VELOCIDAD
W	PESO
PM	PESO MOLECULAR
O	VALENCIA
r	COEFICIENTE DE CORRELACION

" El agua es un recurso natural escaso, indispensable para la vida y para el ejercicio de la inmensa mayoría de las actividades económicas; es irrenplazable, no ampliable por la mera voluntad del hombre, irregular en su forma de presentarse en el tiempo y en el espacio, fácilmente vulnerable y susceptible de usos sucesivos.

Así mismo, el agua constituye un recurso unitario que se renueva a través del ciclo hidrológico y que conserva, a efectos prácticos, una magnitud casi constante dentro de cada una de las cuencas hidrográficas del país.

El agua es un recurso que debe estar disponible no solo en la cantidad necesaria sino también en la calidad precisa."

## RESUMEN

En el presente estudio se evidenció la utilización de la magnetita como medio adsorbente de turbiedad y color en el tratamiento del agua. La magnetita como coagulante primario no ofrece resultados satisfactorios, en cambio, su utilización como ayudante de coagulación suele ser más eficiente que el empleo del sulfato de aluminio solo, sin embargo su costo no lo hace tan competitivo como este último.

Los diferentes ensayos, fueron realizados en los ambientes del laboratorio N° 20 de la Facultad de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Nacional de Ingeniería. Para obtener el rango de funcionamiento de esta técnica de tratamiento, fue necesario trabajar con cuatro tipos diferentes de agua, las que se obtuvieron, variando la turbiedad y alcalinidad. Dos fueron las técnicas estudiadas en esta investigación, la primera consistió en usar la magnetita como único material de remoción de turbiedad, demostrándose que su utilización no afecta en gran medida el valor del pH, sin embargo su acción si depende de éste ( $\text{pH} < 7$ ). La segunda técnica de tratamiento estudiada consistió en combinar la utilización de la magnetita con un coagulante, se seleccionó el sulfato de aluminio por ser un reactivo económico y de mayor uso en el tratamiento del agua, el pH de acción de este tratamiento suele estar dentro del rango 7-8. Con la finalidad de acelerar el proceso de sedimentación, se recurrió a la acción de un campo magnético, se comprobó que la intensidad del campo y la forma de aplicación, influyen en la eficiencia del tratamiento, este efecto suele tener mayor importancia cuando se utiliza magnetita sola, la utilización conjunta del sulfato de aluminio con la magnetita no se ve influenciada en gran medida, debido a la poca cantidad de hierro en suspensión cuando se aplica dicho campo.

Los ensayos de pruebas de jarras, ayudaron no solamente, a determinar la utilización de la magnetita en el tratamiento del agua

sino que también permitieron la determinación de los valores, de los diferentes parámetros que influyen en cada uno de los procesos estudiados, entre los cuales se tiene gradiente de velocidad, tiempo de floculación magnética, tiempo de sedimentación, y otros. Las diferentes muestras empleadas fueron caracterizadas antes y después de cada proceso, el criterio de calidad de agua seguido fue considerando fundamentalmente la turbiedad y el color, además se realizaron otros análisis que fueron de interés conocerlos porque permiten confirmar la efectividad o no de estos dos procesos, los mismos se realizaron siguiendo las técnicas que se indican en los Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales.

Una de las ventajas del proceso estudiado, es la viabilidad para reutilizar el mineral clarificador (magnetita). La limpieza y regeneración se logra, utilizando lavados alcalinos (agua-soda cáustica) a  $\text{pH}=11.5$ , seguidos de ejuages sucesivos con agua, obteniéndose de esta manera, magnetita limpia y regenerada lista para volver a ser utilizada. El efecto que se produce durante el lavado alcalino, es el cambio de carga (negativo a positivo) en toda la superficie de la magnetita, de tal manera que los coloides (carga negativa) adsorbidos, son desprendidos por tener la misma carga.

Cabe mencionar, una vez más, que el uso de la magnetita en cualquiera de sus formas, permite un agua con  $\text{pH}$  muy cercano al neutro. este efecto, depende de las dosis que se agregue, mayores dosis permitirán un mayor acercamiento, menores dosis no favoreceran la neutralización.

## INTRODUCCION

No cabe duda que sin agua no existiría rastro alguno sobre la tierra, tanto el hombre como los animales, plantas y toda forma de vida no pueden prescindir de este elemento. Desde los primeros tiempos de la vida del hombre en la tierra, el agua se tomaba tal como se encontraba, pero con el crecimiento de la población y el adelanto de la civilización, las fuentes de que se disponían fueron contaminándose de tal manera que ellas no sólo constituyeran una fuente de consumo, sino que también eran utilizadas como medio de disposición final de los desechos, siendo así necesario que estas reciban un tratamiento antes de su consumo.

El tratamiento del agua como se verá más adelante se remonta desde hace siglos atrás, y gracias a ello, el hombre no está obligado a aceptar la calidad del agua que la naturaleza le ofrece, sino que puede modificarla para satisfacer sus necesidades.

La coagulación-floculación del agua constituye el proceso más importante usado en el tratamiento de aguas superficiales, pues determinan en gran medida las condiciones de operación de las plantas dependiendo casi por completo la mayor o menor eficiencia del proceso siguiente, el de separación de los sólidos por sedimentación y/o filtración. Es conocido que la clarificación del agua con coagulantes convencionales (sulfato de aluminio, cloruro férrico y otros) muchas veces no suele ser efectiva, sin embargo su utilización conjunta con otros, permite la obtención de sobrenadantes con mejores características.

El estudio de la magnetita como coagulante data de 1977, las bibliografías existentes indican que su utilización conjunta con el sulfato de aluminio permite notables mejoras en la calidad del agua,



por lo que, con la finalidad de determinar su eficiencia en el tratamiento del agua, se plantea este trabajo de investigación.

## HISTORIA DEL TRATAMIENTO DEL AGUA

Los conocimientos más antiguos del tratamiento del agua se remontan a dos mil años antes de Cristo. En aquella época no solo se recurría a la ebullición y filtración como medios del tratamiento del agua, sino que también se empleaban sustancias minerales y vegetales, como coagulantes.

Se cree que el sulfato de aluminio, coagulante más usado en la actualidad, fue conocido por los egipcios hace unos dos mil años antes de Cristo, no obstante el primer dato histórico que se tiene de esta sustancia data del año 77 de nuestra era, año en que PLINIO describe a la cal y al sulfato de aluminio como sustancias que convertían las aguas amargas en potables, pero fue recién a partir del siglo XV en donde la preparación del sulfato de aluminio alcanzó proporciones considerables.

Durante la Edad Media, el arte del tratamiento del agua no progresó demasiado.

Así, durante muchos años el tratamiento del agua tuvo carácter doméstico y tanto la coagulación como la filtración fueron empleados en forma separada.

Fue recién en el año de 1804 en Inglaterra (Paisley, Escocia) que se pensó por primera vez hacer una instalación de filtro para toda una población, más tarde en 1829 en Londres (Chelsea) se construyó la primera planta de filtros lentos de arena y debido a la elevada demanda que presentaba el agua filtrada se fue estudiando más detalladamente la filtración, formándose dos escuelas: los que creían en la filtración

descendente (de arriba hacia abajo) y los que creían en la filtración ascendente (de abajo hacia arriba), impusiéndose lentamente los primeros.

A mediados del siglo pasado aparecieron en Norteamérica los filtros rápidos, unidades de fácil operación que permitían el uso de cargas superficiales considerablemente mayores que la de los filtros lentos. Construyéndose el primer filtro rápido en la ciudad de Somerville (Estados Unidos) en 1855.

En 1884 se concedió la primera patente sobre coagulación-filtración a Isaiah Smith Hyatt, quien describió el empleo del percloruro de fierro como coagulante en su sistema de filtración. Un año más tarde, 1885, la compañía Somerville y Raritan Water adoptó el sistema de coagulación-filtración de Hyatt, por consiguiente, después de tantos siglos en que se emplearon por separado la coagulación y filtración se combinaron definitivamente, y a partir de esa fecha la coagulación se empleó como paso previo a la filtración.

Este sistema pasó a Bélgica, Alemania y Francia, pero debido a que el coagulante se adicionaba momentos antes de que el agua ingresase al filtro se producía frecuentemente la colmatación del lecho filtrante lo que obligaba a gastar mucha agua de lavado para la limpieza. Por este motivo y como se tenía conocimiento de que en Holanda en 1880 se había construido un sistema de sedimentadores con coagulación de sulfato de aluminio como pretratamiento para un sistema de filtros lentos, se introdujo el sistema de coagulación-sedimentación como paso previo a la filtración rápida en la planta de Louisville en 1898 y más tarde en Little Fall.

Así, a fines del siglo XIX el empleo de este sistema y el uso del sulfato de aluminio como coagulante más adecuado, se empleaba a gran escala en los Estados Unidos.

Durante los primeros cincuenta años del presente siglo, el tratamiento del agua permaneció casi inmodificable. Fue en la década del 60 en donde se produjo un avance significativo, aparecieron los polielectrolitos, los medios filtrantes múltiples, etc.

Después de las grandes innovaciones que aparecieron en la década del 60, el tratamiento del agua sigue siendo estudiado y las investigaciones que se producen, son publicadas en revistas técnicas de países desarrollados, lamentablemente, muchas veces no tenemos acceso a ellas y hay que esperar varios años para que dichas técnicas sean conocidas y aplicadas en países como el nuestro.

Por su parte, el Programa de Salud Ambiental de la organización Panamericana de la Salud y el CEPIS, han desarrollado una serie de tecnologías de tratamiento de agua basadas en unidades hidráulicas, las cuales prescinde de energía eléctrica. Esta tecnología, que plasma notables investigaciones científicas en estructuras sencillas y económicas han reforzado el extraordinario avance tecnológico que se viene desarrollando en este campo del tratamiento del agua.

## OBJETIVOS

### Objetivo General:

Determinar la eficiencia, que produce la aplicación de la magnetita como un clarificador en el tratamiento del agua.

### Objetivos Específicos:

- Reducir color y turbidez de las aguas naturales y por ende la cantidad de microorganismos presentes.
- Determinar los parámetros físicos y químicos que influyen en el proceso.
- Acelerar el proceso de tratamiento, y
- Determinar el costo de la nueva técnica de tratamiento.

## ANTECEDENTES

Hacia el año de 1976, el problema que afrontaban muchos municipios australianos era el alto contenido de color y turbiedad que presentaban las aguas naturales, así como el costo elevado que demandaba la potabilización del agua y la lentitud del proceso convencional. Debido a ello, surgió en este país la necesidad de buscar nuevas técnicas de clarificación del agua y es así, que la Comunidad Científica Australiana y la Organización Industrial de Investigación (CSIRO) desarrollaron un nuevo proceso de clarificación al cual denominaron SIROFLOC (Kolarik et al, 1977).

Esencialmente el proceso SIROFLOC es un proceso usada para la remoción de turbiedad y color coloidal, sin embargo otros estudios realizados han determinado que puede remover bacterias (De Latour & Kolm, 1976), algas (Bitton et al, 1975) y virus (Bitton et al, 1976 y Bitton & Mitchell, 1974). El proceso consiste básicamente en agregar magnetita al agua cruda bajo ciertas condiciones, luego el agua es pasada por un magneto y posteriormente es sedimentada.

El desarrollo de esta investigación desde simples pruebas de jarras hasta su ejecución en una planta piloto fue llevado a cabo durante los años 1977 y 1978. El principal logro de este estudio fue el de demostrar que esta técnica era barata y rápida, además, también se comprobó que no era necesario construir una planta piloto para la investigación, y que sólo bastaba realizar simples pruebas de jarras.

Actualmente, están funcionando dos plantas SIROFLOC una en Perth que trata 35 ML/d de agua y otra en Tasmania de 20 ML/d de capacidad.

Capítulo 1

**CALIDAD DEL AGUA**

## 1.1 CARACTERISTICAS DEL AGUA

En la naturaleza el agua contiene muchos compuestos en estado coloidal o disueltos los cuales provienen de las más diversas fuentes, tales como la erosión de suelos y rocas; reacciones de disolución y precipitación que ocurren bajo la superficie de la tierra y también de los efectos que resultan de las actividades del hombre.

Muchos de los elementos o compuestos que se encuentran en el agua desvirtúan su condición original tanto desde el punto de vista físico como desde el punto de vista químico.

### 1.1.1 CARACTERISTICAS FISICAS

Se entiende por características físicas, aquellas que en general pueden ser percibidas directamente por los órganos sensoriales del hombre y pueden clasificarse en turbiedad, color, olor, sabor, temperatura y pH.

#### 1.1.1.1 Turbiedad

Es la principal característica física. Se denomina así al fenómeno que se produce al incidir sobre las partículas o coloides un haz de luz, éste es dispersado en cantidades directamente proporcionales a la presencia de los coloides, dependiendo del tamaño y cantidad de los mismos.

La turbiedad del agua se debe esencialmente a materias en suspensión, tales como arcilla y otras sustancias inorgánicas finamente divididas, o

materias similares y organismos microscópicos.

La turbiedad del agua puede ayudar a indicar un peligro potencial, ya que éste puede estar relacionado con la contaminación.

Un elevado grado de turbiedad puede proteger a los microorganismos patógenos de los efectos de la desinfección y estimular su desarrollo. En consecuencia en todo los casos en que se desinfecta el agua, la turbiedad debe ser escasa (preferiblemente inferior a 1 UTN) para que el procedimiento resulte eficaz.

#### 1.1.1.2 Color

Es el parámetro físico más importante después de la turbiedad, y aunque está íntimamente ligada a ella puede presentarse como característica independiente.

El color se debe a la presencia de taninos, ligninas, ácidos húmicos, ácidos grasos, ácidos fúlvicos, etc. Se puede decir, que el color natural del agua, excluyendo del que resulta de descargas industriales, puede provenir de: (a) la extracción acuosa de sustancias de origen vegetal; (b) la solución de productos resultantes en el proceso de descomposición de la madera; (c) la solución de materia orgánica del suelo; (d) la presencia de hierros y otros compuestos metálicos; y (e) una combinación de los procesos descritos.



### 1.1.1.3 Olor

El olor del agua obedece fundamentalmente a la presencia de sustancias orgánicas. Algunos olores señalan el aumento de la actividad biológica; otros, pueden originarse de la contaminación industrial.

Los olores pueden clasificarse como sigue:

Aromático	similar a	alcanfor
Químico	" "	descargas industriales
Hidrocarburos	" "	petróleo
Medicinal	" "	tintura de yodo
Sulfuroso	" "	hidrógeno sulfurado
Graso	" "	aceite y grasa rancias
Desagradable	" "	excrementos de animales
Balsámico	" "	violeta, rosa
Mohoso	" "	hojas en descomposición
Terroso	" "	Tierras húmedas
Vegetal	" "	raíces

Las aguas de uso potable deben estar exentas de olor, al igual que el color.

### 1.1.1.4 Sabor

Un agua de buena calidad tiene que ser

insabora. Su clasificación puede ser hecha distinguiendo los siguientes sabores:

- Acido
- Dulce
- Salado, y
- Amargo

Así, un contenido elevado de sales de magnesio le da al agua un sabor amargo. Los metales como el cobre, zinc y hierro dan al agua un sabor metálico. Los sabores metálicos en particular, pueden constituir una indicación de contaminación del agua por parte de descargas industriales.

#### 1.1.1.5 Temperatura

La temperatura está determinada por múltiples factores potencialmente ambientales que la hacen variar continuamente. Generalmente este parámetro no se acondiciona, se presenta en forma natural. La temperatura es un parámetro importante porque influye en el retardo o aceleración de la actividad biológica, la adsorción de oxígeno, la precipitación de compuestos, la formación de depósitos, la desinfección mediante cloro y también indirectamente en los procesos de mezcla, floculación, sedimentación y filtración.

#### 1.1.1.6 pH

Las aguas que se encuentran en la naturaleza

tienen valores de pH que varían entre 5 y 8,5. Las aguas subterráneas tienen un valor constante de pH, lo mismo que las aguas superficiales, no obstante éstas últimas presentan pequeñas variaciones estacionales.

Las variaciones repentinas de pH representan contaminaciones debidas a descargas industriales ácidas o básicas.

### 1.1.2 CARACTERISTICAS QUIMICAS

Si consideramos el agua como el solvente universal, ésta puede contener cualquiera de los elementos de la tabla periódica. Sin embargo son pocos los que son significativos con relación a su presencia en el agua y los efectos que éstos puedan producir durante los procesos de tratamiento y en general en la salud humana.

A continuación se describen los principales parámetros químicos de las fuentes cuyas aguas son tratadas para el consumo humano.

#### 1.1.2.1 Alcalinidad

Representa los contenidos de bicarbonatos, carbonatos e hidratos que pueden provenir tanto del terreno como de químicos adicionados en los procesos de depuración. Normalmente este parámetro se utiliza para definir las sustancias que deben utilizarse en los procesos de tratamientos químicos y anticorrosivos de las aguas, más puede servir también

como indicador de alarma, porque una elevada alcalinidad, especialmente en aguas superficiales, puede deberse a descargas industriales.

#### 1.1.2.2 Amonio

Se le puede considerar como un constituyente normal de las aguas superficiales, pero en cantidades superiores a 0,1 mg/l (como N) puede ser índice de contaminación por aguas servidas o residuos industriales.

Este elemento está considerado como un micronutriente para microorganismos y algas en los sistemas de distribución. Además su presencia influye en los procesos de desinfección con cloro, incrementando su demanda debido a la formación de cloraminas.

#### 1.1.2.3 Arsénico

Puede encontrarse en el agua como resultado de la disolución de minerales, descargas industriales o la aplicación de insecticidas.

Los compuestos de arsénico son muy tóxicos y producen intoxicación crónica, arsenismo, debido a su efecto acumulativo, ya que su eliminación es muy lenta.

#### 1.1.2.4 Bario

La razón de la baja concentración de bario en aguas es su insolubilidad. Normalmente no existen en aguas naturales. Su fuente principal son los residuos industriales.

No hay estudios completos de la cantidad de bario que puede tolerarse en el agua potable. Lo que si se sabe, es que en bajas concentraciones es un estimulante cardíaco y a elevadas concentraciones puede ser un veneno del sistema nervioso central.

#### 1.1.2.5 Cadmio

Este elemento es concentrado y magnificado en la cadena trófica y es muy tóxico. La principal fuente de contaminación son las emisiones atmosféricas, el cadmio se usa como aditivo de la gasolina y se emite en los escapes de automóviles. El cadmio atmosférico finalmente se encuentra en suelos y agua cuando es arrastrado por las lluvias.

Otra fuente de contaminación son las industrias mineras y de electroplatinado. Además de las descargas industriales, las tuberías de metal o plástico constituyen una posible fuente de cadmio en el agua.

El cadmio es un elemento biológicamente no esencial para el organismo y se le conoce como un elemento de alto potencial tóxico. Tiende a

encontrarse en el hígado, riñón, páncreas y tiroides de los humanos y animales.

#### 1.1.2.6 Cloruros

Los cloruros son abundantes en la naturaleza y pueden ser encontrados en todas las aguas, desde el agua de lluvia (1 - 3 mg/l) hasta el agua de mar (20,000 mg/l); además de ello, constituyen en su forma más común cloruro de sodio, un compuesto de diaria ocurrencia en la dieta humana. De ahí que los límites que puedan fijarse en el agua potable se basen más en razones del gusto que le imparten al agua que por motivos de salubridad.

Por lo general las aguas superficiales no contienen cloruros en cantidades tan altas como afectar sus condiciones de sabor, excepto en aquellas fuentes provenientes de terrenos salinos o de acuíferos con influencia de corrientes marinas.

#### 1.1.2.7 Cromo

Normalmente este elemento no existe en las aguas naturales, pero puede encontrarse en aguas que están expuestas a la contaminación industrial, talleres de cromado, curtidurías, etc.

El cromo, en estado hexavalente tiene propiedades cancerígenas y provoca bloqueos enzimáticos, mientras que en el estado trivalente no parece tener estos efectos nocivos. Por sus adversos

efectos fisiológicos, la OMS recomienda que el límite en fuentes de agua destinadas a consumo humano no exceda de 0,05 mg/l.

#### 1.1.2.8 Cobre

Este elemento puede encontrarse en forma natural en las aguas pero muy rara vez en concentraciones superiores a 1 mg/l. Se le considera como un elemento benéfico para el metabolismo y su deficiencia está asociado con anemia nutricional de los niños. No obstante se debe tener cuidado con la presencia de una elevada concentración de este metal, ya que forma un veneno del sistema nervioso central.

#### 1.1.2.9 Cianuro

Proviene de descargas de industrias galvánicas y metalúrgicas. Es un veneno del sistema nervioso central, un veneno enzimático y causa parálisis del sistema respiratorio. Su eliminación de las aguas se realiza con facilidad, pues en presencia de cloro el cianuro se transforma en cianato.

#### 1.1.2.10 Dureza

La dureza no es importante en la determinación de la contaminación de un agua, pero si es importante desde el punto de vista técnico.

La dureza depende de los contenidos de cal y magnesio que vienen disueltos en un agua por su

elevado poder solvente.

#### 1.1.2.11 Fenoles

Su presencia en las aguas naturales está relacionada con la descomposición de hojas y materia orgánica, ácidos húmicos y fúlvicos, pero principalmente se le asocia a procesos de contaminación de las fuentes por desechos industriales, aguas servidas, fungicidas y pesticidas, hidrólisis y oxidación de pesticidas organofosforados, degradación bacteriológica de herbicidas del ácido fenoxialquílico, etc.

El principal efecto que causan los fenoles aún en cantidades muy pequeñas está en el cambio de las condiciones organolépticas del agua de bebida.

#### 1.1.2.12 Fosfatos

Esta sustancia se encuentra presente en muchos compuestos químicos como detergentes domésticos e industriales, fertilizantes orina, etc.

La pesquisa de estos componentes es hecha sólo en aguas superficiales. En aguas subterráneas los fosfatos no alcanzan a llegar ya que son retenidos en los estratos superiores del terreno.

Es necesario hacer notar que los fosfatos junto con los nitratos causan fenómenos de eutroficación en aguas superficiales.



Cuando se encuentran fosfatos en cualquier concentración, inclusive pequeñas (de algunos mg/l), deben ser analizados también otros contaminantes, seguramente presentes, y efectuar también análisis bacteriológicos.

#### 1.1.2.13 Nitritos

La presencia de nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) puede resultar de la oxidación del amoníaco o puede provenir de descargas industriales. La presencia de nitritos en las aguas superficiales, una vez excluida la posibilidad de contaminación industrial, indica una contaminación por aguas negras reciente. Normalmente es difícil encontrar nitritos en aguas subterráneas.

#### 1.1.2.14 Nitratos

Los nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) en el agua pueden provenir de descargas domésticas o ser de origen animal, según la transformación de amoníaco a nitritos y luego nitratos, o pueden derivarse de la escorrentía de aguas de lluvias en terrenos tratados con fertilizantes a base de nitrato de amonio.

Una elevada cantidad de nitratos en el agua potable puede causar metahemoglobinemia infantil.

Cuando en un agua subterránea se encuentran sólo nitratos y no nitritos ni amoníaco significa que los estratos superficiales del terreno están contaminados y que en éstos hay mineralización de

substancias orgánicas que, en cualquier momento pueden provocar contaminación del agua.

#### 1.1.2.15 Fluoruro

El contenido de fluoruros en las aguas puede ser de origen natural o procedente de descargas industriales. La concentración máxima en un agua potable es de 1.5 mg/l, porque arriba de este valor se pueden encontrar problemas de fluorosis dentarias en los niños (manchas en los dientes), así como también se pueden tener daños en los huesos.

#### 1.1.2.16 Hierro

El hierro se puede encontrar en solución en aguas subterráneas, pero su presencia es menos frecuente en aguas superficiales.

Las aguas subterráneas pueden enriquecerse de este elemento al pasar a través de rocas conteniendo mineral de hierro, mientras que en aguas superficiales, éste proviene del lavado provocado por las aguas de lluvias en terrenos que contienen este mineral o por descargas industriales.

Normalmente la presencia del hierro no tiene un significado de contaminación, sin embargo provoca inconvenientes desde el punto de vista higiénico y alimenticio, ya que puede contener bacterias que impiden una correcta desinfección y por otro lado, causar sabor desagradable al agua y manchar la ropa.

#### 1.1.2.17 Manganeso

Se puede encontrar manganeso en las aguas subterráneas muchas veces junto con hierro, no obstante es más común encontrar sólo hierro. El manganeso proviene de terrenos magnificados y este elemento queda en solución en forma de bicarbonatos y luego, cuando el agua entra en contacto con el aire, se oxida formando flóculos menores.

El manganeso no es un índice de contaminación, pero no debe estar presente en aguas potables por las mismas razones del hierro.

#### 1.1.2.18 Mercurio

Este elemento raras veces se encuentra en aguas naturales, su presencia se debe a contaminaciones principalmente industriales.

Apesar de que el mercurio no se encuentra comprendido entre los elementos tóxicos de un agua potable, es de hacer notar que este elemento es un veneno del sistema nervioso central, del corazón, de los vasos sanguíneos y provoca bloqueos enzimáticos.

#### 1.1.2.19 Oxígeno disuelto

Se encuentra en solución en todas las aguas superficiales y subterráneas. La presencia de oxígeno en el agua es debida a la adsorción de este elemento del aire. En las aguas subterráneas se debe a el agua

de lluvia, la cual retiene este elemento, atraviesa el terreno hasta llegar a los mantos acuíferos, en donde se mantiene constante el nivel de  $O_2$ , mientras que en las aguas superficiales los contenidos cambian continuamente debido a variaciones de temperaturas externas, al movimiento del agua, a fenómenos fotosintéticos, etc.

El contenido de oxígeno en el agua debe ser de 4 mg/l porque de bajo de este nivel la fauna y la flora pueden tener problemas de vida y podemos encontrar también fenómenos de corrosión en las tuberías. Por todo lo anteriormente descrito se puede decir que la concentración de oxígeno es uno de los parámetros más significativos para tener una idea del grado de pureza e higiene de un agua superficial; ya que un nivel bajo es un indicador de la llegada de aguas residuales consumidoras de oxígeno.

#### 1.1.2.20 Pesticidas

Se entiende por pesticidas los compuestos químicos que son utilizados para eliminar insectos, hongos, hiervas y plantas dañinas para la agricultura. Estos compuestos tienen diferentes características químicas, según su campo de aplicación y cuando son utilizados en cantidades impropias, pueden llegar a las aguas subterráneas y superficiales. Son clasificados como mutágenos, neurotóxicos, teratogénicos y hepatotóxicos. Aún en trazas pequeñas, pueden modificar las características organolépticas del agua y pueden generar acumulacio-

nes en la cadena alimenticia.

#### 1.1.2.21 Plata

La presencia de este elemento en las aguas naturales es muy escaso. Puede tener efectos puramente estéticos en las personas debido a la decoloración permanente e irreversible de la piel, los ojos y las membranas mucosas.

#### 1.1.2.22 Plomo

En general, las aguas naturales no contienen plomo a menos que provengan de contaminación industrial (pilas, pinturas, minas), o del empleo de tuberías de ese metal o de plástico estabilizado con compuestos de plomo.

El plomo está clasificado como un veneno del sistema nervioso central, puede causar bloqueos enzimáticos, degeneración de la grasa del hígado y es potencialmente cancerígeno.

#### 1.1.2.23 Selenio

Es muy raro encontrarlo disuelto en las aguas naturales a no ser que tenga como origen una contaminación minera o industrial.

El selenio en cantidades trazas constituye un micronutriente, a concentraciones mayores puede ejercer efectos nocivos sobre los mamíferos.

#### 1.1.2.24 Sulfatos

En general las aguas naturales no contienen cantidades altas de sulfatos, en cantidades apreciables pueden tener efectos sobre el sabor y actuar como laxantes, especialmente en comunidades no habituadas al agua de estas condiciones.

#### 1.1.2.25 Zinc

Se encuentra en las aguas superficiales provenientes de las descargas de las industrias galvánicas. El zinc es un veneno del sistema nervioso central, provoca bloqueos enzimáticos y es potencialmente cancerígeno.

### 1.1.3 CARACTERISTICAS MICROBIOLOGICAS

El agua es un elemento que recibe las más distintas formas de microorganismos, pues a ella llegan del aire, del suelo, de las aguas residuales, de las aguas de desechos, de las aguas cloacales, etc., formando muchos de estos microorganismos, la microflora natural, ya que otras desaparecen debido a condiciones adversas o desfavorables a su desarrollo. Sin embargo no se puede decir que exista una microflora específica, ya que varía debido a factores de orden físico o químico existentes en dichas aguas.

Entre los microorganismos presentes en el agua tenemos: bacterias, virus, hongos, algas y otros organismos del plancton.

### 1.1.3.1 Bacterias

La presencia de bacterias en el agua, es mucho más predominante que la de otros tipos de microorganismos y de acuerdo a su origen se agrupan en tres tipos:

#### a) Bacterias del agua propiamente dichas

Llamadas también bacterias naturales, tienen poca importancia sanitaria ya que no son patógenas ni para el hombre ni para los animales. Entre ellas se tiene: *Serratia marcescens*, *Chromobacterium violaceum*, *B. ochraceum*, *Flavobacterium aurantiacum*, *Pseudomonas fluorescens*, *Micrococcus candidans*, *M. coronatus*, *M. aquatilis*, *Sarcina lutea*, etc

#### b) Bacterias del suelo

Existe una microflora muy variada debido al íntimo contacto de las aguas superficiales con el suelo, en especial en época de lluvias las bacterias cuyo medio normal es la tierra se incorporan al agua adheridas a partículas de polvo. Las bacterias del suelo no son patógenas para el hombre, pero producen inconvenientes en las plantas de tratamiento o en las redes de distribución. Ellas se clasifican en bacterias esporuladas y no esporuladas como *Bacillus megathrium*, *B.*

*subtilis*, *B. mycoides* pertenecientes a la microflora esporulada del suelo como así también representantes del grupo *Agotobacter*, *Areobacter* y otros coliformes.

### c) Bacterias de origen intestinal

Son patógenas y por lo tanto son las de mayor importancia desde el punto de vista sanitario. Entre estas bacterias se tiene: *Salmonella typhi* causante de la fiebre tifoidea, *S. paratyphi* y la *S. schottmuelleri* causantes de la fiebres paratíficas y las diarreas de verano, *shigella dysenteriae*, *vibrio cholerae* y *Francisella tularensis*.

Aparte de las bacterias patógenas mencionadas se tiene también dentro de esta clasificación a las bacterias que alberga y elimina diariamente el intestino humano y de los animales y que aunque no son estrictamente patógenas son importantes porque constituyen prueba de contaminación por materia fecal. Los principales representantes de este tipo de bacterias son:

**Bacilos Gram Positivos:** Su respiración es anaeróbica y son esporulados, pertenecen al género *Clostridium*. Existen algunas especies patógenas para el hombre pero en condiciones muy especiales como por ejemplo a través de heridas. Por encontrarse ampliamente distri-



buidos en la naturaleza, su importancia como índice de contaminación fecal es muy relativa.

**Bacilos Gram Positivos:** Los organismos de este grupo son: *Streptococcus faecalis*, *S. faecalis var. liquefaciens*, *S. faecalis var. zymogenes*, *S. faecium*, *S. durans*, *S. bovis* y *Streptococcus equinus*. Estos microorganismos generalmente se encuentran en el tracto intestinal del hombre y de los animales, de ahí que se consideren como indicadores de la contaminación. Estas bacterias están consideradas como parásitos y su supervivencia en el agua es muy precaria, por lo que su presencia es indicativa de contaminación fecal reciente.

**Cocobacilos Gram Negativos:** Su respiración es anaeróbica facultativa, son no esporulados, pertenecen a este grupo los géneros: *Proteus*, *Escherichia* y *Aerobacter*. Los primeros se encuentran presentes en los líquidos cloacales y a menudo en las aguas superficiales. Algunas especies son causantes de trastornos intestinales. Las bacterias pertenecientes al género *Escherichia* son en gran número; la especie tipo y que se encuentra en grandes cantidades en el intestino del hombre y de los animales es la *Escherichia coli*. Las del género *Aerobacter*, son típicas del suelo y de las plantas, pudiendo también aparecer en el intestino humano, pero no es huésped normal y

característico como el *Escherichia coli*. Tanto las bacterias del género *Escherichia* y las del género *Aerobacter* integran un grupo de alta significación sanitaria, el grupo *Coliforme*. La investigación de bacterias coliformes constituye la base del examen sanitario del agua, es hasta ahora el mejor índice de contaminación y el medio más conveniente de demostrar la peligrosidad de uso para consumo humano.

#### 1.1.3.2 Virus

Son organismos vivos muy pequeños con características químicas diferentes a los demás microorganismos (ADN ó ARN) y que sólo son posibles de identificarlos mediante el uso del microscopio electrónico.

El grupo más importante, es el de los *ENTEROVIRUS*, que son los que afectan el tracto gastrointestinal y son eliminados por los enfermos a través de las heces. Llegan al agua como lo hacen las bacterias responsables de las enfermedades hídricas. Dentro de este grupo de virus merece destacar al agente responsable de una enfermedad muy común la hepatitis infecciosa, así como a los de la poliomielitis y a los responsables de las llamadas gastroenteritis virales.

Estos virus se caracterizan por su elevada resistencia, muy superior en general a la de las

bacterias; presentando gran estabilidad en el agua durante prolongados períodos y por el escaso efecto que tiene sobre ellos los agentes químicos y físicos que afectan en cambio la supervivencia de las bacterias.

#### 1.1.3.3 Algas y Protozoos

Las algas y los protozoos son los microorganismos del agua por excelencia, con poblaciones abundantes y con una gran variedad. Las poblaciones de algas se caracterizan por su tremenda fluctuación con respecto a la disponibilidad de nutrientes, temperatura y a la estación del año.

Los protozoarios se alimentan de las algas y pueden así reducir las grandes avenidas de algas hacia un número casi imperceptible en poco tiempo, relativamente, a lo que sigue la muerte de los protozoarios y a un nuevo florecimiento algal.

Un protozoario patógeno es la *Entamoeba histolytica* causante de la disentería bacilar, que también es transmitida a través del agua contaminada.

Estos microorganismos son responsables también de gustos y olores desagradables en el agua.

#### 1.1.3.4 Hongos y otros microorganismos del plancton

Los hongos acuáticos son poco conocidos, con la excepción de algunos patógenos de peces. Los hongos

invasores del agua provienen de varias fuentes, pero siempre existe una población nativa que se alimenta de la materia orgánica presente. En algunas ocasiones, los hongos forman crecimiento filamentosos en el agua corriente casi siempre en cultivos mixtos con algas y bacterias.

## 1.2 NORMAS DE CALIDAD

El agua potable no debe contener microorganismos ni sustancias químicas en concentraciones que puedan amenazar la salud del hombre; además debe ser tan agradable como las circunstancias lo permitan. Es muy importante que el agua destinada al consumo humano sea fresca, transparente e incolora y que carezca de sabores u olores desagradables.

Algunos países han establecido normas nacionales de calidad y han alcanzado cierta uniformidad en los métodos de análisis y en la expresión de los resultados. Otros, en cambio, aún carecen de normas oficiales de calidad o no poseen métodos aceptados para evaluar ésta.

Al prepararse normas nacionales sobre el agua potable es preciso tener en cuenta las variadas condiciones geográficas, socioeconómicas, dietéticas e industriales de cada lugar.

### 1.2.1 NORMA NACIONAL.

A continuación se presentan los valores-pautas de calidad físico-química para el agua potable recomendados por el Ministerio de Salud.

Cuadro N° 1-1  
NORMA NACIONAL

Parámetro	Unidad	Valor guía
Turbiedad	UTN	10
Color	Unidades	20
Sólidos totales	mg/l	1000
Fierro (Fe)	mg/l	0,25
Plomo (Pb)	mg/l	0,10
Cobre (Cu)	mg/l	3
Arsénico (As)	mg/l	0,10
Bario (Ba)	mg/l	No se ha fijado
Cadmio (Cd)	mg/l	No se ha fijado
Manganeso (Mn)	mg/l	0,25
Zinc (Zn)	mg/l	15
Selenio (Se)	mg/l	0,05
Boro (B)	mg/l	2
Fluoruro (F)	mg/l	No se ha fijado
Cianuro (Cn)	mg/l	No se ha fijado
Sílice (SiO <sub>2</sub> )	mg/l	No se ha fijado
Magnesio (Mg <sup>++</sup> )	mg/l	125
Sulfatos (SO <sub>4</sub> )	mg/l	250
Cloruros (Cl)	mg/l	250
Dureza total (CaCO <sub>3</sub> )	mg/l	250
Alcal. total (CaCO <sub>3</sub> )	mg/l	120
Fenoles	mg/l	No se ha fijado
Detergentes aniónicos	mg/l	No se ha fijado
pH		10,60
Cromo	mg/l	No se ha fijado
Mercurio	mg/l	No se ha fijado
Nitrato (N)	mg/l	No se ha fijado
Aluminio	mg/l	No se ha fijado
Sodio	mg/l	No se ha fijado

### 1.2.2 GUIAS PARA LA CALIDAD DE AGUA POTABLE

En 1958 la OMS publicó por vez primera las Normas Internacionales para el Agua Potable con el fin de que se utilice como instrumento para mejorar la calidad del agua y su tratamiento. En los años de 1963 y 1971 se publicaron la segunda y tercera edición respectivamente. En la actualidad se encuentra vigente las GUIAS PARA LA CALIDAD DEL AGUA POTABLE, publicada en 1984 la cual reemplazó a las normas internacionales de 1971. A continuación se presentan los valores-guías que la OMS recomienda.

Cuadro N° 1-2  
CALIDAD MICROBIOLÓGICA Y BIOLÓGICA

Organismo	Unidad	Valor guía
<b>Calidad Microbiológica:</b>		
<b>1. Agua distribuida por tuberías</b>		
<b>1.1 Agua sometida a tratamiento que entra en el sistema de distribución.</b>		
Bacterias coliformes fecales	Número/100 ml	0
Bacterias coliformes	Número/100 ml	0
<b>1.2 Agua no sometida a tratamiento que entra en el sistema de distribución</b>		
Bacterias coliformes fecales	Número/100 ml	0
Bacterias coliformes	Número/100 ml	0 (a)
Bacterias coliformes	Número/100 ml	3 (b)
<b>1.3 Agua en el sistema de distribución</b>		
Bacterias coliformes fecales	Número/100 ml	0
Bacterias coliformes	Número/100 ml	0 (c)
Bacterias coliformes	Número/100 ml	3 (b)
<b>2. Agua no distribuida por tuberías</b>		
Bacterias coliformes fecales	Número/100 ml	0
Bacterias coliformes	Número/100 ml	10
<b>3. Agua embotellada</b>		
Bacterias coliformes fecales	Número/100 ml	0
Bacterias coliformes	Número/100 ml	0
<b>4. Abastecimiento de agua en situaciones de emergencia</b>		
Bacterias coliformes fecales	Número/100 ml	0
Bacterias coliformes	Número/100 ml	0
Enterovirus	-	No se ha fijado
<b>Calidad biológica:</b>		
Protozoarios (patógenos)	-	No se ha fijado
Helminfos (patógenos)	-	No se ha fijado
Organismos de vida libre (algas, otros)	-	No se ha fijado

(a) En el 98% de las muestras examinadas durante el año.

(b) Ocasionalmente en alguna muestra, pero no en muestras consecutivas.

(c) En el 95% de las muestras examinadas durante el año.

Cuadro N° 1-3  
COMPONENTES INORGANICOS QUE INFLUYEN SOBRE LA SALUD

Componente	Unidad	Valor guía
Antimonio	mg/l	0,005 (P)
Arsénico	mg/l	0,010 (*)
Amianto	-	no se ha fijado
Bario	mg/l	0,700
Berilio	-	no se ha fijado
Boro	mg/l	0,300
Cadmio	mg/l	0,003
Cianuro	mg/l	0,070
Cromo	mg/l	0,050 (P)
Cobre	mg/l	2 (**)
Fluoruro	mg/l	1,5
Mercurio (total)	mg/l	0,001
Níquel	mg/l	0,020
Nitrato (como NO <sub>3</sub> )	mg/l	50
Nitrito (como NO <sub>2</sub> )	mg/l	3
Plata	-	no se ha fijado
Plomo	mg/l	0,010
Selenio	mg/l	0,010

Cuadro N° 1-4  
QUIMICOS ORGANICOS DE SIGNIFICACION A LA SALUD EN EL AGUA DE BEBIDA

Compuesto	Unidad	Valor guía
<b>ORGANICOS</b>		
<b>a) Alcanos clorados</b>		
Tetracloruro de carbono	µg/l	2
Diclorometano	µg/l	20
1,1-dicloroetano	-	no se ha fijado
1,2-dicloroetano	µg/l	30 (*)
1,1,1-tricloroetano	µg/l	2000
<b>b) Etenos clorados</b>		
Cloruro de vinilo	µg/l	5
1,1-dicloroetano	µg/l	30 (*)
1,2-dicloroetenos	µg/l	50
Tricloro eteno	µg/l	70 (P)
Tetracloroetano	µg/l	40
<b>c) Hidrocarburos aromaticos</b>		
Benceno	µg/l	10 (*)
Tolueno	µg/l	700 (**)
Xilenos	µg/l	500 (**)
Etil benceno	µg/l	300 (**)

Compuestos	Unidad	Valor guía
Estireno	µg/l	20
Benzopireno	µg/l	0,7 (*)
<b>d) Bencenos clorados</b>		
Monoclorobenceno	µg/l	300 (**)
1,2-diclorobenceno	µg/l	1000(**)
1,3-diclorobenceno	-	no se ha fijado
1,4-diclorobenceno	µg/l	300 (**)
Triclorobencenos (total)	µg/l	20 (**)
<b>e) Orgánicos miscelaneos</b>		
Di-2-etilhexil adipato	µg/l	80
Di-2-etilhexyl fitalato	µg/l	8
Acrilamida	µg/l	0,5 (*)
Epicloridrina	µg/l	0,4 (P)
Hexaclorobutadieno	µg/l	0,6
Edta	µg/l	200 (P)
Acido nitrilo-triacético	µg/l	200
Oxido de tributiltina	µg/l	2
<b>PESTICIDAS</b>		
Alaclor	µ/l	20
Aldicarb	µ/l	10
Aldrin/dieldrin	µ/l	0,03
Atrazina	µ/l	2
Bentazona	µ/l	30
Carbofurano	µ/l	5
Clordano	µ/l	0,02
Clorotoluron	µ/l	30
DDT	µ/l	2
1,2 dibromo-3-cloropropano	µ/l	1 (*)
2,4-D	µ/l	30
1,2-dicloropropano	µ/l	20
1,3-dicloropropeno	µ/l	20 (*)
Dibromuro de etileno	-	no se ha fijado
Heptacloro y epoxido de heptacloro	µ/l	0,03
Hexaclorobenceno	µ/l	1 (*)
Isoproturon	µ/l	9
Lindano	µ/l	2
Mcpa	µ/l	2
Metoxyclo	µ/l	20
Metalaclor	µ/l	10
Molinate	µ/l	6
Pendimetalin	µ/l	20



Compuestos	Unidad	Valor guía
Pentacloro fenol	μ/l	9 (*)
Permetrina	μ/l	20
Propanil	μ/l	20
Piridato	μ/l	100
Simazina	μ/l	2
Trifluralina	μ/l	20
<b>HERBICIDAS</b>		
2,4-D	μ/l	30
Mcpa	μ/l	2
Dicloropropano	μ/l	100
2,4-db	μ/l	90
2,4,5-T	μ/l	9
Silvex	μ/l	9
Mecoprop	μ/l	10
<b>DESINFECTANTES</b>		
Monocloraminas	mg/l	3
Cloro	mg/l	5
<b>SUBPRODUCTOS DE LA DESINFECCION</b>		
Bromato	μg/l	25 (*)
Clorito	μg/l	200 (P)
<b>CLOROFENOLES</b>		
2,4,6-Triclorofenol	μg/l	200 (*)
Formaldehido	μg/l	900
<b>TRIHALOMETANOS</b>		
Bromoformo	μg/l	100
Dibromoclorometano	μg/l	100
Bromodiclorometano	μg/l	60 (*)
Cloroformo	μg/l	200 (*)
Acido dicloroacetico	μg/l	50 (P)
Acido tricloroacetico	μg/l	100 (P)
Hidrato clorado de tricloroacetaldehido	μg/l	10 (P)
Cloro propanonas	-	no se ha fijado
Dicloroacetoniitrilo	μg/l	90 (P)
Dibromoacetoniitrilo	μg/l	100 (P)
Bromocloroacetoniitrilo	-	no se ha fijado

- (\*\*) Concentraciones de la sustancia menores o iguales al valor guía, basados en criterios de salud, pueden afectar el olor o sabor del agua.
- (P) Valores guías provisionales. Este término es usado en constituyentes para los cuales hay alguna evidencia del riesgo potencial, siendo limitada la información disponible sobre efectos a la salud.
- (\*) Para sustancias que se consideran carcinogénicas, el valor guía es la concentración en el agua de bebida, con un grado de riesgo de cáncer durante un período de vida de  $10^{-5}$ , (un caso adicional de cáncer en una población de 100.000, que ingiere el agua de bebida con un contenido de la sustancia igual al valor guía, durante 70 años).

Cuadro N°1-5  
CALIDAD ORGANOLEPTICA

Componente o característica	Unidad	Valor guía
Acido sulfhídrico	-	No detectable por los consumidores.
Aluminio	mg/l	0,200
Cloruros	mg/l	250
Cobre	mg/l	1
Color	UCT	15
Detergentes	-	no se ha fijado
Dureza	-	(D)
Hierro	mg/l	0,300
Manganeso	mg/l	0,100
Oxígeno disuelto	-	no se ha fijado
pH	-	6,5 a 8,5
Sabor y olor	-	Debe ser aceptable
Sodio	mg/l	200
Sulfatos	mg/l	250
Temperatura	-	Debe ser aceptable
Total de sólidos en disolución	mg/l	1000
Turbiedad	UTN	5
Zinc	mg/l	3

Cuadro N°1-6  
COMPONENTES RADIOACTIVOS

Componente	Unidad	Valor guía
Radiactividad alfa global	Bq/l	0,1
Radiactividad beta global	Bq/l	1,0

(D) : Alta dureza: incrustaciones.  
Baja dureza: formación de espuma.

Capítulo 2

**COAGULACION**

## 2.1 GENERALIDADES

Coagulación es la desestabilización eléctrica de las partículas coloidales por una reducción de aquellas fuerzas que tienden a mantenerlas separadas, de manera tal que se aproximen unas a otras lo suficiente para ser atraídas.

Las sustancias que originan la turbiedad, están constituidas en su mayor parte por minerales calizos y organismos microscópicos, que se presentan en tamaños muy variables que oscilan entre los suficientemente grandes para que sedimenten con facilidad y aquellos que son suficientemente pequeños para permanecer en suspensión durante períodos largos de tiempo. Así para la eliminación de las partículas finas que comunican turbiedad al agua es necesario el proceso de coagulación, ya que éste permite la desestabilización de las partículas para que posteriormente se aglomeren hasta alcanzar tamaños sedimentables o susceptibles de eliminarse por filtración.

Las sustancias que producen color (hidróxidos metálicos o compuestos orgánicos) también pueden ser separados por coagulación.

## 2.2 COLOIDES

El término coloide se usa para describir un sistema en el que las partículas de tamaño relativamente pequeño están dispersos en un medio homogéneo.

### 2.2.1 DEFINICION

Podemos definir a los coloides como materia de fina división o gran dispersión, que no se comporta como verdadera solución.



### 2.2.3 FORMA DE LOS COLOIDES

Los coloides presentan las siguientes formas:

#### 2.2.3.1 Isométricas

Tienen una dimensión igual en todas las direcciones (esferas y poliedros).

#### 2.2.3.2 Anisométricas

Estas se extienden preferentemente en una o dos dimensiones tales como cilindros, láminas, etc.

### 2.2.4 CLASIFICACION

Hay varios tipos de dispersiones coloidales, pero las más importantes en el tratamiento del agua son las que tiene una fase sólida dispersa en un líquido y particularmente cuando se tiene como fase dispersante al agua.

Teniendo presente estas limitaciones podemos clasificar a los coloides como:

#### 2.2.4.1 Coloides hidrofílicos

Están constituidos por moléculas grandes o de agregados de moléculas pequeñas. Abarcan varios polímeros sintéticos y naturales, proteínas ácidos nucleicos, almidones, etc., estos coloides muestran gran atracción por el solvente y reaccionan químicamente con el agua. Su estabilidad depende de

la capa de hidratación que los rodea, en la cual hay moléculas de agua adheridas que actúan como barrera que ejerce acción protectora dificultando de esta manera la coagulación y floculación.

#### 2.2.4.2 Coloides hidrofóbicos

Estas sustancias muestran una atracción mucho menor al agua, es decir, son insolubles en el dispersante (arcilla, óxidos metálicos), por lo tanto son más inestables. Son el tipo de dispersiones que más nos interesa en el tratamiento del agua para consumo humano.

### 2.2.5 PROPIEDADES

#### 2.2.5.1 Propiedades cinéticas

##### a) Movimiento Browniano

Es el movimiento constante e irregular que realizan las partículas coloidales dentro de la fase líquida, debido a los choques desordenados de las moléculas del medio bajo efecto de la agitación térmica. Este movimiento es despreciable en partículas grandes.

##### b) Difusión

Es la distribución uniforme de las partículas coloidales en todo el

solvente, debido al movimiento constante de las moléculas del líquido.

#### c) Presión osmótica

Cuando una dispersión está separada de la fase dispersante por una membrana, permeable a la fase dispersante, el sistema sólo entra en equilibrio cuando se establece una diferencia de presiones entre los dos medios denominándose a ésta, presión osmótica.

#### 2.2.5.2 Propiedades ópticas

Las partículas coloidales presentan un tamaño lo suficientemente grande como para dispersar los rayos luminosos. Esta propiedad puede ser empleada para tener información sobre el tamaño de las partículas así como para medir la turbiedad.

#### 2.2.5.3 Propiedades de superficie

Las partículas coloidales se caracterizan por tener una gran superficie específica, que da a los coloides una gran capacidad de adsorción.



#### 2.2.5.4 Propiedades electrocinéticas

Esta propiedad es consecuencia del potencial electrostático que las partículas coloidales adquieren por adsorción de cargas eléctricas. Ese potencial da a los coloides la capacidad de moverse hacia el polo positivo o negativo cuando son colocados a la acción de un campo eléctrico.

#### 2.2.6 ESTABILIDAD E INESTABILIDAD DE LOS COLOIDES

Es importante considerar los factores que determinan que las partículas permanezcan en suspensión, así como aquellos que producen la coagulación. Estas condiciones se describen en términos de estabilidad e inestabilidad de las suspensiones coloidales.

##### 2.2.6.1 Estabilidad

Es la propiedad inherente de las partículas coloidales a permanecer en dispersión en el transcurso del tiempo.

La estabilidad de los coloides hidrofóbicos se debe en gran parte a su carga. Como se sabe, estas partículas suspendidas en el agua tienen cargas eléctricas en sus respectivas superficies, en el caso de las partículas que se encuentran en las aguas naturales, esta carga primaria suele ser negativa. Así mismo, no es posible considerar a las partículas como porciones discretas de materia suspendida o

desplazándose en un líquido, sino más bien como cantidades constituidas por varios componentes, además de la partícula primaria. Así se tiene una doble capa existente entre el sólido y el agua, esta doble capa está formada por una capa adherida y otra difusa (ver figura N° 2-2).

La capa adherida, es producto de la carga negativa que tiene el coloide, es decir que en la superficie de ésta llegan tantos iones de signo contrario (contraiones), los cuales han estado sujetos a la influencia de la atracción electrostática dando como resultado la adherencia en la superficie del coloide.

La segunda capa o capa difusa, es formada por la agitación térmica del agua la cual ocasiona que los contraiones se separen de la superficie del coloide y queden suspendidos en la solución.

Una consecuencia de la doble capa que rodea cada partícula es la de crear regiones de potencial eléctrico en una solución que, teóricamente, tiene el potencial cero. Existen tres potenciales importantes que presenta un coloide (ver figura N° 2-2):

- a) Potencial total o potencial de Nernst ( $\psi_0$ ), el cual se presenta en la superficie del coloide.
- b) Potencial  $\psi_d$ , que se presenta en el interior de la superficie de la doble capa, donde comienza la capa difusa.

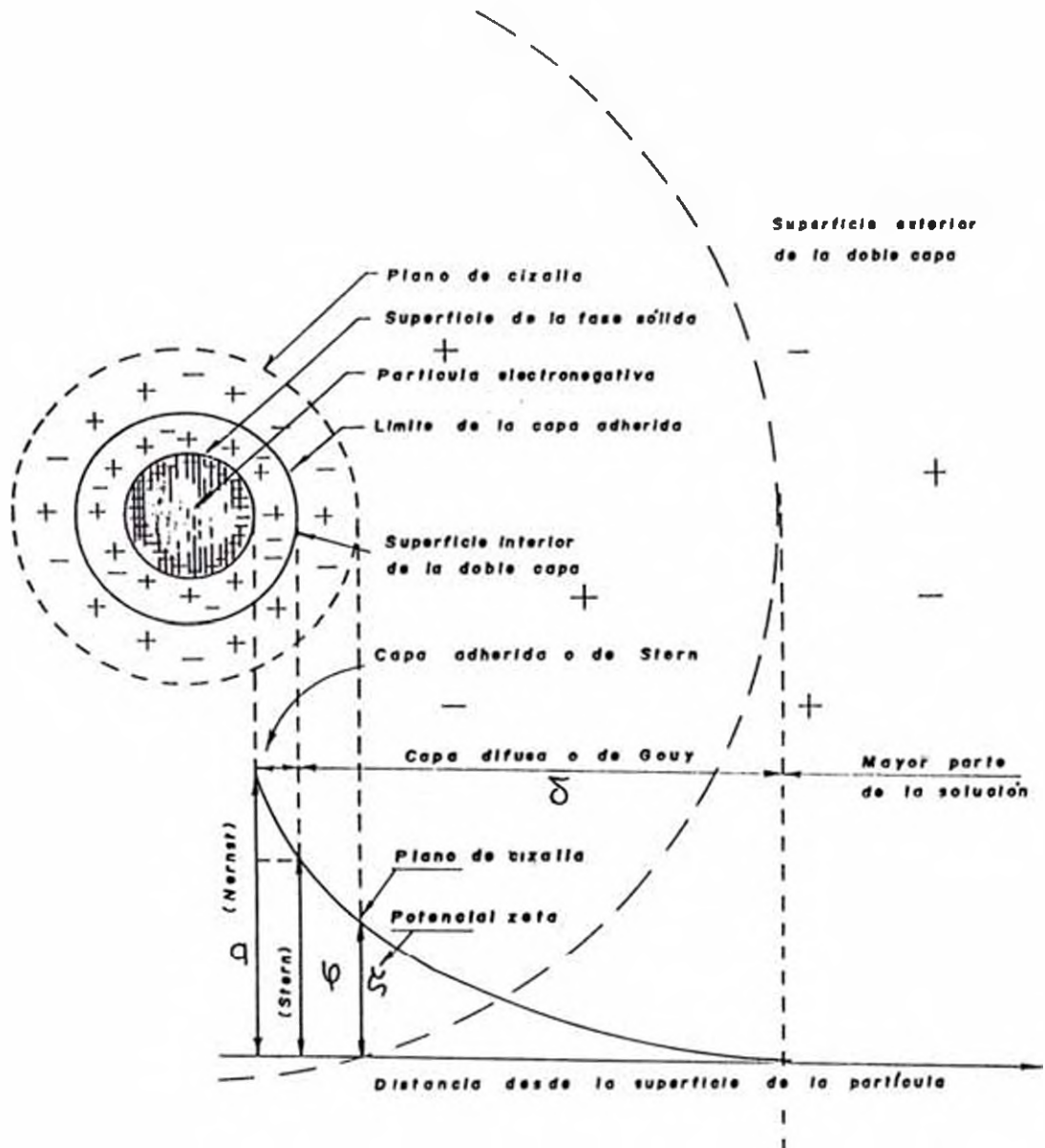


Figura N° 2-2  
EL COLOIDE Y SU DOBLE CAPA ELECTRICA

- c) Potencial Zeta ( $\tau$ ), es el potencial reinante en el límite de la capa de adsorción y la capa difusa (plano de cizalla), no es más que una fracción del potencial total. Además es el más importante en la coagulación.

El efecto neto de la doble capa alrededor de las partículas es el de impedir una estrecha aproximación de unas a otras y, en consecuencia estas dobles capas le comunican estabilidad a la suspensión.

#### 2.2.6.2 Inestabilidad

Expresa la tendencia de dichas partículas a coagularse, siempre que entren en contacto entre sí.

Uno de los factores que suele considerarse como decisivo en la inestabilidad de las partículas coloidales es el movimiento browniano (el cual fue detallado anteriormente). Otra fuerza de atracción entre las partículas y que, en definitiva provoca la inestabilidad es la de London-Van der Waals, ésta puede describirse como una fuerza atómica cohesiva que existe entre todos los átomos, ya que, en un conjunto de éstos, cada uno de ellos atrae a todos los demás. La magnitud de esta fuerza decrece rápidamente con la distancia.

### 2.3 MECANISMOS DE DESESTABILIZACION DE LOS COLOIDES

Existen dos teorías generales que explican los mecanismos

involucrados en la desestabilización, ambas teorías no se excluyen mutuamente, sino más bien es preciso invocar ambas para explicar el proceso de coagulación.

### 2.3.1 TEORIA FISICA

#### 2.3.1.1 Compresión de la doble capa

Este mecanismo fue el primero en explicar los fenómenos de desestabilización, el cual formula que la desestabilización de un coloide por una sal neutra es efectuada por iones con carga opuesta a la del coloide, y que la eficiencia de estos iones aumenta marcadamente con sus cargas.

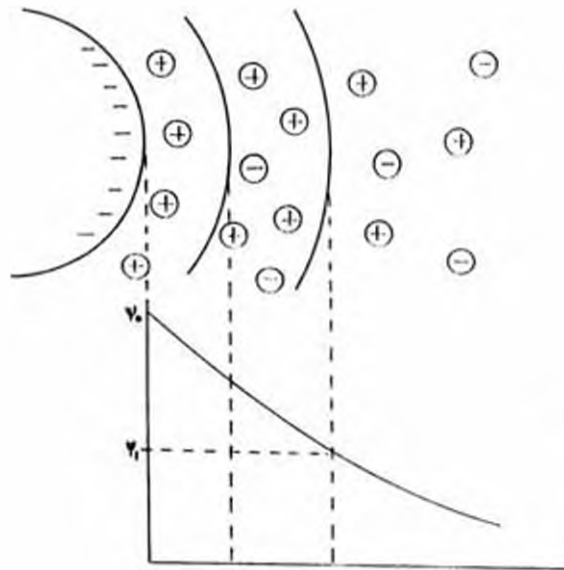
Cuando se aumenta en la solución iones de carga opuesta, la curva de repulsión eléctrica disminuye mientras que la de Van Der Waals, se mantiene siempre fija. Al disminuir el potencial repulsivo disminuye el espesor de la capa difusa, así como también la curva resultante de interacción, por lo tanto las partículas pueden acercarse suficientemente para ser desestabilizadas por la energía atractiva de Van der Waals (ver figura N° 2-3).

#### 2.3.1.2 Neutralización de la carga

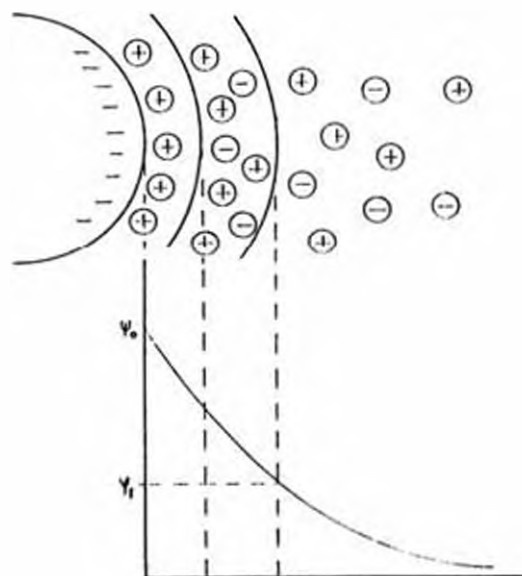
Este efecto se encuentra estrechamente ligado al de la compresión de la doble capa.

La introducción de partículas de carga opuesta a las que contiene el agua produce automáticamente

una disminución en la carga neta de los coloides y la consiguiente coagulación de los mismos.



(a) Baja concentración de iones



(b) Alta concentración de iones

Figura N° 2-3  
VARIACION DEL ESPESOR DE LA CAPA DIFUSA EN RELACION A LA CONCENTRACION DE IONES

### 2.3.1 TEORIA QUIMICA

Debido a que la desestabilización de los coloides producida por los compuestos poliméricos con carga negativa no puede ser explicada por el modelo físico, surge entonces ésta teoría, basada en los puentes químicos, la cual fue presentada por La Mer, quien sostiene que la molécula del polímero se adhiere a la superficie del coloide en uno o más sitios de adsorción, dejando libre, extendida en el agua el resto de la cadena, la cual puede pegarse de nuevo a otros coloides en sitios de adsorción vacantes. Se forma así un puente químico entre las partículas, que permite el incremento del tamaño de éstas y promueve su precipitación.

## 2.4 FACTORES QUE INFLUYEN SOBRE LA COAGULACION

### 2.4.1 EFECTO DEL pH

El pH es la variable independiente más importante. Existe una escala de pH para una agua dada, la amplitud de esta escala está influenciada por el tipo de coagulante empleado, así como también por la composición química del agua y concentración del coagulante.

### 2.4.2 EFECTO DE LAS SALES

Como se ha dicho anteriormente las aguas naturales nunca son puras, sino que constituyen soluciones diluidas de sales inorgánicas de concentraciones y composiciones diversas. El efecto de estas sales es función del ion específico y de su concentración, las consecuencias principales de la presencia de algunos iones son la modificación de los siguientes factores:

- 1) El margen de pH de coagulación óptima.
- 2) El tiempo necesario para la floculación.
- 3) La dosis óptima del coagulante y.
- 4) El coagulante residual en el efluente.

#### 2.4.3 EFECTO DE LA NATURALEZA DE LA TURBIEDAD

La coagulación también depende de la naturaleza de la turbiedad. Para cualquier concentración de turbiedad arcillosa es preciso añadir una cierta cantidad mínima de coagulante, a medida que aumenta la turbiedad es necesario adicionar algo más de coagulante, pero la dosis de ésta no aumentará linealmente con el aumento de la turbiedad. Paradójicamente, en el caso de turbiedades muy elevadas se requieren dosis de coagulante relativamente más pequeñas, debido a las mayores probabilidades de colisión; por esta misma razón, las turbiedades muy bajas suelen ser más difíciles de eliminar por coagulación.

Así mismo, las aguas que contienen coloides orgánicos derivados de la polución provocadas por las aguas urbanas e industriales residuales suelen ser más difíciles de coagular, y debido a las muchas reacciones químicas que tiene lugar entre el coagulante y la materia orgánica coloidal, las dosis de coagulante deben ser mucho mayores.

#### 2.4.4 EFECTO DEL COAGULANTE

El tipo de coagulante es también uno de los factores que influye en el proceso de coagulación, así las sales de hierro son más ventajosas que el alumbre cuando se tiene agua coloreada, ya que las sales de hierro con respecto al aluminio tienen un margen de pH más amplio.



La selección del coagulante a utilizar debe basarse en la eficiencia de éste en comparación con otros, sin olvidar la eficiencia de los factores económicos.

#### 2.4.5 EFECTO DE LA TEMPERATURA

Este efecto se presenta en zonas de climas muy marcados donde se alcanzan temperaturas de congelación. Ha medida que la temperatura del agua se acerca a los 0 °C, la remoción de la turbiedad se dificulta.

Lo que si se sabe es que al disminuir la temperatura, aumenta la viscosidad del agua y, en consecuencia, la velocidad de sedimentación del flóculo disminuye. Así mismo se tiene conocimiento de que la disminución de la temperatura reduce la velocidad de las reacciones químicas, en lo que respecta a la coagulación, pero este defecto es demasiado pequeño para ser significativo. También se ha observado que el valor óptimo del pH disminuye en función del descenso de la temperatura.

### 2.5 TIPOS DE COAGULACION

#### 2.5.1 COAGULACION POR ADSORCION

Este tipo de coagulación se presenta cuando existe en el agua una alta concentración de partículas en estado coloidal. Debido a la abundancia de los coloides, la distancia entre ellos es pequeña siendo por lo tanto mayor la fuerza de atracción y la energía requerida para su desestabilización, así como el potencial zeta resultante.

### 2.5.2 COAGULACION POR BARRIDO

Este tipo de coagulación se presenta cuando el agua es clara. Debido a la poca cantidad de partículas coloidales, la distancia entre ellas es grande, por lo que se requiere una mayor cantidad de coagulante y energía para desestabilizarlos, aumentando el potencial zeta. Además cabe indicar que el tiempo de reacción requerido en este tipo de coagulación es mayor que el que se requiere en la coagulación por adsorción.

Capítulo 3

**FLOCULACION**

### 3.1 DEFINICION

Es el fenómeno por el cual las partículas ya desestabilizadas en la masa de agua chocan unas con otras, debido a un movimiento lento, el cual promueve de esta manera el crecimiento de los flóculos, hasta que éstos alcancen el tamaño y peso necesario para su posterior remoción mediante la sedimentación.

### 3.2 MECANICA DE LA FLOCULACION

Son dos los mecanismos de la floculación (pericinetica y ortocinetica) los cuales a su vez son complementarios, es decir, que para obtener una buena eficiencia en el tratamiento es necesario que no esté ausente alguno de ellos.

#### 3.2.1 FLOCULACION PERICINETICA

Es el resultado de las colisiones que se producen en la masa de agua, debido al movimiento browniano, la cual es inducida por la energía térmica del líquido. Este tipo de floculación es aplicable sólo en partículas coloidales que tiene un tamaño menor a  $1\mu$ .

#### 3.2.2 FLOCULACION ORTOCINETICA

Es producida por el choque de las partículas mayores a  $1\mu$ , debidas a una fuerza exterior la cual puede ser producida por sistemas mecánicos o hidráulicos.

### 3.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FLOCULACION

Los factores que intervienen en la floculación son:

#### 3.3.1 NATURALEZA DEL AGUA

Algunos iones presentes en el agua pueden influir en el equilibrio físico-químico de la floculación, afectando el tiempo de éste.

La concentración y la naturaleza de las partículas que producen la turbiedad también tienen una notable influencia en este proceso. La velocidad de formación de los flóculos es proporcional tanto a la concentración de las partículas como al tamaño inicial de éstas. Es más fácil flocular aguas con elevada turbiedad y que presentan una amplia distribución de tamaño de partículas.

#### 3.3.2 TIEMPO DE FLOCULACION

La velocidad de aglomeración de las partículas es también proporcional al tiempo de formación del floc, por lo que este proceso debe realizarse en un tiempo suficiente, como para que la formación del floc sea adecuada. Tiempos mayores o menores al óptimo, reducen la eficiencia del proceso.

#### 3.3.3 GRADIENTE DE VELOCIDAD

Es de importancia el de tener presente, la gradiente que se va aplicar a una masa de agua. Gradientes altos, rompen los flocs debido a la fuerza de cizallamiento que se produce por la agitación de agua sobre las partículas floculadas, y mientras que

gradientes muy lentos, demoran su formación.

#### 3.3.4 PARAMETROS OPERACIONALES

El gradiente de velocidad (G) y el tiempo de retención (T), son los parámetros operacionales principales en el proceso de floculación. El producto de ambos viene a ser lo que denominamos, número de Camp (Nc). Este valor deberá ser seleccionado cuidadosamente para no causar la disolución o desintegración de los flóculos después de que éstos se han formado.

A través de investigaciones realizadas se ha determinado que el rango óptimo de gradientes de velocidad para la floculación varía entre 20 y 75  $s^{-1}$ , y el tiempo de retención entre 10 y 30 minutos, dependiendo fundamentalmente de la calidad del agua. Así mismo, los valores de GT están normalmente comprendidos entre 20,000 y 200,000 (mayormente entre 50,000 y 100,000).

Capítulo 4

LA MAGNETITA

#### 4.1 COMPOSICION Y CARACTERISTICAS

La magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), llamada también fierro oxidulado, es uno de los minerales de fierro más importantes, siendo su contenido de este de 72.4% y de oxígeno 27.6%, presentando además, las siguientes características:

Peso específico : 4.0 - 5.2 gr/cm<sup>3</sup>.

Dureza : 5.5 - 6.5

Cristaliza en el: sistema cúbico

Color : negro de fierro

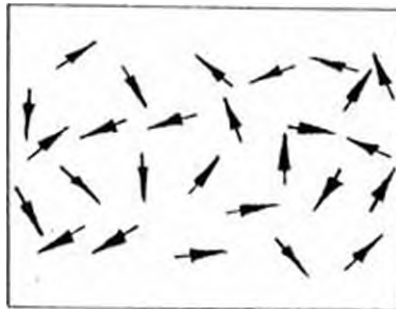
Brillo : metálico

#### 4.2 PROPIEDADES MAGNETICAS

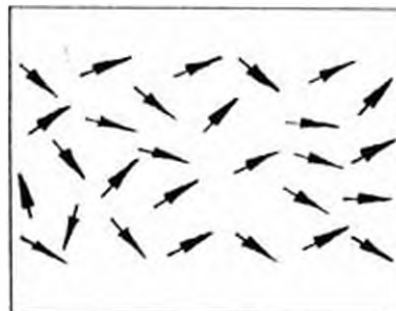
La magnetita es un material ferromagnético por lo que presenta características muy especiales, tales como la de quedarse polarizada una vez que ha estado dentro de un campo magnético y permanecer así aún cuando el campo magnético desaparezca.

Este mineral, al igual que otros materiales ferromagnéticos tiene pequeñas regiones orientadas en cierta dirección, a las cuales se les conoce por "dominios". Estos dominios son de tamaño microscópico, pero lo suficientemente grandes como para contener de  $10^{12}$  a  $10^{15}$  átomos. Cuando la partícula de fierro no ha sido expuesta a la acción de un campo magnético los momentos de dipolos de cada dominio, están orientados al azar, la aplicación de un campo hace que éstos cambien su orientación, resultando un alineamiento parcial en la dirección del campo, o un alineamiento total, bajo la influencia de un campo lo suficientemente alto que corresponda a la saturación magnética. De esta manera cada partícula de fierro queda imantada en menor o mayor grado.

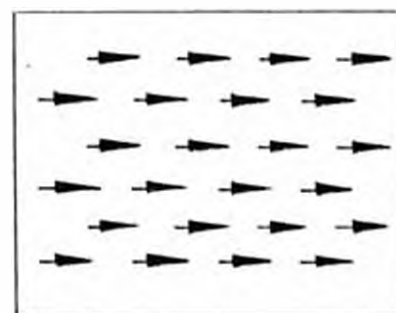




(a) Magnetización cero: Los momentos de dipolos están orientados al azar.



(b) Magnetización parcial: Los momentos dipolares tienden a aproximarse al paralelismo con el campo exterior.



(c) Magnetización de saturación: Cuando el campo magnético es muy grande o la temperatura es muy baja, los momentos dipolares magnéticos se alinean paralelamente al campo. La magnetización no puede aumentarse más.

Figura N°4-1  
ORIENTACION DE LOS MOMENTOS DIPOLARES MAGNETICOS EN UN DOMINIO

según la intensidad magnética aplicada, manteniéndose esta propiedad aún desapareciendo el campo. En la figura N° 4-1 se muestran las tres condiciones como (a), (b) y (c) respectivamente y en ellas los extremos de las flechas representan los polos norte de los imanes moleculares.

#### 4.3 LA MAGNETITA COMO COAGULANTE

Estudios realizados en Australia a mediados de la década del 70 demostraron que este mineral puede ser utilizado como coagulante en el tratamiento del agua.

Bajo condiciones ácidas la superficie de la magnetita se carga positivamente y cualquier coloide cargado negativamente en la solución puede ser atrapado por su superficie. Cuando los niveles de pH están por encima de 7, la superficie se transforma rápidamente en carga negativa, dando lugar entonces a repeler los coloides. Consecuentemente la magnetita actúa como un coagulante absorbente a pH bajos y es capaz de regenerarse a pH altos.

#### 4.4 RESERVA NACIONAL.

Dentro del país hay una serie de depósitos minerales que contienen magnetita, entre los cuales cabe mencionar: Yaurilla, Acarí y Marcona (ver figura N°4-2). De los yacimientos indicados, sólo uno de ellos, Marcona, es de gran magnitud, el resto son bastante pequeños y solamente dedicados a suplir necesidades locales.

A sólo 14 km. al sureste de la ciudad de Ica y a 80 km. del puerto de Pisco se encuentra el depósito de Yaurilla, que consiste de cuatro cuerpos lenticulares de 20 m de ancho por 300 m de largo,

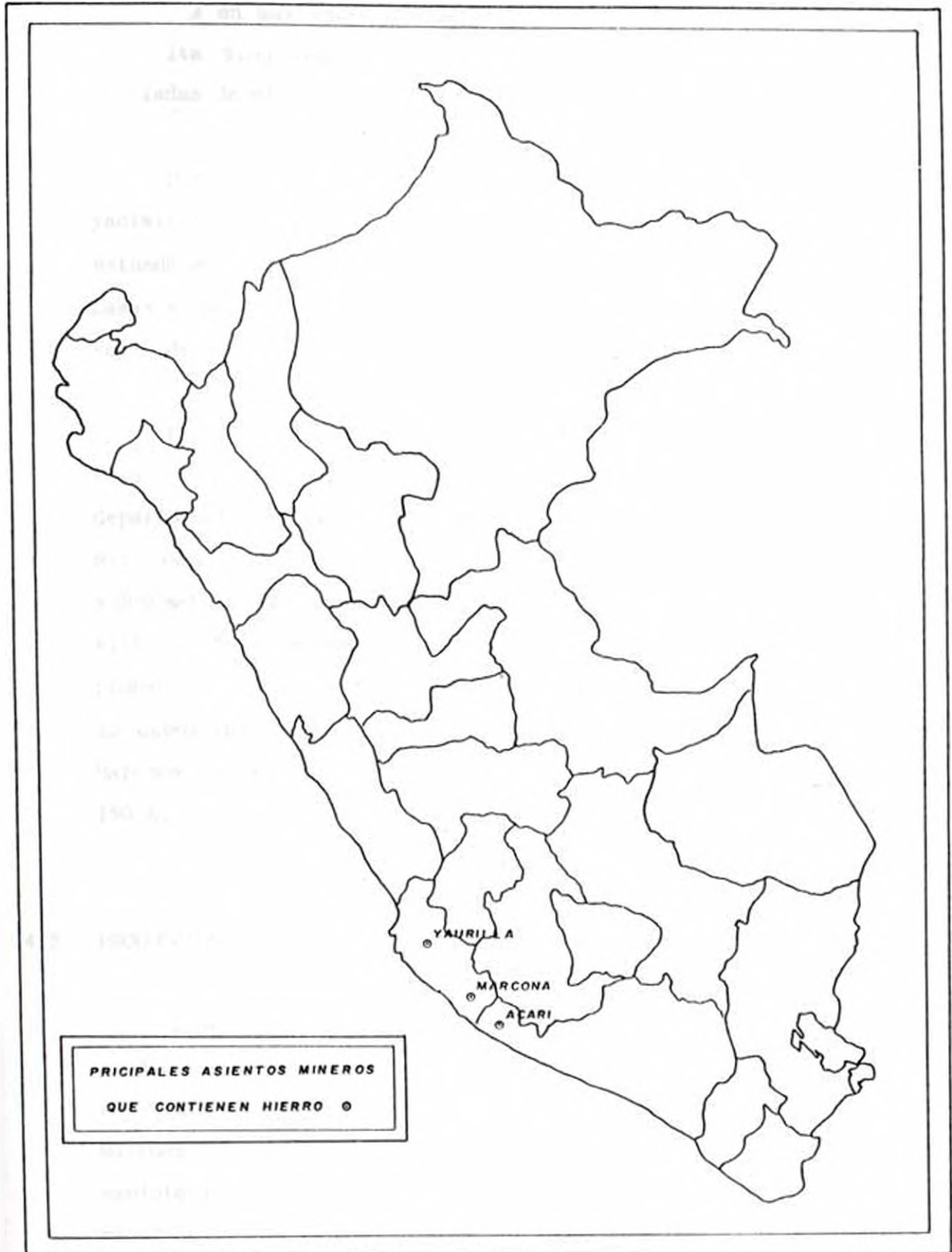


Figura N° 4-2  
UBICACION DE LOS YACIMIENTOS MINEROS QUE CONTIENEN MAGNETITA

embebidos en una formación de andesita. La mena no sólo consiste de magnetita sino también de hematita con reservas de un millón de toneladas de mineral cierto.

Por su cercanía a Marcona y su alta calidad de fierro, el yacimiento de Acarí es uno de los que está causando vivo interés. Está situado en la provincia de Caravelí en Arequipa a 40 km. del puerto de Lamas y cerca de la población de Acarí. Este yacimiento consiste de vetas de magnetita de más de 20 m. de potencia.

El yacimiento de Marcona es, probablemente, el más grande en el Perú y el único en actual explotación, está ubicado al sur del departamento de Ica, a inmediaciones de las bahías de San Juan y San Nicolás a 10 km. de la línea de costa y 60 km. de la ciudad de Nazca y a 800 metros sobre el nivel del mar. Los cálculos efectuados estiman 40 millones de toneladas de mineral cierto, 170 millones de mineral probable y 460 millones de posible. Este yacimiento consiste de más de 20 depósitos de magnetita y hematita, distribuidos en la pampa de Marcona con tamaños superficiales hasta de 400,000 m<sup>2</sup>, y profundidad de 150 m.

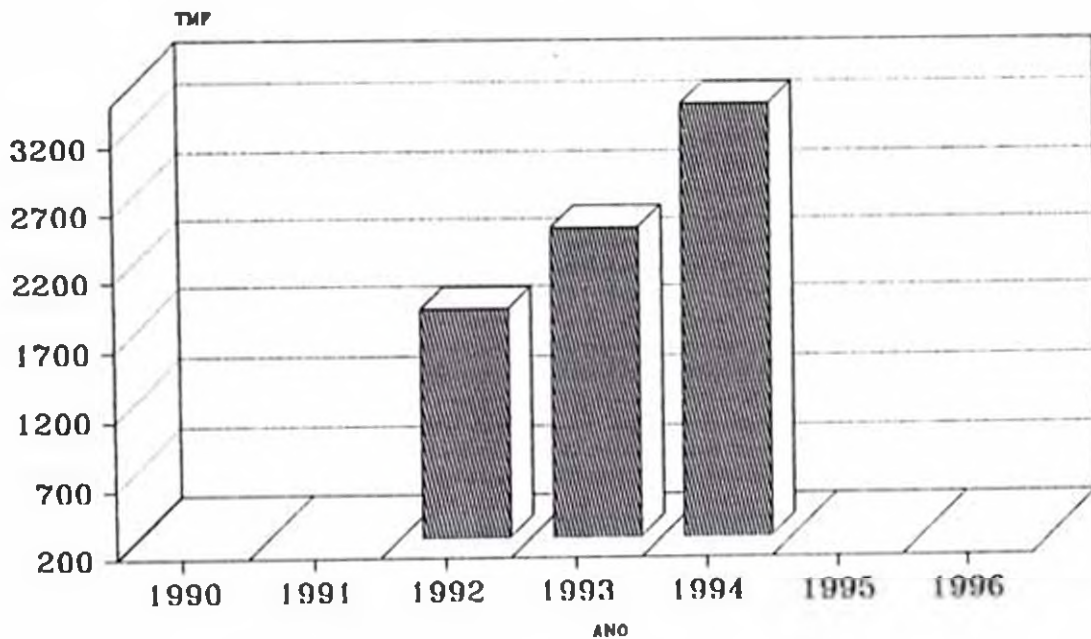
#### 4.5 PRODUCCION

Lamentablemente, no existe información estadística de la producción de magnetita en nuestro país, sin embargo, una idea de ello nos puede dar la producción nacional de hierro. Cabe recalcar que Marcona es el único yacimiento de mineral de hierro en actual explotación siendo los depósitos de magnetita los que constituyen el mayor activo de este asiento minero.

La producción de hierro en los últimos años fue siguiendo un

camino decreciente, tal como se muestra en la figura N°4-3, sin embargo la privatización de la empresa nacional Hierro Peru por inversionistas chinos ha permitido detener dicho descenso, incrementándose la producción en un 181% de 1992 a 1993. Este recurso mineral, resulta ser de suma importancia para el desarrollo económico del país por lo que se espera para los próximos años, un incremento paulatino, lo cual ya parece ser un hecho, como se observa en la figura N°4-3, la producción de 1994 resulta ser mayor, que la de 1993.

Figura N 4-3  
PRODUCCION DE HIERRO ANUAL  
(Miles de unidades)



TMF: Tonelada métrica fina  
Fuente: Ministerio de Energía y Minas

Capítulo 5

**EL CAMPO MAGNETICO**

## 5.1 MAGNETISMO

Es la propiedad que poseen algunos cuerpos de atraer al hierro y otros materiales, de acuerdo a ciertas leyes físicas.

### 5.1.1 EL IMAN Y SU CLASIFICACION

Imán es un cuerpo dotado con la capacidad de atraer al hierro y otros materiales ferromagnéticos, así como de orientarse de Norte a Sur al dejarlo en libre oscilación horizontal.

#### 5.1.1.1 Clases de imanes

Los imanes se dividen en dos clases generales:

##### a) **Imanes Naturales**

Los primeros fenómenos magnéticos observados estuvieron relacionados, sin duda, con los llamados imanes naturales, que son trozos de un mineral de hierro encontrado junto a la antigua ciudad de Magnesia (de donde viene el término magnético). Estos imanes naturales tienen la propiedad de atraer el hierro no imantado, siendo el efecto más pronunciado en ciertas regiones del imán llamadas polos.

##### b) **Imanes Artificiales**

Son aquellos imanes que se hacen frotando el hierro y el acero con un imán

natural. También se puede obtener imanes artificiales por medio de la corriente eléctrica. Estos imanes se diferencian de los naturales porque necesitan de ellos o de la corriente eléctrica, para actuar como imanes naturales y una vez que cesa la causa que lo produce vuelven a su estado normal.

Los imanes permanentes son de acero templado, así como de aleaciones de cobalto y aluminio. Los electroimanes se fabrican de hierro o acero dulce que son materiales que responden con gran sensibilidad a los cambios de los efectos magnetizantes de las corrientes eléctricas.

### 5.1.2 CAMPO MAGNETICO

Es la propiedad o característica fundamental del magnetismo. Se denomina así a la región del espacio donde un imán experimenta una atracción o repulsión, teóricamente tiene un alcance infinito, sin embargo sus efectos se perciben con claridad solo en las inmediaciones cercanas al imán.

El campo magnético está representado por líneas de fuerza cuya dirección es del polo Norte al polo Sur. El número de líneas de fuerza por unidad de área de sección transversal en una región del espacio, está en relación directa a la magnitud del campo magnético. Por consiguiente donde la líneas están muy cercanas entre sí, el campo es más intenso que donde están separadas, ver figura N° 5-1.



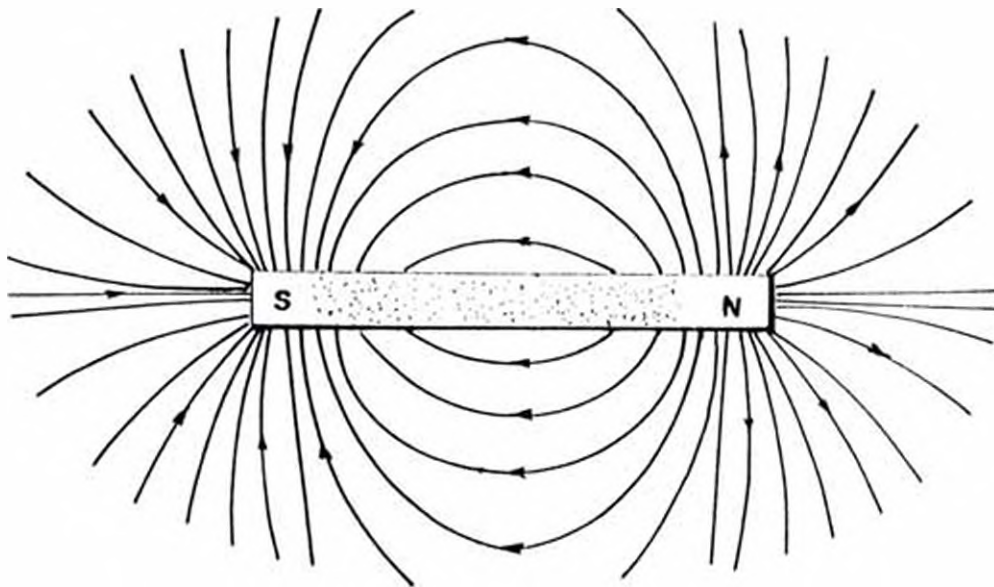


Figura N° 5-1  
LINHAS DE FUERZAS DEL CAMPO MAGNÉTICO

## 5.2 ELECTROMAGNETISMO

Son los efectos magnéticos producidos por el transporte de la corriente eléctrica tanto de un conductor eléctrico como de un trozo de hierro al que se le ha dado varias vueltas de alambre.

### 5.2.1 CAMPO ELECTROMAGNÉTICO

Es un campo magnético producido por el paso de la corriente en un conductor. Siempre que hay flujo de corriente, existe un campo magnético en torno al conductor y la dirección de este campo depende del sentido de la corriente eléctrica.

### 5.5.2 ELECTROIMANES

Como se dijo anteriormente, una de las formas de obtener un imán artificial es por medio de la corriente eléctrica. Los imanes obtenidos así se denominan ELECTROIMANES, los cuales pierden su magnetismo casi instantáneamente cuando deja de circular la corriente eléctrica.

Una espira de alambre que transporta una corriente es un imán débil con su polo norte y su polo sur (ver figura N° 5-2). Cuando hay varias espiras enrolladas una a continuación de la otra, se tiene lo que se denomina un solenoide, el cual actúa como una barra imantada poderosa, cuyo polo norte es el extremo desde el cual salen las líneas de fuerza (ver figura N° 5-3).

Una de las formas de aumentar las líneas de fuerza y por consiguiente el campo magnético es agregar más espiras al solenoide obteniendo así un imán más fuerte. El aumento de la corriente también refuerza el campo magnético, de manera que los electroimanes potentes tienen solenoides de muchas espiras que transportan toda la corriente que permite el calibre del alambre.

Si bien la potencia del campo de un electroimán aumenta empleando un gran flujo de corriente y muchas espiras para formar el solenoide, estos factores no concentran el campo lo suficiente. Para aumentar todavía más la densidad de flujo se inserta en el solenoide un núcleo de hierro. La densidad de flujo aumenta considerablemente porque el núcleo de hierro ofrece mucho menos oposición a las líneas de fuerza que el aire.

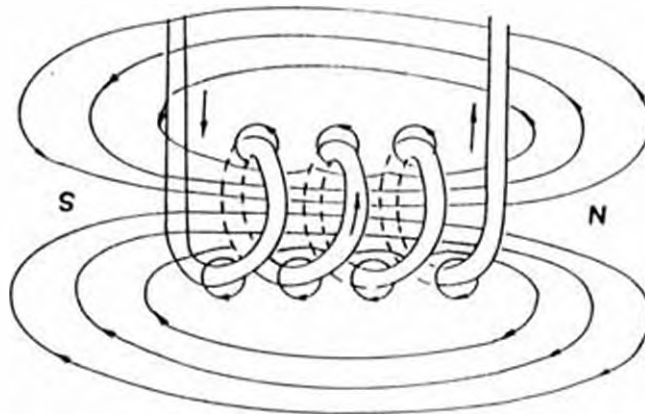


Figura N° 5-2  
SERPIA DE UN ALAMBRE

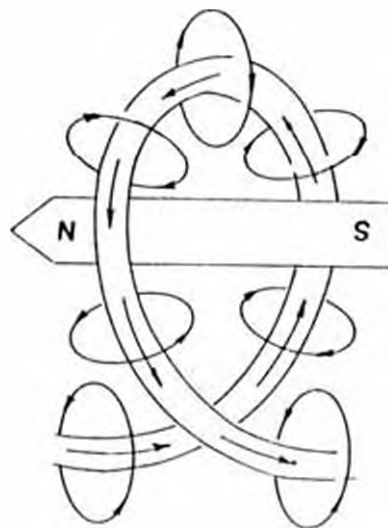


Figura N° 5-3  
LINEAS DE FUERZA

#### 5.4 ACCION DE UN CAMPO MAGNÉTICO SOBRE UNA CARGA MOVIL.

Cuando se acerca un imán a una carga en movimiento de tal forma que el campo magnético y la trayectoria de la carga son paralelos, la carga no sufre ninguna desviación mientras que la máxima desviación la presenta cuando el campo magnético es perpendicular a la dirección del movimiento de la carga. (Ver figura N° 5-4)

Cuando se aumenta la velocidad de la carga la desviación que sufre ésta es mayor. Por consiguiente la fuerza con que es desviada una carga depende de la intensidad del campo magnético  $B$ , la velocidad de la carga y del seno del ángulo entre el vector campo magnético y el vector velocidad. Así mismo dicha fuerza es proporcional a la magnitud de la carga.

El valor de la fuerza sobre una carga  $q$  cuando la velocidad  $v$  es perpendicular al campo magnético  $B$  está dada por la siguiente ecuación:

$$F = qvB$$

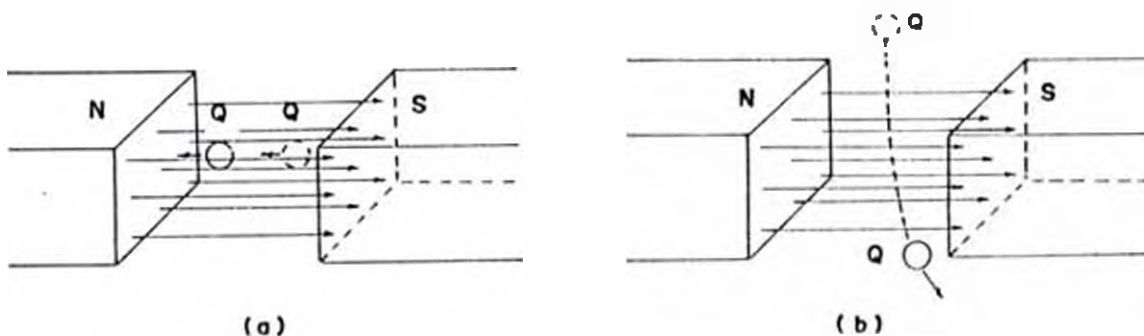


Figura N°5-4  
FUERZA SOBRE UNA PARTICULA CARGADA EN MOVIMIENTO. (a) SI LA CARGA MOVIL SE MUEVE EN LA DIRECCION DEL CAMPO MAGNETICO NO EXPERIMENTA FUERZA ALGUNA. (b) SI LA CARGA EN MOVIMIENTO ENTRA CON UNA DIRECCION NO PARALELA A LA DEL CAMPO, EXPERIMENTARA LA ACCION DE UNA FUERZA Y SU TRAYECTORIA CAMBIARA.

Capítulo 6

**ENSAYOS DE LABORATORIO**

## 6.1 LA PRUEBA DE JARRAS

Estudios realizados han demostrado que la aplicabilidad de esta nueva técnica puede probarse simplemente haciendo pruebas de jarras en lugar de gastar dinero y tiempo en la ejecución de una planta piloto.

Así, la ejecución del presente proyecto se hizo a través de simples pruebas de jarras por la razón mencionada anteriormente, y además ésta es la principal prueba de laboratorio que trata de reproducir las condiciones del proceso de coagulación-floculación-sedimentación que se producen en una planta de tratamiento. Sin embargo, esto no resulta totalmente cierto por tratarse de volúmenes pequeños (2000 ml) con flujo discontinuo y de fácil control en cuanto a dosificación y condiciones de agitación. No obstante estas diferencias, la prueba de jarras sigue siendo el mejor método que hasta ahora disponemos para la determinación de las diferentes variables.

Los equipos que se necesitan para ejecutar la prueba de jarras se describen a continuación.

### 6.1.1 EQUIPO DE PRUEBA DE JARRAS

Fue desarrollado entre 1918 y 1921 por Langellier y Baylis, separadamente y consta de:

- Un agitador múltiple de velocidad variable (de 0 a 300 rpm) que puede provocar turbulencia simultánea en los 06 vasos.
- Un sistema de iluminación localizado en la base del agitador.
- Vasos de precipitados o jarras (06), preferentemente éstos

deben tener una capacidad de 2000 ml. cada uno, aunque también pueden utilizarse de 1000 ml. Hacer el ensayo con un mayor volumen de agua facilita la toma de muestras para la turbiedad residual y produce mejores resultados.

- Deflectores, los cuales consisten en un armazón de alambre galvanizado que sostiene unas pantallas de fierro galvanizado o latón, que tienen la finalidad de aumentar la agitación del agua dentro del vaso.



Figura N° 6-1  
EL EQUIPO DE PRUEBA DE JARRAS

### 6.1.2 DOSIFICADORES

Para adicionar tanto el coagulante como la magnetita fue necesario disponer de un sistema que garantice se viertan estos en forma rápida y simultánea a los 06 vasos. Muchas veces se suele olvidar este detalle que es la causa de resultados erróneos.

Para la realización de las diferentes pruebas, fue necesario considerar dos tipos de dosificadores:

#### Dosificador de soluciones

La técnica usada frecuentemente en los laboratorios y plantas de tratamiento de nuestro medio, consiste en colocar en seis vasos pequeños, por medio de una pipeta o bureta, las dosis del coagulante que se van 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 han horadado seis 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 la dosis del coagulante en un punto fijo localizado en, o cerca del eje impulsor, durante una mezcla rápida a alta velocidad.

#### Dosificadores en seco

Estos tipos de dosificadores raras veces se requieren en los trabajos de laboratorio por lo que fue necesario su diseño y construcción para el presente estudio.

Dicho instrumento consiste en 06 depósitos de forma piramidal-triangular, los cuales están unidos por un listón de madera, permitiéndose de ésta manera un deslizamiento simultáneo y rápido del material, a cada uno de los 6 vasos.

#### 6.1.3 SIFONES

La toma de muestra para determinar la turbiedad residual debe hacerse con un sifón para asegurar que la toma se haga de la misma forma en todos los vasos, teniendo la misma velocidad de entrada, para así disminuir la posibilidad de arrastre de partículas.

El sifón está compuesto de un tubo de vidrio de 4 mm. de diámetro y de una manguera de jebe también de 4 mm de diámetro. El tubo de vidrio debe ser torcido en dirección horizontal en el punto de muestreo para que ésta sea representativa en una profundidad determinada. Así mismo, debe ser sostenido por un flotador de tecnoport el cual va a ayudar a mantener constante la altura de la toma de muestra y el nivel del agua.

En general, se recomienda aplicar la dosis del coagulante en un punto fijo localizado en, o cerca del eje impulsor, durante una mezcla rápida a alta velocidad.

#### Dosificadores en seco

Estos tipos de dosificadores raras veces se requieren en los trabajos de laboratorio por lo que fue necesario su diseño y construcción para el presente estudio.

Dicho instrumento consiste en 06 depósitos de forma piramidal-triangular, los cuales están unidos por un listón de madera, permitiéndose de ésta manera un deslizamiento simultáneo y rápido del material, a cada uno de los 6 vasos.

#### 6.1.3 SIFONES

La toma de muestra para determinar la turbiedad residual debe hacerse con un sifón para asegurar que la toma se haga de la misma forma en todos los vasos, teniendo la misma velocidad de entrada, para así disminuir la posibilidad de arrastre de partículas.

El sifón está compuesto de un tubo de vidrio de 4 mm. de diámetro y de una manguera de jebes también de 4 mm de diámetro. El tubo de vidrio debe ser torcido en dirección horizontal en el punto de muestreo para que ésta sea representativa en una profundidad determinada. Así mismo, debe ser sostenido por un flotador de tecnopor el cual va a ayudar a mantener constante la altura de la toma de muestra y el nivel del agua.

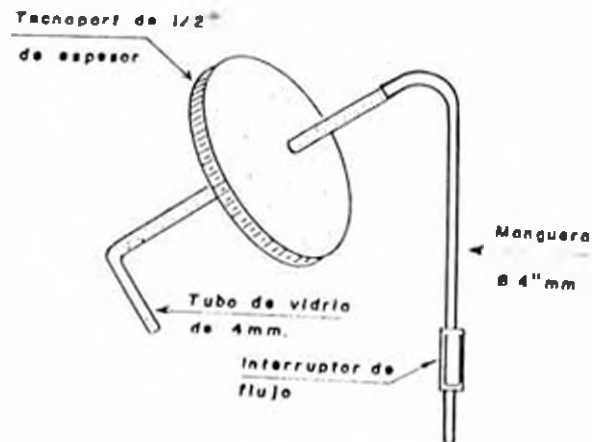


Figura N° 6-2  
SIFON O TOMADOR DE MUESTRAS

#### 6.1.4 TURBIDIMETRO

La medición de la turbiedad del agua después de floculada y sedimentada durante un cierto tiempo (turbiedad residual) suele considerarse como el parámetro más importante para caracterizar el proceso. Para la determinación de ella, se utilizó el turbidímetro de diseminación de luz, Hach 2100 A, por ser mucho más preciso que los turbidímetros de transmisión Hellige y no depender del criterio del observador.

#### 6.1.5 COMPARADOR DE COLOR

La determinación del color se realizó con un espectrofotómetro Bausch & Lomb, por ser más preciso y no depender de la apreciación visual del analista.

### 6.1.6 MEDIDOR DE pH

La medición del pH antes y después de la floculación tiene una importancia básica. Por lo que siempre, para la medición del pH, se utilizó un electrodo de vidrio con lectura digital.

### 6.1.7 EQUIPO AUXILIAR

Además de todos los equipos mencionados es necesario un cronómetro para controlar el tiempo que demoran las diferentes operaciones que comprenden la prueba de coagulación.

## 6.2 OBSERVACIONES

Las observaciones que se describen a continuación son bastante subjetivas y depende grandemente del criterio del observador.

### 6.2.1 TAMAÑO DEL FLOC PRODUCIDO

Durante el proceso de mezcla lenta se debe de observar el tamaño del floc producido y evaluarlo cualitativamente según sus características. La comparación de los tamaños del floc no es fácil, algunos prefieren estimarlo en milímetros en forma muy aproximada, de acuerdo con el comparador desarrollado por el Water Research Institute de Inglaterra (figura 6-3); otros prefieren usar el Índice de Willcomb tal como se muestra en la tabla 6-1. Se escoge como dosis óptima la de la jarra que produce una partícula más grande, de mayor velocidad de asentamiento aparente y que deje ver el agua más cristalina entre los flóculos, aunque no siempre el flóculo de mayor tamaños sedimenta mejor.

Cuadro N° 6-1  
INDICE DE FLOCULACION DE WILCOX

Número del índice	Descripción
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 completamente.
10	Excelente. Floc que se deposita todo dejando el agua cristalina.

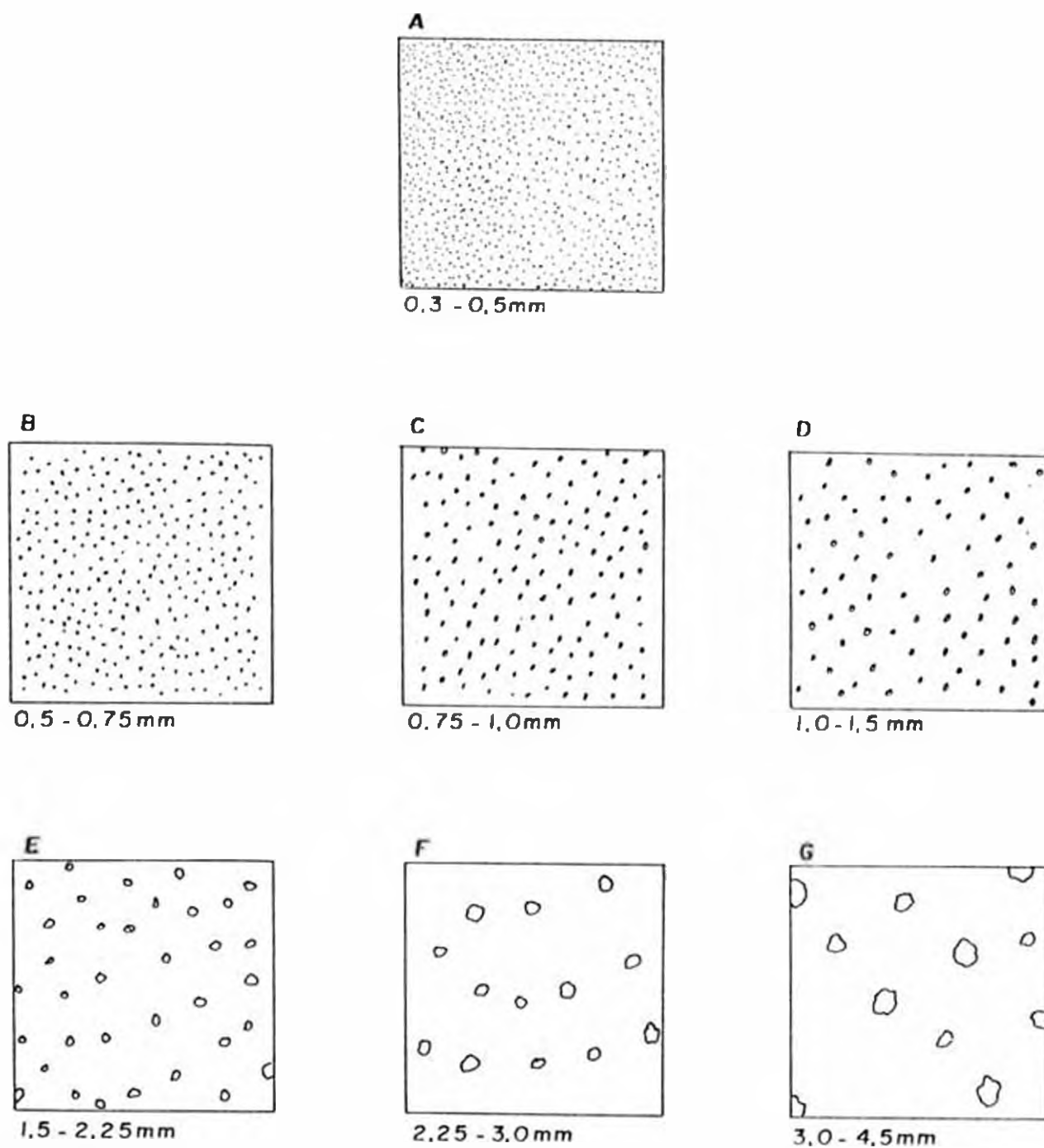


Figura N° 6-3  
COMPARADOR PARA ESTIMAR EL TAMAÑO DEL FLOC PRODUCIDO EN LA COAGULACIÓN (SEGÚN EL WRA)

### 6.2.2 TIEMPO INICIAL DE FORMACION DEL FLOC

Determinar, en segundos, el tiempo que tarda en aparecer el primer indicio de formación del floc, es uno de los sistemas 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 floc cuando recién se forma suele ser incoloro. Por otra parte el floc 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 06 jarras al mismo tiempo, el coagulante tiene que agregarse con intervalos de 10 a 30 seg. en cada vaso y debe marcarse en los mismos el tiempo de aplicación en la forma siguiente:  $t = 0$  (para el vaso N° 1)  $t = 10$  seg. (para el vaso N° 2),  $t = 20$  seg (para el vaso N° 3), etc. El tiempo de aparición del primer floc será igual al tiempo inicial de aplicación del coagulante a la primera jarra, hasta que se note el primer indicio del floc, menos el tiempo que tardó en hacerse la aplicación a la jarra considerada.

### 6.3 RECOMENDACIONES

- Debe evitarse el uso de detergentes, ya que muchos contienen compuestos aniónicos que son fuertemente adsorbidos por el interior de las jarras de vidrio. Si éstos no son completamente quitados, aún los rastros pueden afectar los resultados de las pruebas de jarras en forma significativa. Los residuos de tales limpiadores pueden también anular la efectividad de dosis bajas de polímeros catiónicos.

- No dejar los vasos sobre el iluminador de la base prendido o sobre un objeto caliente, ya que esto afecta la temperatura y produce resultados variables e inconsistentes.
- Deben prepararse semanalmente soluciones concentradas de coagulante al 10%, y de estas prepararse diariamente soluciones al 1%.
- Numerar los vasos y dosificadores con el objeto de individualizarlos.
- Antes de llenar los vasos, se debe de homogenizar la muestra agitando el envase que la contiene.
- Los coagulantes deben ser adicionados lo más rápido posible a las 06 jarras, de lo contrario podrían cometerse errores al juzgarse la rapidez con que aparece el primer floc. El punto donde se aplican las dosis de coagulante tiene también importancia, las dosis deben aplicarse en el punto de mayor turbulencia, que es en el eje de las paletas.

#### 6.4 AGUA USADA EN LOS ENSAYOS

Con el objeto de obtener un conocimiento académico sobre la viabilidad de la técnica y su posterior extrapolación para casos prácticos fue necesario utilizar en la ejecución de los ensayos, agua preparada. Las muestras presentaron diferentes valores de color, pH, turbiedad, alcalinidad y dureza.

Para que el número de ensayos no se tornara excesivo sólo se hicieron variar la turbiedad y la alcalinidad. Se estudiaron dos valores de turbiedad combinados con dos valores de alcalinidad,



obteniendo así cuatro muestras distintas. Siendo los valores de cada una de las características los que se muestran en el cuadro N° 7-2.

### Muestras Tipo I y Tipo II

Para la preparación de estas muestras se utilizó agua proveniente de la red pública (alcalinidad alta) a las cuales sólo fue necesario adicionar una suspensión de arcilla y una solución de color.

### Muestras Tipo III y tipo IV

Como el agua de que se disponía para la preparación de las muestras era agua de la red, esta poseía un alto contenido de alcalinidad, por lo que para preparar muestras con bajo contenido de ella, fue necesario utilizar una combinación de agua de la red con agua desionizada a fin de obtener un agua con baja alcalinidad. Para la obtención de la alcalinidad deseada nos apoyamos en la siguiente fórmula:

$$A_3 = \frac{(A_1 * V_1) + (A_2 * V_2)}{(V_1 + V_2)}$$

Donde:

$A_1$  : Alcalinidad del agua desionizada.

$A_2$  : Alcalinidad del agua de la red pública.

$A_3$  : Alcalinidad que se desea obtener.

$V_1$  : Volumen de agua desionizada.

$V_2$  : Volumen de agua de la red pública.

Al igual que las otras dos muestras para producir turbiedad y color se adicionó arcilla y una solución de color hasta obtener el valor deseado.

### Preparación de una solución de color

Como el agua utilizada en cada una de las muestras no presentaba color fue necesario adicionar una solución preparada de color a fin de poder determinar la eficiencia de la técnica en la remoción de este parámetro.

La preparación de dicha solución consistió en adicionar pedazos de madera a un volumen dado de la muestra y dejar reposar durante por lo menos 24 horas, transcurrido dicho período se adiciona un volumen determinado hasta obtener el color deseado.

### Preparación de una suspensión de arcilla

Como las muestras fueron preparadas en el laboratorio y no fueron obtenidas en forma natural, fue necesario adicionar a cada tipo de agua un volumen dado de esta preparación hasta obtener el valor de turbiedad deseado.

Para la preparación de esta suspensión se utilizó arcilla caolín como se indica a continuación:

- Adicionar una cantidad dada de arcilla en un volumen de muestra (tipo I, tipo II, tipo III, tipo IV).
- Agitar la suspensión y dejar sedimentar durante por lo menos una hora, transcurrido dicho tiempo sifonear el sobrenadante de esta suspensión.

## 6.5 COMPOSICION MINERALOGICA Y ACONDICIONAMIENTO DE LA MAGNETITA

La magnetita utilizada en los diferentes ensayos se obtuvo del yacimiento de Marcona, depósito ubicado al sur del departamento de Ica. Un estudio mineralógico permitió determinar la composición real del mineral de hierro empleado, siendo la misma como sigue:

Magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )	.....	50%
Pirrotita ( $\text{FeS}$ )	.....	20%
Pirita ( $\text{FeS}_2$ )	.....	10%
Clacopirita ( $\text{CuFeS}_2$ )	.....	10%
Clorita ( $\text{Mg}_{2.6}\text{Fe}_{2.2}\text{Al}_{1.2}$ ) $\text{Si}_{2.8}\text{Al}_{1.2}\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	.....	10%

La magnetita empleada en las diferentes pruebas tuvo que recibir un acondicionamiento previo, para ello el mineral fue chancado y triturado, y debido al alto contenido de impurezas que presentaba fue sometido a separación magnética, gracias al cual fueron eliminadas casi en su totalidad las impurezas. Efectuada la limpieza, las partículas finas fueron separadas mediante el tamizado. En esta investigación se utilizaron aquellas partículas que pasaron la malla 325 y quedaron retenidas en la malla 400 del sistema ASTM, es decir que las partículas empleadas tenían un tamaño comprendido entre 38 y 45  $\mu\text{m}$ .

Seguidamente, las partículas seleccionadas fueron sometidas a lavados sucesivos con agua e hidróxido de sodio hasta que se obtuvo un efluente que presentó una turbiedad menor a 10 UNT. (El lavado fue similar al que se efectuó para la recuperación y regeneración de la magnetita, el cual se detalla en la pág. N° 112).

Con la finalidad de determinar el grado de pureza de la muestra de polvo tratada, fue necesario realizar el análisis mineralógico respectivo, obteniéndose la siguiente composición:

Magnetita( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )	.....	95%
Pirrotita ( $\text{FeS}$ )	.....	05%

## 6.6 DESCRIPCION DE LA METODOLOGIA

### 6.6.1 CARACTERIZACION DE LAS MUESTRAS

Las muestras preparadas en el laboratorio fueron caracterizadas antes de iniciarse los ensayos.

Las características principales de dichas aguas están dadas por los parámetros físicos y químicos que se indican a continuación:

- Turbiedad
- Color
- pH
- Alcalinidad total
- Dureza total, y
- Hierro total

La determinación de cada uno de estos parámetros se hicieron siguiendo las metodologías indicadas en el cuadro N° 6-2, según como se señala en los METODOS NORMALIZADOS PARA EL ANALISIS DE AGUAS POTABLES Y RESIDUALES (Ver anexo).

Cuadro N° 6-2  
METODOLOGIA DE ANALISIS

ANALISIS	METODOLOGIA
pH	Método electrométrico
Turbidez	Método nefelométrico
Color	Método espectrofotométrico
Alcalinidad total	Método titulométrico
Dureza total	Método titulométrico EDTA
Hierro total	Método de fenantrolina

#### 6.6.2 METODOLOGIA DE LOS ENSAYOS A NIVEL DE LABORATORIO

A través de una serie de pruebas de jarras, se pretende encontrar la eficiencia de esta nueva técnica de tratamiento de agua, para lo cual fue necesario trabajar con cuatro (04) tipos diferentes de agua artificial, variando cada una de sus características.

Para un mejor desarrollo del proceso, hemos creído conveniente dividir los ensayos en dos fases:

##### PRIMERA FASE:

En esta fase inicial, la magnetita es el único material que se dosifica al agua para la reducción de la turbiedad y el color.

Tal como se plantea en la figura N° 6-4, el agua inicialmente debe ser ajustada a un rango de pH ácido, para posteriormente dosificar magnetita en polvo, la cual estará en contacto con el agua durante un determinado tiempo. Poste-

riormente el agua pasa a través de un magneto el cual producirá un efecto de aglutinación de las partículas acelerando de esta manera el proceso de sedimentación.

Los ensayos se realizaron con la finalidad de determinar las siguientes variables óptimas:

- Dosis de magnetita
- pH
- Tiempo y gradiente de mezcla rápida
- Tiempo de floculación magnética, y
- Tiempo y velocidad de sedimentación.

#### SEGUNDA FASE:

La segunda fase consistió en una combinación de magnetita-coagulante (sulfato de aluminio). La figura N° 6-5 nos describe el proceso seguido. Al igual que en la primera etapa se realizaron los ensayos con el fin de caracterizar las siguientes variables:

- Dosis de magnetita
- Dosis de coagulante (sulfato)
- Concentración del coagulante
- pH
- Gradientes y tiempos de mezcla rápida
- Gradiente y tiempo de mezcla lenta
- Tiempo de floculación magnética, y
- Tiempo y velocidad de sedimentación

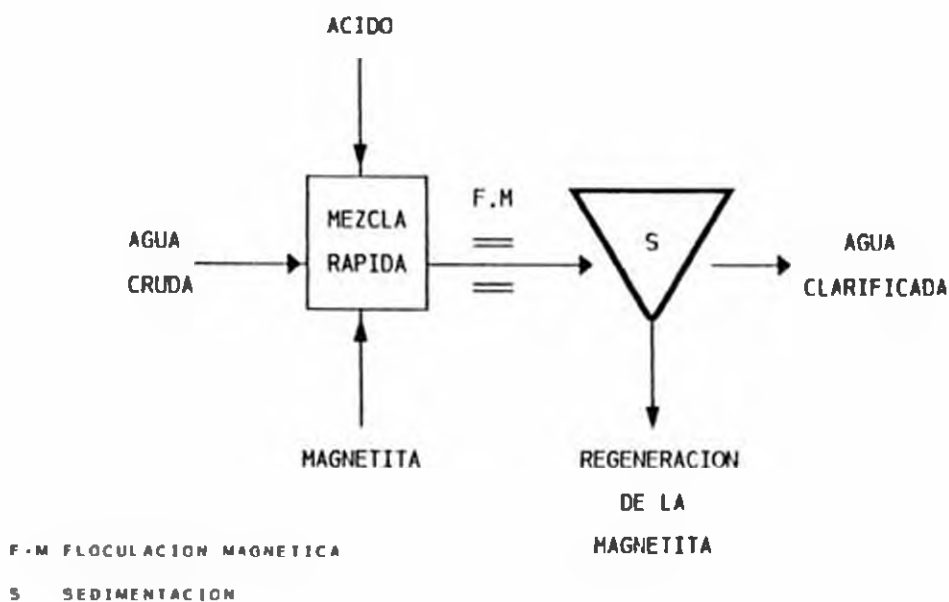


Figura N° 6-4  
DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO MAGNETITA

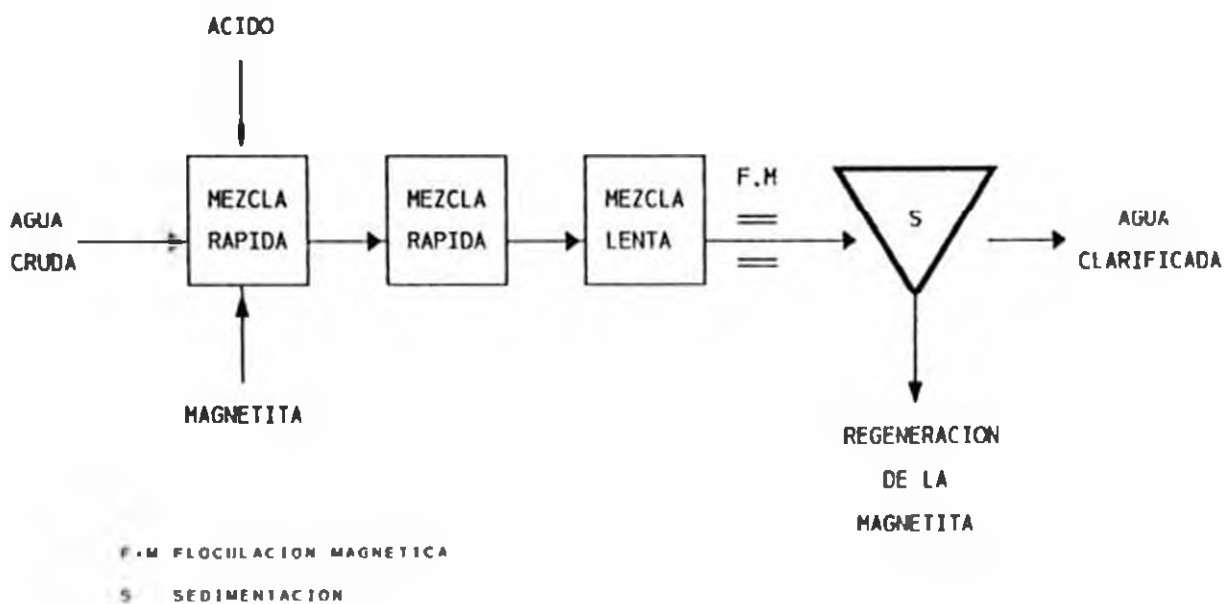


Figura N° 6-5  
DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO MAGNETITA-COAGULANTE

Los procedimientos que se siguieron para cada tipo de agua y fase se muestran esquemáticamente y en forma detallada en las figuras N° 6-6, 6-7, 6-8, 6-9, 6-10, 6-11, 6-12 y 6-13.



Figura N° 6-6

ESQUEMA DEL PROCEDIMIENTO SEGUIDO EN LA FASE MAGNETITA, PARA LA MUESTRA TIPO I

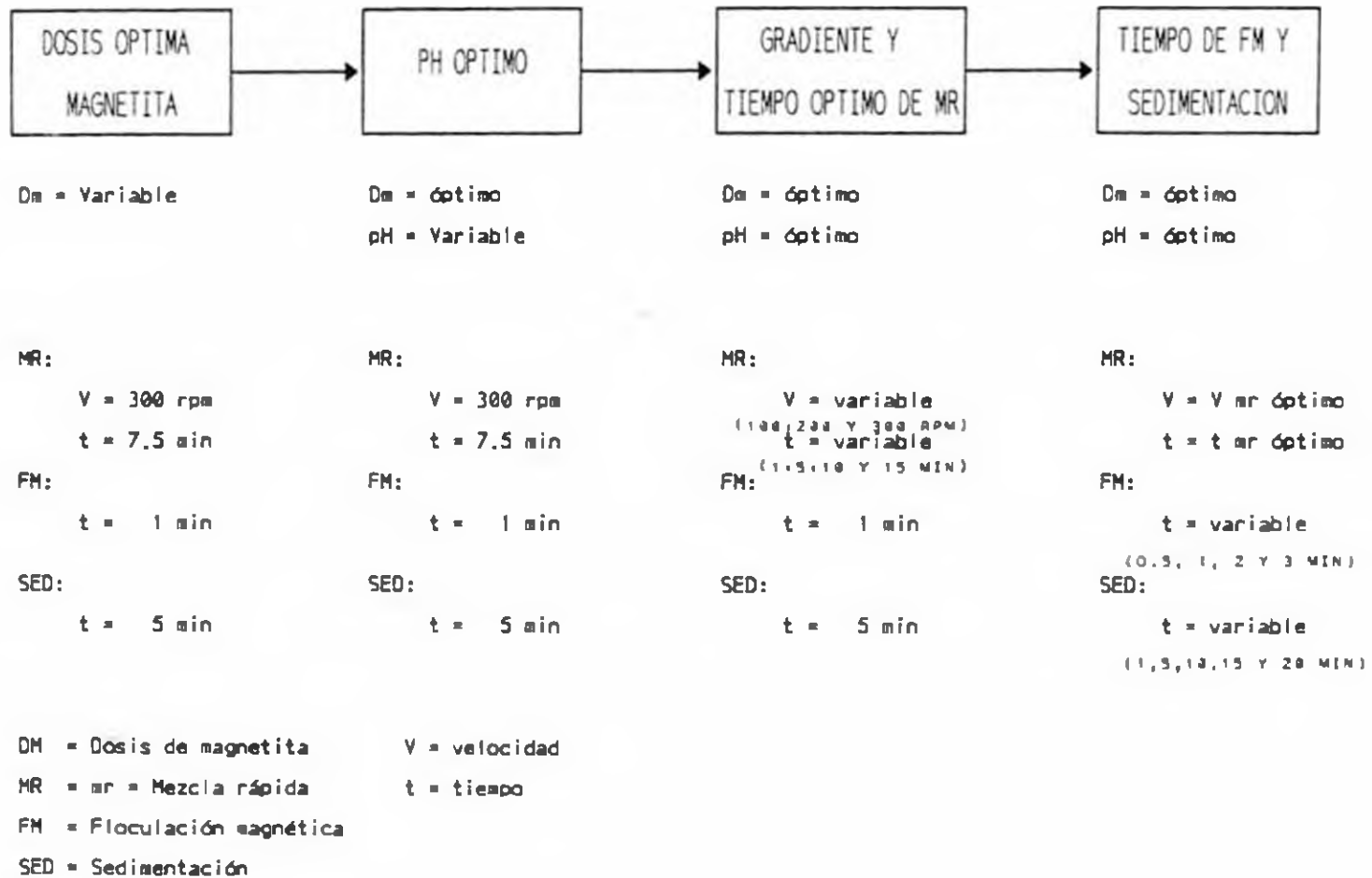


Figura N° 6-7

ESQUEMA DEL PROCEDIMIENTO SEGUIDO EN LA FASE MAGNETITA-COAGULANTE, PARA LA MUESTRA TIPO I

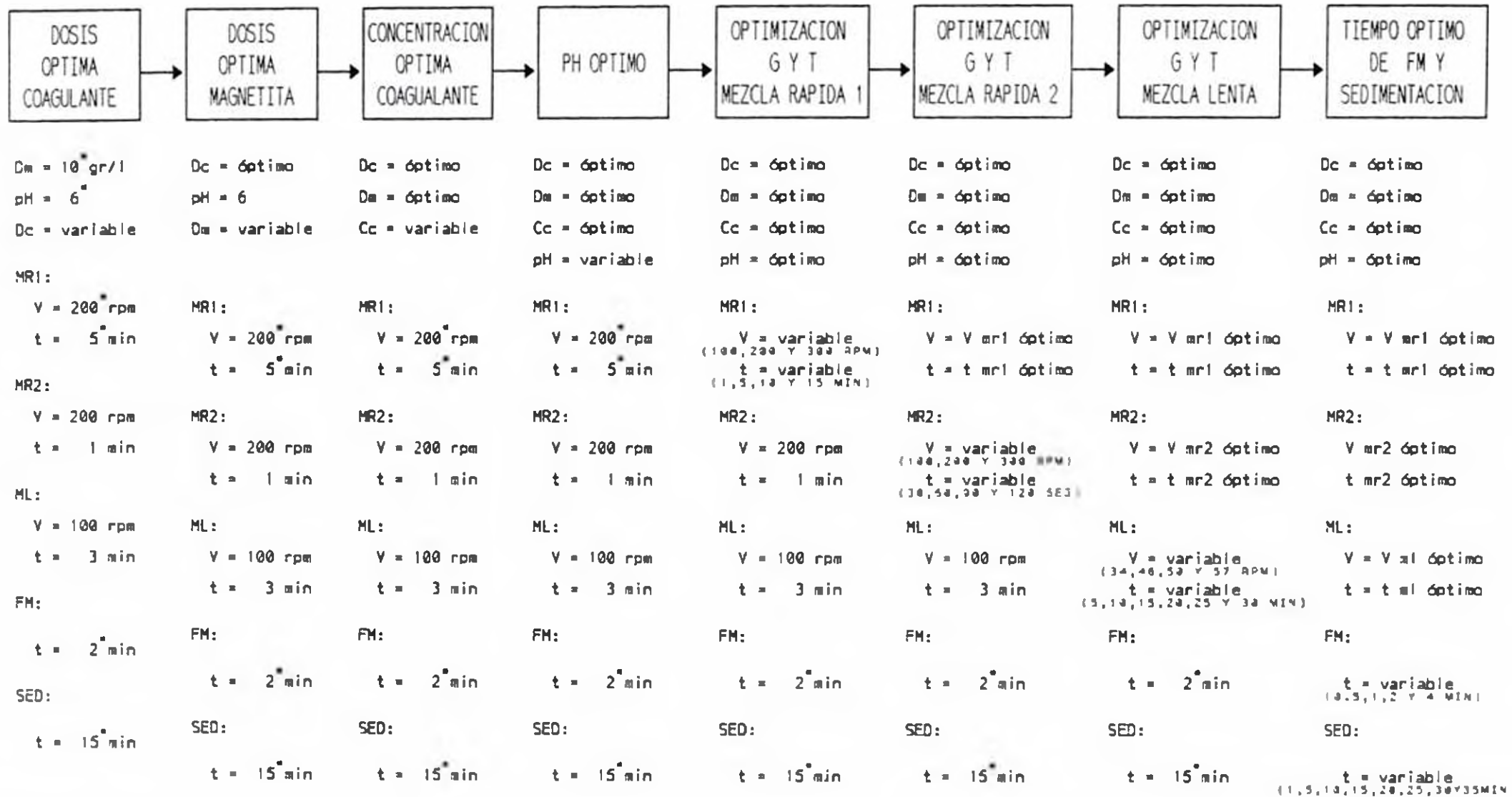
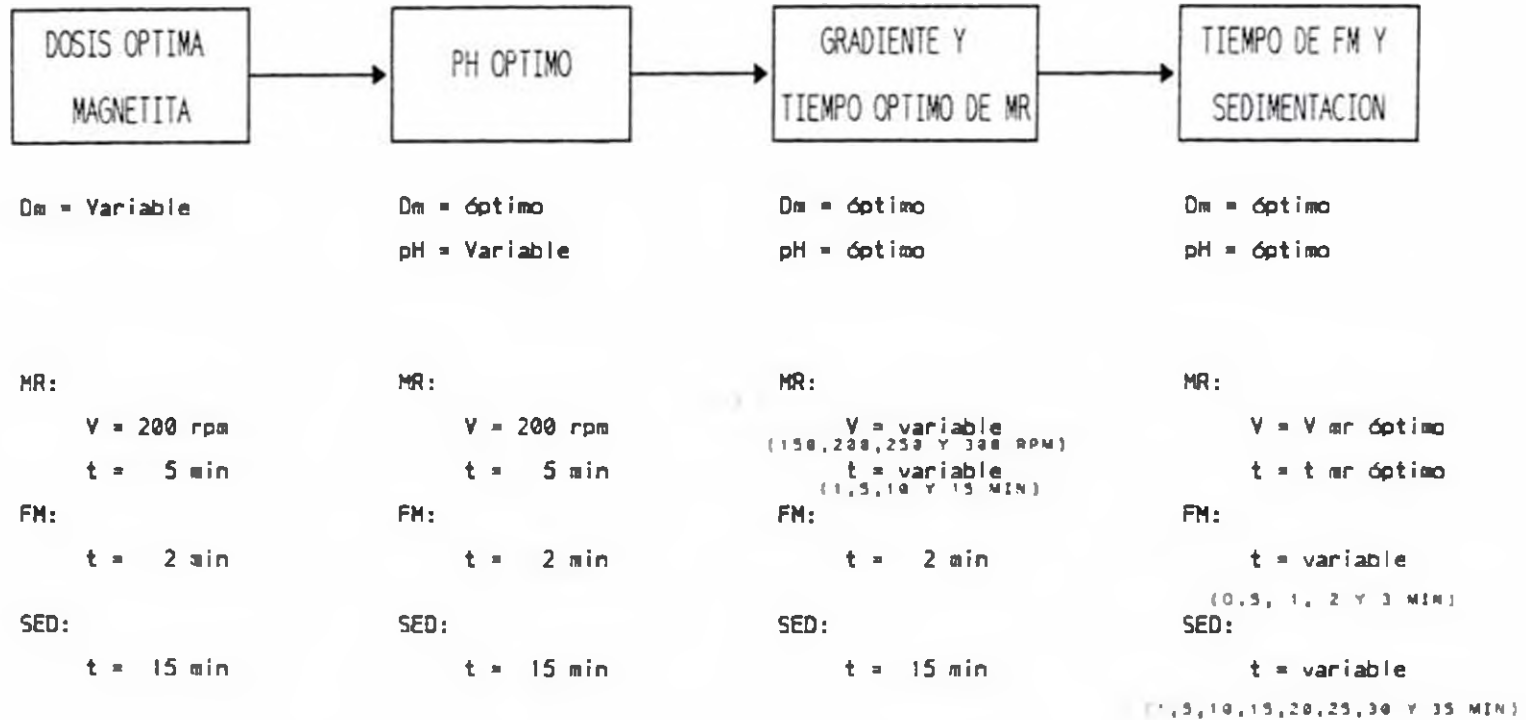


FIGURA N° 6-8

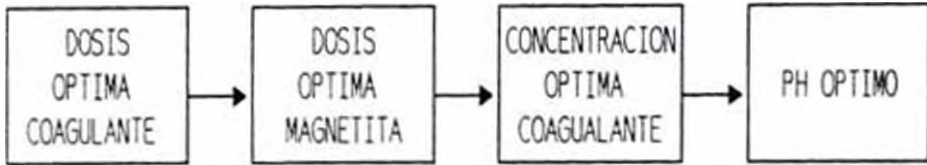
ESQUEMA DEL PROCEDIMIENTO SEGUIDO EN LA FASE MAGNETITA, PARA LA MUESTRA TIPO II



DM = Dosis de magnetita  
 MR = mr = Mezcla rápida  
 FM = Floculación magnética  
 SED = Sedimentación

V = velocidad  
 t = tiempo

ESQUEMA DEL PROCEDIMIENTO SEGUIDO EN



$D_m = 45 \text{ gr/l}$   
 $\text{pH} = 6$   
 $D_c = \text{variable}$

$D_c = \text{óptimo}$   
 $\text{pH} = 6$   
 $D_m = \text{variable}$

$D_c = \text{óptimo}$   
 $D_m = \text{óptimo}$   
 $C_c = \text{variable}$

$D_c = \text{óptimo}$   
 $D_m = \text{óptimo}$   
 $C_c = \text{óptimo}$   
 $\text{pH} = \text{variable}$

MR1:  
 $V = 300 \text{ rpm}$   
 $t = 1 \text{ min}$

MR1:  
 $V = 300 \text{ rpm}$   
 $t = 1 \text{ min}$

MR1:  
 $V = 300 \text{ rpm}$   
 $t = 1 \text{ min}$

MR1:  
 $V = 300 \text{ rpm}$   
 $t = 1 \text{ min}$

MR2:  
 $V = 200 \text{ rpm}$   
 $t = 1 \text{ min}$

MR2:  
 $V = 200 \text{ rpm}$   
 $t = 1 \text{ min}$

MR2:  
 $V = 200 \text{ rpm}$   
 $t = 1 \text{ min}$

MR2:  
 $V = 200 \text{ rpm}$   
 $t = 1 \text{ min}$

ML:  
 $V = 50 \text{ rpm}$   
 $t = 15 \text{ min}$

ML:  
 $V = 50 \text{ rpm}$   
 $t = 15 \text{ min}$

ML:  
 $V = 50 \text{ rpm}$   
 $t = 15 \text{ min}$

ML:  
 $V = 50 \text{ rpm}$   
 $t = 15 \text{ min}$

FM:  
 $t = 2 \text{ min}$

FM:  
 $t = 2 \text{ min}$

FM:  
 $t = 2 \text{ min}$

FM:  
 $t = 2 \text{ min}$

SED:  
 $t = 15 \text{ min}$

SED:  
 $t = 15 \text{ min}$

SED:  
 $t = 15 \text{ min}$

SED:  
 $t = 15 \text{ min}$

Figura N° 6-9

LA FASE MAGNETITA-COAGULANTE, PARA LA MUESTRA TIPO II

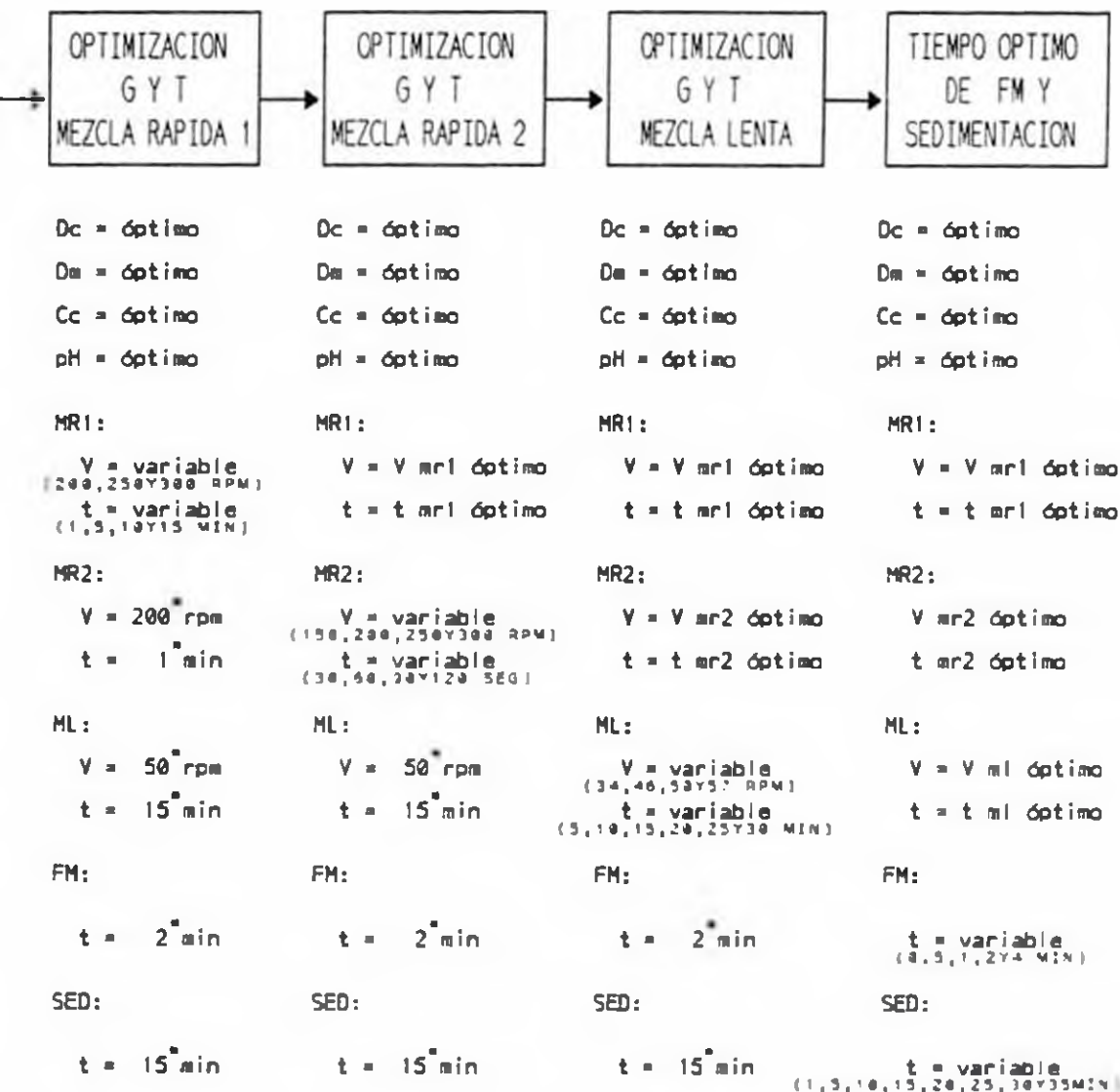
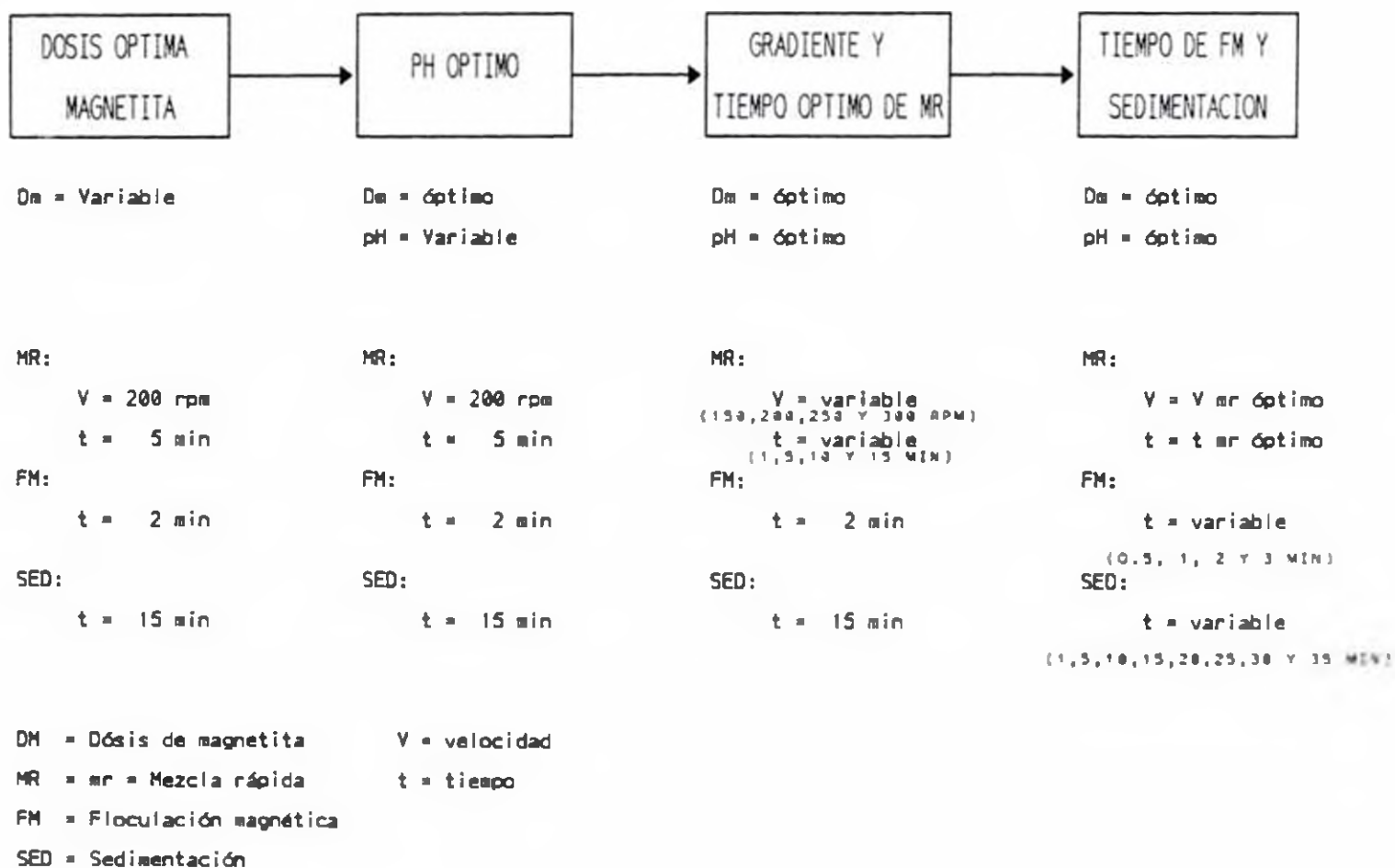
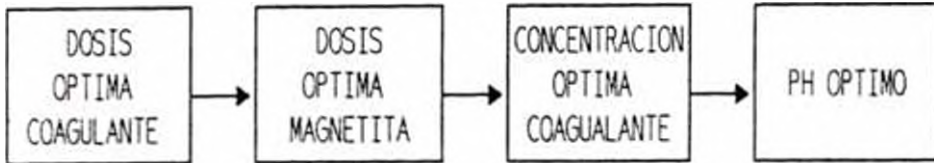


Figura N° 6-10

ESQUEMA DEL PROCEDIMIENTO SEGUIDO EN LA FASE MAGNETITA, PARA LA MUESTRA TIPO III



ESQUEMA DEL PROCEDIMIENTO SEGUIDO EN



$D_m = 45 \text{ gr/l}$   
 $\text{pH} = 6$   
 $D_c = \text{variable}$

$D_c = \text{óptimo}$   
 $\text{pH} = 6$   
 $D_m = \text{variable}$

$D_c = \text{óptimo}$   
 $D_m = \text{óptimo}$   
 $C_c = \text{variable}$

$D_c = \text{óptimo}$   
 $D_m = \text{óptimo}$   
 $C_c = \text{óptimo}$   
 $\text{pH} = \text{variable}$

MR1:  
 $V = 200 \text{ rpm}$   
 $t = 5 \text{ min}$

MR1:  
 $V = 200 \text{ rpm}$   
 $t = 5 \text{ min}$

MR1:  
 $V = 200 \text{ rpm}$   
 $t = 5 \text{ min}$

MR1:  
 $V = 200 \text{ rpm}$   
 $t = 5 \text{ min}$

MR2:  
 $V = 200 \text{ rpm}$   
 $t = 1 \text{ min}$

MR2:  
 $V = 200 \text{ rpm}$   
 $t = 1 \text{ min}$

MR2:  
 $V = 200 \text{ rpm}$   
 $t = 1 \text{ min}$

MR2:  
 $V = 200 \text{ rpm}$   
 $t = 1 \text{ min}$

ML:  
 $V = 50 \text{ rpm}$   
 $t = 15 \text{ min}$

ML:  
 $V = 50 \text{ rpm}$   
 $t = 15 \text{ min}$

ML:  
 $V = 50 \text{ rpm}$   
 $t = 15 \text{ min}$

ML:  
 $V = 50 \text{ rpm}$   
 $t = 15 \text{ min}$

FM:  
 $t = 2 \text{ min}$

FM:  
 $t = 2 \text{ min}$

FM:  
 $t = 2 \text{ min}$

FM:  
 $t = 2 \text{ min}$

SED:  
 $t = 15 \text{ min}$

SED:  
 $t = 15 \text{ min}$

SED:  
 $t = 15 \text{ min}$

SED:  
 $t = 15 \text{ min}$

Figura N° 6-11

LA FASE MAGNETITA-COAGULANTE, PARA LA MUESTRA TIPO III

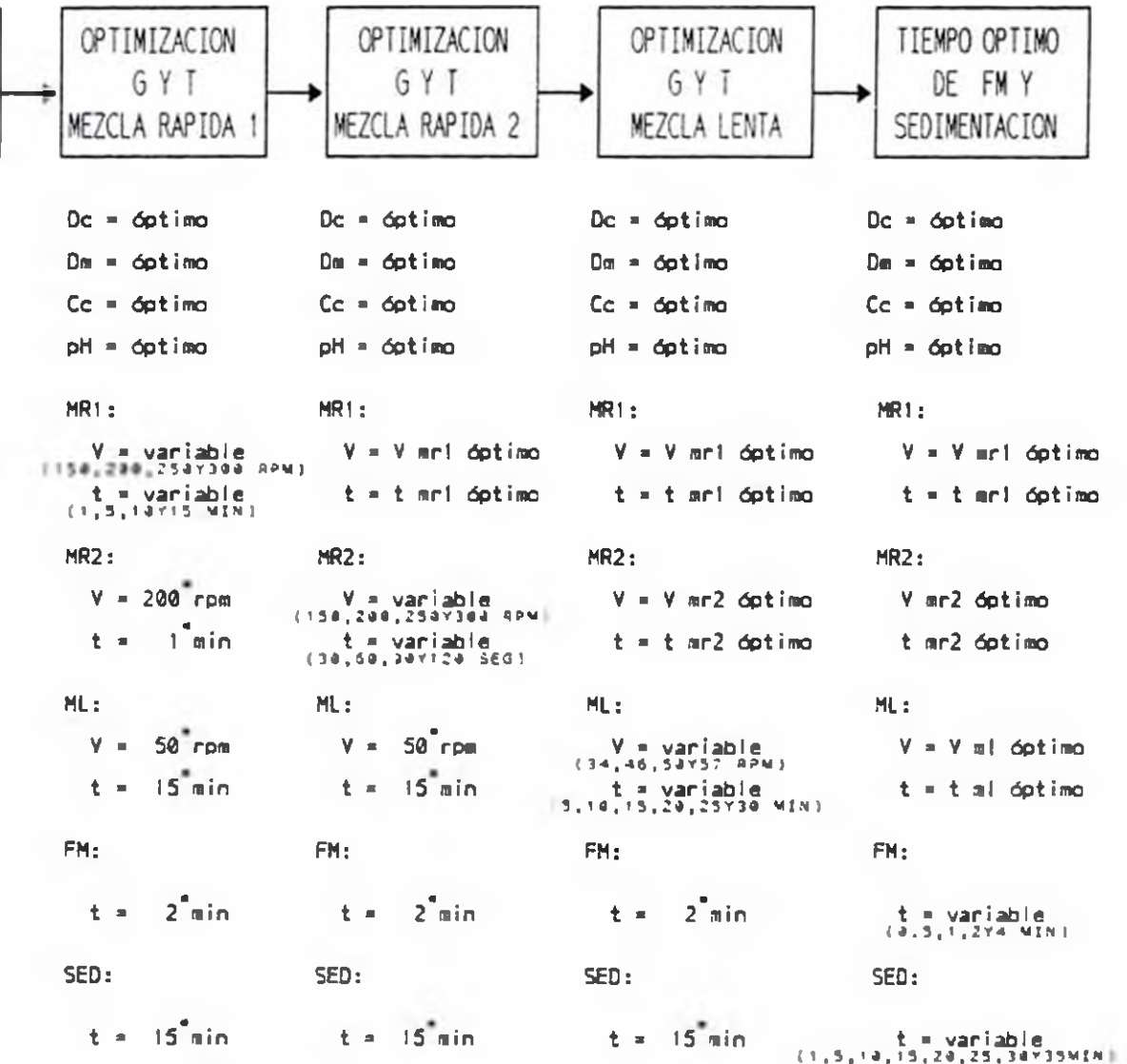
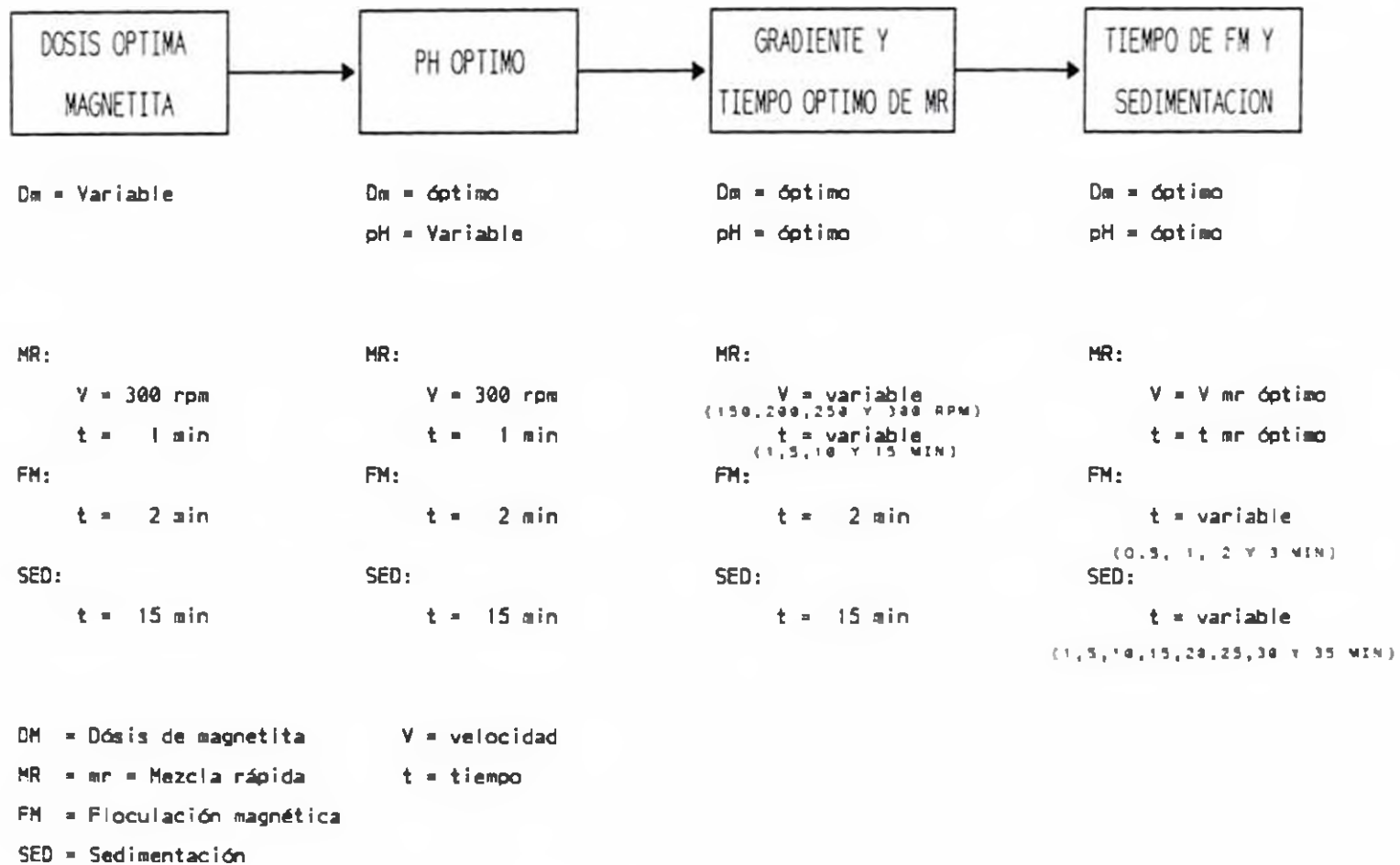


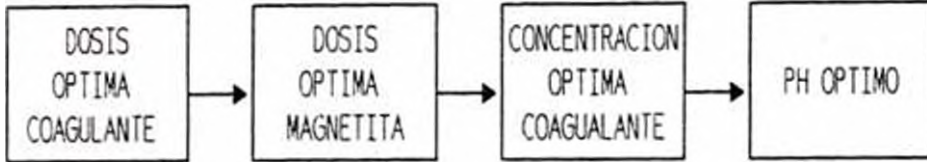


FIGURA N° 6-12

ESQUEMA DEL PROCEDIMIENTO SEGUIDO EN LA FASE MAGNETITA, PARA LA MUESTRA TIPO IV



ESQUEMA DEL PROCEDIMIENTO SEGUIDO EN



$D_m = \text{gr/l}$   
 $\text{pH} = 7,9$   
 $D_c = \text{variable}$

$D_c = \text{óptimo}$   
 $\text{pH} = 7,9$   
 $D_m = \text{variable}$

$D_c = \text{óptimo}$   
 $D_m = \text{óptimo}$   
 $C_c = \text{variable}$

$D_c = \text{óptimo}$   
 $D_m = \text{óptimo}$   
 $C_c = \text{óptimo}$   
 $\text{pH} = \text{variable}$

MR1:  
 $V = 300 \text{ rpm}$   
 $t = 1 \text{ min}$

MR1:  
 $V = 300 \text{ rpm}$   
 $t = 1 \text{ min}$

MR1:  
 $V = 300 \text{ rpm}$   
 $t = 1 \text{ min}$

MR1:  
 $V = 300 \text{ rpm}$   
 $t = 1 \text{ min}$

MR2:  
 $V = 200 \text{ rpm}$   
 $t = 1 \text{ min}$

MR2:  
 $V = 200 \text{ rpm}$   
 $t = 1 \text{ min}$

MR2:  
 $V = 200 \text{ rpm}$   
 $t = 1 \text{ min}$

MR2:  
 $V = 200 \text{ rpm}$   
 $t = 1 \text{ min}$

ML:  
 $V = 50 \text{ rpm}$   
 $t = 15 \text{ min}$

ML:  
 $V = 50 \text{ rpm}$   
 $t = 15 \text{ min}$

ML:  
 $V = 50 \text{ rpm}$   
 $t = 15 \text{ min}$

ML:  
 $V = 50 \text{ rpm}$   
 $t = 15 \text{ min}$

FM:  
 $t = 2 \text{ min}$

FM:  
 $t = 2 \text{ min}$

FM:  
 $t = 2 \text{ min}$

FM:  
 $t = 2 \text{ min}$

SED:  
 $t = 15 \text{ min}$

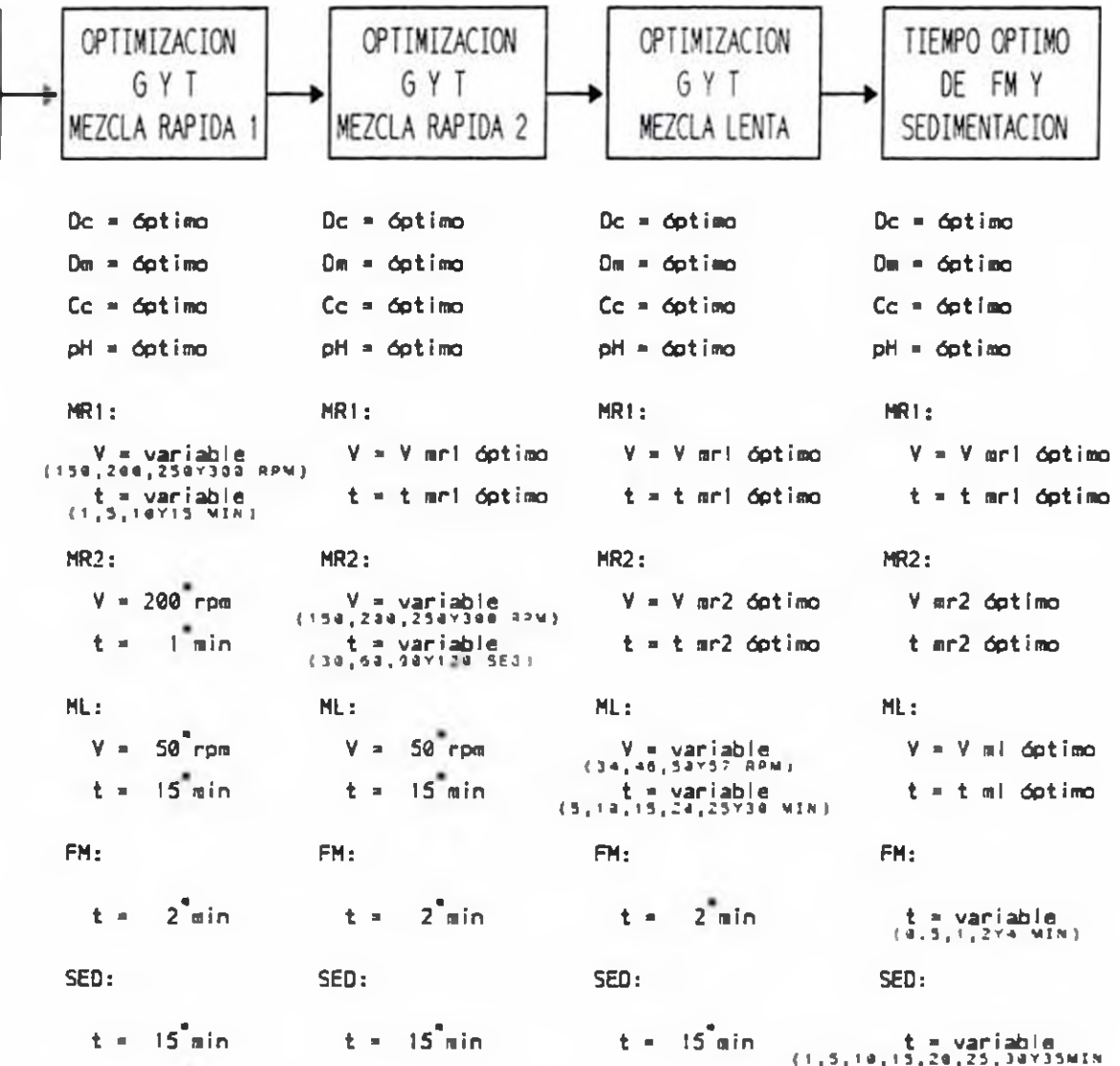
SED:  
 $t = 15 \text{ min}$

SED:  
 $t = 15 \text{ min}$

SED:  
 $t = 15 \text{ min}$

Figura N° 6-13

LA FASE MAGNETITA-COAGULANTE, PARA LA MUESTRA TIPO IV



**PROCEDIMIENTO:****MUESTRA TIPO I**

Inicialmente, como no se disponía de los parámetros óptimos de mezcla rápida, floculación magnética y sedimentación fue necesario, en base a las referencias, asumir ciertos valores para estas variables.

**Primera fase****1) DOSIS OPTIMA DE MAGNETITA (Dm)**

- a) Hacer girar las paletas a una velocidad de 300 rpm y en forma instantánea agregar diferentes dosis de magnetita a cada uno de los seis (06) vasos, mantener esta velocidad durante 7,5 minutos.
- b) Al finalizar el tiempo de mezcla, apagar el equipo y de inmediato aplicar el campo magnético a cada una de las jarras por espacio de 1 minuto.
- c) Colocar los sifones y dejar sedimentar 5 minutos.
- d) Determinar la turbidez final de cada jarra.
- e) Graficar:

- Turbiedad final vs. dosis de magnetita.

## 2) pH OPTIMO

- a) Acondicionar cada uno de los seis (06) vasos a diferentes pH (4, 5, 6, 7, 8 y 9), utilizar el  $H_2SO_4$  ó NaOH según sea el caso.
- b) Hacer girar las paletas a una velocidad de 300 rpm, enseguida aplicar la dosis óptima de magnetita (Dm) a cada vaso y dejar que se mezcle con el agua durante 7,5 minutos.
- c) Repetir los pasos 1-b, 1-c y 1-d.
- d) Graficar:

- Turbiedad final vs. pH.

3) GRADIENTE ( $V_{mr}$ ) Y TIEMPO OPTIMO DE MEZCLA RAPIDA ( $t_{mr}$ )

Para hallar estos parámetros, hemos creído conveniente tomar inicialmente, tres tipos de velocidad de mezcla rápida (100, 200 y 300 rpm), para tiempos diferentes de permanencia en la unidad de agitación (ver cuadro N° 6-3).

Cuadro N° 6-3  
SECUENCIA DEL PROCESO DE LAS PRUEBAS PARA DIFERENTES  
VELOCIDADES DE MEZCLA RAPIDA Y TIEMPOS DE PERMANENCIA

Tiempo Velocidad	1 min	5 min	10 min	15 min
100 rpm				
200 rpm				
300 rpm				

- a) Colocar cuatro (04) vasos con muestra de agua acondicionada al pli óptimo.
- b) Hacer girar las paletas a 100 rpm y agregar la dosis óptima de magnetita (Dm) a cada uno de los cuatro (04) vasos.
- c) Luego de transcurrido el primer minuto retirar el primer vaso del sistema de mezcla rápida y llevarlo enseguida al campo magnético por un espacio de un (01) minuto luego del cual se colocara el sifón y se le dejara que sedimente por un tiempo de 5 minutos.
- d) Medir la turbiedad remanente.
- e) Repetir los pasos 3-c y 3-d ahora para el segundo tercero y cuarto vaso una vez transcurridos sus tiempos de mezcla rápida (5, 10 y 15 respectivamente).
- f) Repetir todos los pasos anteriores, ahora considerando una velocidad de 200 rpm y luego para 300 rpm.
- g) Graficar:
  - Turbiedad final vs. Tiempo de mezcla rápida para cada una de las velocidades.

#### 4) Tiempo óptimo de floculación magnética (TFM) y sedimentación.

Al igual que el parámetro hallado anteriormente, sólo se utilizaran cuatro (04) vasos, realizando una prueba de jarras para cada uno de ellos.

- a) Colocar un (01) vaso con muestra de agua acondicionada al pH óptimo.
- b) Hacer girar las paletas a la velocidad óptima ( $V_{mr}$ ) y agregar la dosis óptima de magnetita ( $D_m$ ). Dejar que se mezcle por el tiempo óptimo ( $t_{mr}$ ) hallado anteriormente.
- c) Luego de transcurrido el tiempo, detener las paletas y enseguida aplicar el campo magnético (FM) sólo por un espacio de medio (0.5) minuto.
- d) Luego colocar el sifón al vaso, retirar muestras y determinar su turbiedad remanente transcurrido 1, 5, 10, 15 y 20 minutos de sedimentación.
- e) Repetir los pasos 4-a y 4-b.
- f) Repetir el 4-c, pero ahora considerando tiempos 1, 2 y 3 minutos de floculación magnética, para vasos diferentes, considerando siempre los mismos tiempos de sedimentación (ver cuadro N° 6-4).

Cuadro N° 6-4

SECUENCIA DEL PROCESO DE LAS PRUEBAS PARA DIFERENTES TIEMPOS DE FLOCULACION MAGNETICA Y TIEMPOS DE PERMANENCIA

T.Sed \ T.FM	1 min	5 min	10 min	15 min	20 min
0.5 min					
1.0 min					
2.0 min					
3.0 min					

## Segunda fase

Para esta fase, será necesario tomar todos los valores óptimos obtenidos en la primera fase.

### 5) DOSIS OPTIMA DE COAGULANTE (Dc)

- a) Llevar las paletas a la velocidad óptima de mezcla rápida ( $V_{mr}$ ), agregar la dosis óptima de magnetita ( $D_m$ ) a cada uno de los seis (06) vasos, mantener esta velocidad durante el tiempo óptimo ( $t_{mr}$ ).
- b) Luego agregar diferentes dosis de coagulante a cada uno de los vasos. Dejar que se mezcle por un (01) minutos.
- c) Seguidamente disminuir la velocidad a 100 rpm y dejar que permanezca así por 3 minutos.
- d) Inmediatamente después detener la agitación y aplicar el campo magnético a cada uno de los seis (06) por el tiempo óptimo de floculación magnética (TFM).
- e) Colocar los sifones y dejar sedimentar 15 minutos.
- f) Determinar la turbidez final de cada jarra.
- g) Graficar:

- Turbiedad final vs. dosis de coagulante.



**6) NUEVA DOSIS OPTIMA DE MAGNETITA**

- a) Llevar las paletas a una velocidad óptima de mezcla rápida ( $V_{mr}$ ) y en forma instantánea agregar diferentes dosis de magnetita a cada uno de los seis (06) vasos, mantener esta velocidad durante el tiempo óptimo ( $t_{mr}$ ) hallado en la primera fase.
- b) Luego agregar la dosis óptima de coagulante a cada uno de los vaso. Dejar que se mezcle por un (01) minutos.
- c) Repetir los pasos 5-c, 5-d, 5-e y 5-f.
- g) Graficar:

- Turbiedad final vs. Nueva dosis de mangetita.

**7) CONCENTRACION OPTIMA DE COAGULANTE ( $C_c$ )**

- a) Llevar las paletas a una velocidad óptima de mezcla rápida ( $V_{mr}$ ) y en forma instantánea agregar la nueva dosis óptima de magnetita a cada uno de los seis (06) vasos, mantener esta velocidad durante el tiempo óptimo ( $t_{mr}$ )
- b) Luego agregar la dosis óptima de coagulante a diferentes concentraciones a cada uno de los vaso. Dejar que se mezcle por un (01) minutos.
- c) Repetir los pasos 5-c, 5-d, 5-e y 5-f.
- g) Graficar:

- Turbiedad final vs. Concentración óptima.

### 8) pH OPTIMO

- a) Acondicionar cada uno de los seis (06) vaso a diferentes pH (4, 5, 6, 7, 8 y 9), utilizar el  $H_2SO_4$  ó NaOH según sea el caso.
- b) Repetir el paso 7-a.
- c) Luego agregar el coagulante (dosis y concentración óptima) a cada uno de los vaso. Dejar que se mezcle por un (01) minuto.
- d) Repetir los pasos 5-c, 5-d, 5-e y 5-f.
- g) Graficar:

- Turbiedad final vs. pH óptimo.

### 9) OPTIMIZACION DEL GRADIENTE ( $V_{mr1}$ ) Y TIEMPO DE MEZCLA RAPIDA ( $T_{mr1}$ )

Al igual que en la sección 3, se han tomado las mismas velocidades y tiempo de permanencia de mezcla rápida. Debe tenerse en cuenta que toda la muestra debe ser acondicionada al pH óptimo.

Para cada velocidad de mezcla las pruebas serán individuales, es decir que cada velocidad tendrá un total de cuatro pruebas individuales.

**Cuadro N° 6-5**  
**SECUENCIA DEL PROCESO PARA LA OPTIMIZACION DEL GRADIENTE**  
**DE MEZCLA RAPIDA Y TIEMPO DE PERMANENCIA**

Tiempo Velocidad	1 min	5 min	10 min	15 min
100 rpm				
200 rpm				
300 rpm				

- a) Colocar un (01) vaso con muestra de agua en el equipo de prueba de jarras.
- b) Hacer girar las paletas a 100 rpm y agregar la nueva dosis óptima de magnétita (Dm). Dejar que se mezcle por un (01) minuto.
- c) Llevar ahora las paletas a una velocidad de 200 rpm, y de inmediato aplicar la dosis óptima de coagulante y dejar a esta velocidad por un (01) minuto.
- d) Disminuir la velocidad a 100 rpm y dejar que permanezca así por 3 minutos.
- e) Detener la agitación y aplicar el campo magnético al vaso por el tiempo óptimo de floculación magnética (TFM).
- f) Colocar los sifones y dejar sedimentar 15 minutos.
- g) Determinar la turbidez final.
- h) Repetir el paso 9-a y 9-b ahora para un tiempo de mezcla de

5 minutos y proseguir luego con los pasos 9-c, 9-d, 9-e, 9-f y 9-g (ver cuadro N° 6-5).

- i) Hacer lo mismo que el paso 9-h pero ahora para tiempos de mezcla de 10 y 15 minutos.
- j) Repetir toda la sección 9 ahora variando solo la velocidad en b a 200 y luego para 300 rpm.
- g) Graficar para cada velocidad:

- Turbiedad final vs. tiempo de mezcla.

#### 10) OPTIMIZACION DE GRADIENTE ( $V_{mr2}$ ) Y TIEMPO DE MEZCLA ( $T_{mr2}$ )

- a) Colocar un (01) vaso con muestra de agua.
- b) Hacer girar las paletas a la velocidad óptima ( $V_{mr1}$ ) y agregar la dosis óptima de magnetita ( $D_m$ ) al vaso y mantener está velocidad por el tiempo óptimo ( $T_{mr1}$ ).
- c) Llevar ahora las paletas a una velocidad de 100 rpm y de inmediato aplicar la dosis óptima de coagulante, dejar a esta velocidad por 30 seg (Ver cuadro N° 6-6).

Cuadro N° 6-6

SECUENCIA DEL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN DE MEZCLA RÁPIDA  
Y TIEMPO DE PERMANENCIA EN LA UNIDAD

<div style="text-align: center;">Tiempo</div> <div style="text-align: left;">Velocidad</div>	30 seg	60 seg	90 seg	120 seg
100 rpm				
200 rpm				
300 rpm				

- d) Disminuir la velocidad a 100 rpm y dejar por espacio de 3 minutos. Luego se procederá a detener la agitación y se aplicara el campo magnético al vaso por el tiempo óptimo (TFM).
- e) Colocar los sifones y dejar sedimentar 15 minutos.
- f) Determinar la turbidez final.
- h) Repetir toda la sección 10, considerando solamente en C un tiempo de mezcla rápida ( $T_{mr2}$ ) igual a 60, 90 y 120 segundos (ver cuadro N° 6-6).
- j) Repetir todo el proceso anterior, para velocidades de mezcla rápida ( $V_{mr2}$ ) de 200 y 300 rpm.
- k) Graficar:
- Turbiedad final vs. Tiempo óptimo de mezcla rápida.

11) OPTIMIZACION DE GRADIENTE ( $V_{m1}$ ) Y TIEMPO DE MEZCLA LENTA ( $T_{m1}$ )

- a) Colocar seis (06) vasos con muestra de agua.
- b) Hacer girar las paletas a la velocidad óptima ( $V_{m1}$ ) y agregar la dosis óptima de magnetita ( $D_m$ ) a cada uno de los vasos al mismo tiempo, mantener está velocidad por el tiempo óptimo ( $T_{m1}$ ).
- c) Llevar ahora las paletas a la velocidad óptima ( $V_{m2}$ ) y de inmediato aplicar la dosis óptima de coagulante, dejar a esta velocidad por el tiempo óptimo ( $T_{m2}$ ).
- d) Luego disminuir la velocidad a 34 rpm. Transcurrido los primeros 5 minutos retirar el primer vaso y se (\*) aplica enseguida el campo magnético por el tiempo óptimo de floculación magnética (TFM). Colocarle el sifón y dejar que sedimente por 15 minutos.
- e) Retirar los vasos uno a uno, transcurridos los 10, 15, 20, 25 y 30 minutos respectivamente del equipo y repetir apartir de (\*).
- f) Repetir todos los pasos anteriores (11-a, hasta 11-e), pero ahora considerando en 11-d una velocidad de mezcla lenta de 46, luego 50 y finalmente 57 rpm. (ver cuadro N° 6-7).

Cuadro N° 6-7

**SECUENCIA DEL PROCESO DE OPTIMIZACION DEL GRADIENTE  
DE MEZCLA LENTA Y TIEMPO DE PERMANENCIA**

<div style="text-align: center;">Tiempo</div> <div style="text-align: center;">Velocidad</div>	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min
34 rpm						
46 rpm						
50 rpm						
57 rpm						

g) Graficar:

- Turbiedad final vs. Tiempo óptimo de mezcla lenta ( $T_{ml}$ ).
- Turbiedad final vs. Gradiente de velocidad.

**12) TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION MAGNETICA Y SEDIMENTACION**

- a) Colocar un (01) vaso con muestra de agua.
- b) Hacer girar las paletas a la velocidad óptima ( $V_{mr1}$ ) y agregar la dosis óptima de magnetita ( $D_m$ ), mantener esta velocidad por el tiempo óptimo ( $T_{mr1}$ ).
- c) Llevar ahora las paletas a la velocidad óptima ( $V_{mr2}$ ) y de inmediato aplicar la dosis óptima de coagulante, dejar a esta velocidad por el tiempo óptimo ( $T_{mr2}$ ).
- d) Luego disminuir a la velocidad óptima de mezcla lenta ( $V_{ml}$ ) y dejar por el tiempo óptimo ( $T_{ml}$ ).

- e) Detener la agitación y aplicar el campo magnético por 0,5 minutos.
- f) Colocar el sifón al vaso, retirar muestras y determinar su turbiedad remanente transcurrido 1, 5, 10, 20, 25, 30 y 35 minutos.

**Cuadro N° 6-8**  
**SECUENCIA DEL PROCESO DE OPTIMIZACION DE FLOCULACION**  
**MAGNETICA Y TIEMPO DE SEDIMENTACION**

Tiempo FM	1 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min	35 min
0,5 min								
1,0 min								
2,0 min								
4,0 min								

- g) Graficar:
  - Turbiedad final vs. Tiempo óptimo de floculación magnética (TFM).
  - Turbiedad final vs. Tiempo óptimo de sedimentación.
- h) Repetir todo el procedimiento considerando en 12-e tiempos de floculación magnética de 1, 2, y 4 minutos (ver cuadro N° 6-8).



## MUESTRA TIPO II

Basados en los resultado del primer tipo de agua, creímos conveniente hacer ciertas modificaciones en los tiempos de sedimentación, así como en los valores de las velocidades de mezcla rápida.

### Primera fase

#### 1) DOSIS OPTIMA DE MAGNETITA (Dm)

- a) Acondicionar la muestra a pH 6<sup>(1)</sup>, y hacer girar las paletas a una velocidad de 200 rpm, en forma instantánea agregar diferentes dosis de magnetita a cada uno de los seis (06) vasos, mantener esta velocidad durante un tiempo de cinco (05) minutos.
- b) Al finalizar el período de mezcla, apagar el equipo y de inmediato aplicar el campo magnético a cada una de las jarras por espacio de dos (02) minutos.
- c) Colocar los sifones y dejar sedimentar durante 15 minutos.
- d) Transcurrido el período de sedimentación, determinar la turbiedad final en cada jarra.
- e) Graficar:

- Turbiedad final vs. dosis de magnetita.

(1) La adsorción es más eficiente en rango Acido.

## 2) pH OPTIMO

- a) Acondicionar cada uno de los seis (06) vaso a diferentes pH (4, 5, 6, 7, 8 y 9), utilizar el  $H_2SO_4$  ó NaOH según sea el caso.
- b) Hacer girar las paletas a una velocidad de 200 rpm, enseguida aplicar la dosis óptima de magnetita (Dm) a cada vaso y dejar que se mezcle con el agua durante 5 minutos.
- c) Repetir los pasos 1-b, 1-c y 1-d.
- d) Graficar:
  - Turbiedad final vs. pH.

3) GRADIENTE ( $V_{mr}$ ) Y TIEMPO OPTIMO DE MEZCLA RAPIDA ( $t_{mr}$ )

Para hallar estos parámetros, hemos considerado cuatro tipos de velocidad de mezcla rápida (150, 200, 250 y 300 rpm), para tiempos diferentes de permanencia en la unidad de agitación (ver cuadro N° 6-9).

Cuadro N° 6-9

SECUENCIA DEL PROCESO DE LAS PRUEBAS PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE MEZCLA RAPIDA Y TIEMPOS DE PERMANENCIA

Tiempo Velocidad	1 min	5 min	10 min	15 min
150 rpm				
200 rpm				
250 rpm				
300 rpm				

- a) Colocar cuatro (04) vasos con muestra de agua acondicionada al pH óptimo.
- b) Hacer girar las paletas a 150 rpm y agregar la dosis óptima de magnetita (Dm) a cada uno de los cuatro (04) vasos.
- c) Luego de transcurrido el primer minuto retirar el primer vaso del sistema de mezcla rápida y llevarlo enseguida al campo magnético por un espacio de 2 minutos luego del cual se colocara el sifón y se le dejara que sedimente por un tiempo de 15 minutos.
- d) Medir la turbiedad remanente.
- e) Repetir los pasos 3-c y 3-d ahora para el segundo, tercero y cuarto vaso una vez transcurridos sus tiempos de mezcla rápida (5, 10 y 15 respectivamente).
- f) Repetir todos los pasos anteriores, ahora considerando una velocidad de 200, 250 y 300 rpm.
- g) Graficar:
  - Turbiedad final vs. Tiempo de mezcla rápida para cada una de las velocidades.

#### 4) Tiempo óptimo de floculación magnética (TFM) y sedimentación.

Al igual que el parámetro hallado anteriormente, sólo se utilizaran cuatro (04) vasos, realizando una prueba de jarras para cada uno de ellos.



## Segunda fase

En esta fase serán considerados todos los valores óptimos obtenidos en la primera fase.

### 5) DOSIS OPTIMA DE COAGULANTE (Dc)

- a) Una vez acondicionada la muestra a pH 6 hacer girar las paletas a la velocidad óptima de mezcla rápida (Vmr), agregar la dosis óptima de magnetita (Dm) a cada uno de los seis (06) vasos, mantener esta velocidad durante el tiempo óptimo (tmr).
- b) Luego agregar diferentes dosis de coagulante a cada uno de los vasos. Dejar que se mezcle por un (01) minutos.
- c) Seguidamente disminuir la velocidad a 50 rpm y dejar que permanezca así por 15 minutos.
- d) Inmediatamente después de detener la agitación, aplicar el campo magnético a cada uno de los seis (06) por el tiempo óptimo de floculación magnética (TFM).
- e) Colocar los sifones y dejar sedimentar 15 minutos.
- f) Determinar la turbidez final de cada jarra.
- g) Graficar:

— Turbiedad final vs. dosis de coagulante.

**6) NUEVA DOSIS OPTIMA DE MAGNETITA**

- a) Llevar las paletas a una velocidad óptima de mezcla rápida ( $V_{mr}$ ) y en forma instantánea agregar diferentes dosis de magnetita a cada uno de los seis (06) vasos, mantener esta velocidad durante el tiempo óptimo hallado en la primera fase.
- b) Luego agregar la dosis óptima de coagulante a cada uno de los vasos. Dejar que se mezcle durante un (01) minuto.
- c) Repetir los pasos 5-c, 5-d, 5-e y 5-f.
- g) Graficar:

- Turbiedad final vs. Nueva dosis de magnetita.

**7) CONCENTRACION OPTIMA DE COAGULANTE ( $C_c$ )**

- a) Llevar las paletas a una velocidad óptima de mezcla rápida ( $V_{mr}$ ) y en forma instantánea agregar la nueva dosis óptima de magnetita a cada uno de los seis (06) vasos, mantener esta velocidad durante el tiempo óptimo ( $t_{mr}$ )
- b) Agregar la dosis óptima de coagulante a diferentes concentraciones (0,1, 0,25, 0,50, 1,0, 2,0, 2,5%), en cada uno de los vasos. Dejar que se mezcle por un (01) minutos.
- c) Repetir los pasos 5-c, 5-d, 5-e y 5-f.
- d) Graficar:

- Turbiedad final vs. Concentración óptima.

#### 8) pH OPTIMO

- a) Acondicionar cada uno de los seis (06) vasos a diferentes pH (4, 5, 6, 7, 8 y 9), utilizar para ello el  $H_2SO_4$  ó NaOH según sea el caso.
- b) Repetir el paso 7-a.
- c) Luego agregar el coagulante (dosis y concentración óptima) a cada uno de los vasos. Dejar que se mezcle durante un (01) minuto.
- d) Repetir los pasos 5-c, 5-d, 5-e y 5-f.
- g) Graficar:
  - Turbiedad final vs. pH óptimo.

#### 9) OPTIMIZACION DE GRADIENTE (VMR1) Y TIEMPO DE MEZCLA RAPIDA (Tmr1).

- a) Colocar un (01) vaso con muestra de agua, al pH óptimo, en el equipo de prueba de jarras.
- b) Hacer girar las paletas a 200 rpm y agregar la nueva dosis óptima de magnetita (Dm). Dejar que se mezcle durante un (01) minuto.
- c) Llevar ahora las paletas a una velocidad de 200 rpm, y de inmediato aplicar la dosis óptima de coagulante y dejar a esta velocidad por un (01) minuto.

Cuadro N° 6-11

SECUENCIA DEL PROCESO PARA LA OPTIMIZACION DEL GRADIENTE  
DE MEZCLA RAPIDA Y TIEMPO DE PERMANENCIA

<div style="text-align: center;">Tiempo</div> <div style="text-align: center;">Velocidad</div>	1 min	5 min	10 min	15 min
200 rpm				
250 rpm				
300 rpm				

- d) Disminuir la velocidad a 50 rpm y dejar que permanezca así por 15 minutos.
- e) Detener la agitación y aplicar el campo magnético al vaso por el tiempo óptimo de floculación magnética (TFM).
- f) Colocar los sifones y dejar sedimentar 15 minutos.
- g) Determinar la turbidez final.
- h) Repetir el paso 9-a y 9-b ahora para un tiempo de mezcla de 5 minutos y proseguir luego con los pasos 9-c, 9-d, 9-e, 9-f y 9-g.
- i) Hacer lo mismo que el paso 9-h pero ahora para tiempos de mezcla de 10 y 15 minutos.
- j) Repetir toda la sección 9, variando la velocidad de mezcla rápida de magnetita a 250 y 300 rpm (ver cuadro N° 6-11).



g) Graficar para cada velocidad:

- Turbiedad final vs. tiempo de mezcla.

#### 10) OPTIMIZACION DE GRADIENTE ( $V_{mr2}$ ) Y TIEMPO DE MEZCLA ( $T_{mr2}$ )

- a) Colocar un (01) vaso con muestra de agua, acondicionado al pH óptimo.
- b) Hacer girar las paletas a la velocidad óptima ( $V_{mr1}$ ) y agregar la dosis óptima de magnetita ( $D_m$ ), mantener está velocidad por el tiempo óptimo ( $T_{mr1}$ ).
- c) Llevar ahora las paletas a una velocidad de 150 rpm y de inmediato aplicar la dosis óptima de coagulante, dejar a esta velocidad por 30 seg (ver cuadro N° 6-12).

Cuadro N° 6-12

#### SECUENCIA DEL PROCESO DE OPTIMIZACION DE MEZCLA RÁPIDA Y TIEMPO DE PERMANENCIA EN LA UNIDAD

Tiempo Velocidad	30 seg	60 seg	90 seg	120 seg
150 rpm				
200 rpm				
250 rpm				
300 rpm				

- d) Disminuir la velocidad a 50 rpm y dejar por espacio de 15 minutos. Transcurrido dicho tiempo detener la agitación y aplicar el campo magnético al vaso por el tiempo óptimo (TFM).

- e) Colocar los sifones y dejar sedimentar 15 minutos.
- f) Determinar la turbidez final.
- g) Repetir toda la sección 10, considerando solamente en C un tiempo de mezcla rápida ( $T_{mr2}$ ) igual a 60, 90 y 120 segundos (ver cuadro N° 6-12).
- h) Repetir todo el proceso anterior, para velocidades de mezcla rápida ( $V_{mr2}$ ) de 200 y 300 rpm.
- i) Graficar:
  - Turbiedad final vs. Tiempo óptimo de mezcla rápida.

#### 11) OPTIMIZACION DE GRADIENTE ( $V_{m1}$ ) Y TIEMPO DE MEZCLA LENTA ( $T_{m1}$ )

- a) Colocar seis (06) vasos con muestra de agua, acondicionada al pH óptimo.
- b) Hacer girar las paletas a la velocidad óptima ( $V_{m1}$ ) y agregar la dosis óptima de magnetita ( $D_m$ ) a cada uno de los vasos al mismo tiempo, mantener está velocidad por el tiempo óptimo ( $T_{m1}$ ).
- c) Llevar ahora las paletas a la velocidad de óptima ( $V_{mr2}$ ) y de inmediato aplicar la dosis óptima de coagulante, dejar a esta velocidad por el tiempo óptimo ( $T_{mr2}$ ).
- d) Luego disminuir la velocidad a 34 rpm. Transcurrido los primeros 5 minutos retirar el primer vaso y (\*) aplicar

enseguida el campo magnético por el tiempo óptimo de floculación magnética (TFM). Colocar el sifón y dejar sedimentar por 15 minutos.

- e) Retirar los vasos uno a uno, una vez transcurridos los 10, 15, 20, 25 y 30 minutos, repetir a partir de (\*).
- f) Repetir todos los pasos anteriores (11-a, hasta 11-e), pero considerando en 11-d una velocidad de mezcla lenta de 46, 50 y finalmente de 57 rpm. (ver cuadro N° 6-13).

**Cuadro N° 6-13**  
**SECUENCIA DEL PROCESO DE OPTIMIZACION DEL GRADIENTE**  
**DE MEZCLA LENTA Y TIEMPO DE PERMANENCIA**

Tiempo Velocidad	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min
34 rpm						
46 rpm						
50 rpm						
57 rpm						

- i) Graficar:
  - Turbiedad final vs. Tiempo óptimo de mezcla lenta (Tml).
  - Turbiedad final vs. Velocidad óptima de mezcla lenta (Vml).

**12) TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION MAGNETICA Y SEDIMENTACION**

- a) Colocar un (01) vaso con muestra de agua acondicionado al



g) Graficar:

- Turbiedad final vs. Tiempo de sedimentación para todo valor de floculación magnética.

h) Repetir todo el procedimiento considerando en 12-e tiempos de floculación magnética de 1, 2, y 4 minutos (ver cuadro N° 14).

#### MUESTRA TIPO III Y IV

Para estos dos tipos de muestra, se ha seguido la misma metodología que el agua tipo II, con la única variación de que en la sección nueve (09) se le ha aumentado una velocidad de mezcla rápida ( $V_{mr1}$ ) de 150 rpm.

#### METODOLOGIA, UTILIZANDO SULFATO DE ALUMINIO PARA LOS CUATRO TIPOS DE AGUA.

Con los resultados obtenidos de los parámetros estudiados en los cuatro tipos de agua, se ha realizado una comparación utilizando solo sulfato de aluminio en el proceso de clarificación.

#### 13) DOSIS OPTIMA DE SULFATO DE ALUMINIO

- a) Colocar el agua de la muestra en 6 vasos de 2 lt., las cuales se introducen debajo de los agitadores los cuales se echan andar a una velocidad de (\*) rpm (ver cuadro N°

6-15). Luego se inyectan diferentes dosis de coagulante a cada uno de los vasos (15, 20, 25, 30, 35 y 40 mg/l), dejar mezclar durante (\*\*) minuto.

- b) Hecha la mezcla rápida, proceda a flocular a un velocidad de (+) (ver cuadro N° 6-15) durante un tiempo de (++) minutos. Finalizado el tiempo colocar los sifones y dejar sedimentar en forma usual por (m) minutos.

Cuadro N° 6-15

VALORES DE MEZCLA RAPIDA, LENTA Y SEDIMENTACION, UTILIZADOS EN LOS DIFERENTES ENSAYOS, PARA CADA TIPO DE AGUA

Tipo de agua Parámetro	I	II	III	IV
Mezcla rápida (rpm) (+)	200.00	150.00	200.00	250.00
Tiempo (min) (++)	1.00	1.50	0.50	1.00
Mezcla lenta (rpm) (+)	50.00	50.00	68.00	50.00
Tiempo (min) (++)	15.00	20.00	20.00	22.50
Sedimentación (min)	15.00	20.00	20.00	15.00

- c) Durante el proceso evaluar el tamaño del floc (índice de willcomb).

- d) Determine la turbiedad remanente.

- e) Graficar:

Turbiedad final vs. dosis de coagulante.

Cada tipo de agua debe tener su gráfica.

#### 14) TIEMPO DE SEDIMENTACION

El procedimiento es similar al explicado anteriormente. Esta prueba consiste en determinar el % de la turbiedad remanente que aún queda en los distintos tiempos de toma de muestra.

##### PROCEDIMIENTO:

- a) Colóquese un (01) vaso de 2 litros con agua cruda en el equipo de prueba de jarras e inicie la agitación con una velocidad (\*) rpm (ver cuadro N° 6-15).
- b) Agregar la dosis óptima de sulfato de aluminio y después de (\*\*) minuto(s) de agitación rápida, reduzca la rotación a (+) rpm. por espacio de (++) minutos (ver cuadro N° 6-15)
- c) Suspenda la agitación y retirar del equipo el vaso. Colocar el sifón.
- d) A partir del momento  $t=0$  en que se detuvo la agitación, se empieza a contar el tiempo de sedimentación. Tomar muestras y medir la turbiedad remanente al 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30 y 35 minutos.
- e) Graficar:

Turbiedad remanente vs. tiempo de sedimentación

#### 6.7 METODO EXPERIMENTAL DE LA RECUPERACION Y REGENERACION DE LA MAGNETITA

Una de las características principales de este estudio es la habilidad para reutilizar la magnetita.

La separación del material adsorbido en la superficie de la magnetita, o lo que es lo mismo el lavado y regeneración de la magnetita, se logra mediante lavados sucesivos con agua alcalina.

Con la finalidad de determinar los requerimientos de lavado se procedió en el laboratorio, con la ayuda del equipo de prueba de jarras, a determinar los valores de cada uno de los factores que influyen en el proceso.

#### 6.7.1 PARTE EXPERIMENTAL

##### 6.7.1.1 PREPARACION DEL AGUA DE LAVADO

###### Materiales y Reactivos

- pH metro
- NaOH 1N
- Agua de la red pública

###### Procedimiento

- a. Llenar en un recipiente de plástico 20 litros de agua de la red.
- b. Agitar la masa de agua con una varilla y adicionar lentamente el hidróxido de sodio.
- c. Medir el pH de la solución.
- d. Repetir los pasos b y c hasta obtener un agua con pH



entre 11 y 12 unidades de pH.

#### 6.7.1.2 LAVADO DE LA MAGNETITA

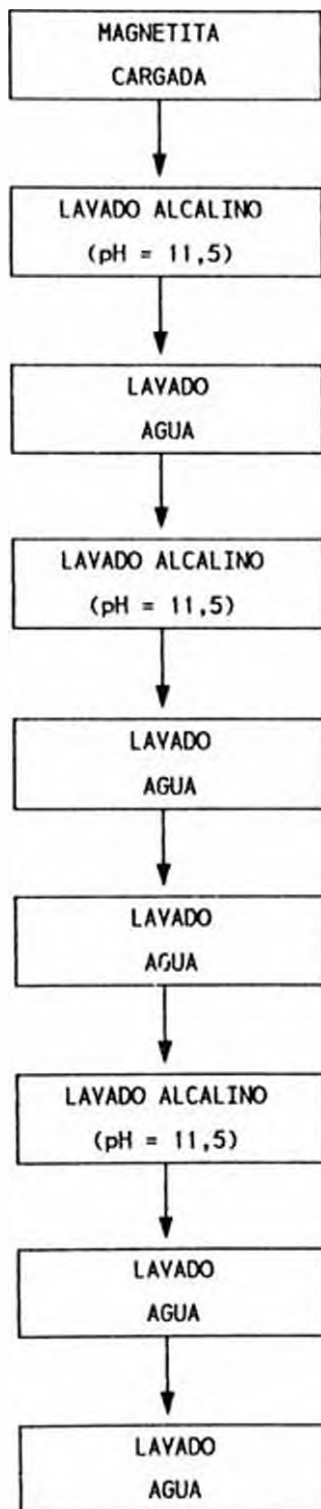
##### Materiales y Reactivos

- Equipo de prueba de jarras
- 01 vaso de 2 litros de capacidad
- Agua alcalina (pH = 11,5)
- Agua de la red pública

##### Procedimiento

- a. Colocar magnetita cargada en el vaso de 02 litros, un volumen de aproximadamente 300 ml.
- b. Adicionar luego agua alcalina o agua de la red, según sea el caso hasta la marca de 1800 ml.
- c. Hacer girar las paletas a 300 rpm. durante un minuto.
- d. Retirar la paleta del vaso y dejar sedimentar durante dos minutos.
- e. Transcurrido el tiempo de sedimentación separar la parte sólida de la líquida.
- f. Repetir los pasos b, c, d y e para cada una de las etapas que se indican en la figura N° 6-14.

Figura N 6-14

ESQUEMA DEL PROCESO DE LA LIMPIEZA  
Y REGENERACION DE LA MAGNETITA

Nota: Cada etapa de lavado es seguida por una separación sólido líquido.

Capítulo 7

**RESULTADOS**

A continuación se presenta, en forma resumida, los resultados obtenidos para cada una de las cuatro muestras de agua en estudio, así como las características finales de cada una de ellas.

Cuadro N°7-1  
RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS PARA CADA TIPO DE AGUA EN ESTUDIO

PARAMETRO	TIPO DE MUESTRA			
	I	II	III	IV
<b>COAGULANTE: MAGNETITA</b>				
- Dosis (gr/l)	10,00	45,00	27,50	50,00
- pH	4,00	4,00	4,00	4,00
- Velocidad de mezcla rápida (rpm)	200,00	300,00	200,00	250,00
- Gradiente ( $s^{-1}$ )	500,00	925,00	500,00	700,00
- Tiempo de mezcla rápida (min)	1,00	1,00	5,00	1,00
- Tiempo de floculación magnética (min)	2,00	3,00	2,00	1,00
- Tiempo de sedimentación (min)	15,00	25,00	33,00	18,00
<b>COAGULANTE: MAGNETITA-SULFATO</b>				
- Dosis de magnetita (gr/l)	5,00	15,00	7,50	2,50
- Dosis de sulfato (mg/l)	15,00	30,00	15,00	20,00
- Concentración de sulfato (‰)	0,25	1,00	0,25	0,50
- pH	7,00	8,00	8,00	7,00
- Mezcla rápida de magnetita :				
Velocidad (rpm)	200,00	300,00	200,00	200,00
Gradiente ( $s^{-1}$ )	500,00	925,00	500,00	500,00
Tiempo (min)	1,00	1,00	1,00	1,00
- Mezcla rápida sulfato :				
Velocidad (rpm)	200,00	150,00	200,00	250,00
Gradiente ( $s^{-1}$ )	500,00	330,00	500,00	700,00
Tiempo (min)	1,00	1,50	0,50	1,00
- Floculación :				
Velocidad (rpm)	50,00	50,00	46,00	50,00
Gradiente ( $s^{-1}$ )	68,00	68,00	60,00	68,00
Tiempo (min)	20,00	20,00	30,00	22,50
- Tiempo de floculación magnética (min)	1,00	1,00	0,50	2,00
- Tiempo de sedimentación (min)	11,00	16,00	16,00	17,00
<b>COAGULANTE: SULFATO DE ALUMINIO</b>				
- Dosis (mg/l)	15,00	35,00	20,00	25,00
- Tiempo de sedimentación (min)	20,00	25,00	20,00	20,00

Cuadro N° 7-2  
 PRINCIPALES CARACTERISTICAS INICIALES DE LAS MUESTRAS ESTUDIADAS

PARAMETRO	TIPO DE MUESTRA			
	I	II	III	IV
Turbiedad (UNT)	27,50	100,00	27,50	100,00
Color (UC)	14,60	21,00	25,00	18,00
pH	7,70	8,00	7,60	7,90
Alcalinidad total (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	158,00	157,50	32,00	32,00
Dureza total (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	448,00	406,00	124,00	88,00
Pierro (mg/l)	0,13	0,16	0,16	0,02

Cuadro N°7-3  
 CARACTERISTICAS FINALES PARA CADA TIPO DE AGUA

TIPO DE TRATAMIENTO	PARAMETRO					
	TURBIEDAD (UNT)	COLOR (UC)	pH	ALCALINIDAD (ppm)	DUREZA (ppm)	PIERRO (ppm)
<u>AGUA TIPO I</u>						
- MAGNETITA	4,30	9,00	6,20	48,00	456,00	0,80
- MAGNE-SULFA	0,90	3,80	7,00	128,00	452,00	0,13
- SULFATO	0,90	4,60	7,00	126,00	448,00	0,10
<u>AGUA TIPO II</u>						
- MAGNETITA	5,40	13,00	6,20	68,00	464,00	1,20
- MAGNE-SULFA	0,39	5,00	7,30	146,00	448,00	0,10
- SULFATO	0,51	5,00	7,20	148,00	434,00	0,16
<u>AGUA TIPO III</u>						
- MAGNETITA	5,80	14,30	7,00	20,00	150,00	1,20
- MAGNE-SULFA	0,87	5,40	7,00	32,00	128,00	0,40
- SULFATO	-	9,00	6,80	24,00	122,00	0,16
<u>AGUA TIPO IV</u>						
- MAGNETITA	12,00	6,00	6,60	22,50	134,00	1,00
- MAGNE-SULFA	0,92	2,00	7,00	26,00	108,00	<0,02
- SULFATO	0,68	2,00	6,70	28,00	107,00	0,02

## 7.1 TAMAÑO DE LAS PARTICULAS DE MAGNETITA

Las diferentes literaturas existentes, indican que el tamaño efectivo de las partículas de magnetita para los diferentes procesos, se encuentra dentro del rango 1 - 10  $\mu$ , y que en promedio corresponde para 5  $\mu$ . Sin embargo, no fue posible obtener partículas dentro del rango efectivo indicado, realizándose las diferentes pruebas con partículas que presentaban un tamaño comprendido entre 38 y 45  $\mu$ , siendo la obtención de las mismas bastante rápida.

Como se verá más adelante, el mecanismo principal de coagulación en uno de los procesos en investigación, es el de adsorción, por lo que el tamaño de las partículas de magnetita es de suma importancia en este estudio.

Cuando las partículas se subdividen se produce un gran incremento del área superficial, lo que trae como consecuencia el uso de una menor dosis, ya que el área generada por todas ellas adsorberá los coloides presentes en el agua. El mismo efecto se conseguiría con partículas de diámetro mayor siempre y cuando se aumente la dosis, ya que si ello no ocurre, el área superficial generada por la misma dosis, no sería suficiente como para efectuar la adsorción de los coloides negativos presentes en el agua.

En consecuencia, la dosis de magnetita requerida depende del tamaño de las partículas del material adsorbente, cuanto más pequeña sea el tamaño de las mismas, menores dosis serán necesarias.

## 7.2 EFECTO DE LA DOSIS DE MAGNETITA

La capacidad de la magnetita para remover grandes cantidades de coloides en suspensión, fue demostrado en este estudio.

La dosis de magnetita para cada tipo de agua fue aquella que logró la mayor adsorción de partículas coloidales. Valores menores fueron insuficientes ya que el área superficial generada por todas las partículas de magnetita (carga positiva) no adsorbieron la totalidad de partículas de carga negativa que se encontraban en suspensión. Se pensó que con dosis mayores se tendría una misma eficiencia ya que el área adsorbente es mucho más de la requerida, lo que significaría que sólo se estaría usando material en exceso, pero esto no fue totalmente cierto, ya que como se apreció en cada uno de los ensayos al incrementar la dosis, el material excedente originó un incremento turbiedad.

Como se aprecia en el cuadro N° 7-4, la dosis de magnetita se incrementa cuando aumenta la turbiedad del agua, esto es, muestras que presentan turbiedades bajas requieren dosis bajas, turbiedades altas necesitan dosis mayores. Este comportamiento era lo esperado ya que el mecanismo predominante es el de adsorción, al incrementarse la turbiedad se incrementan las partículas en suspensión por lo que se requiere mayor área absorbente lo cual se logra incrementando la dosis.

Cuadro N° 7-4

DOSIS DE OPTIMA DE MAGNETITA REQUERIDA EN CADA TIPO DE AGUA  
CUANDO SE EMPLEA LA ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO MAGNETITA

PARAMETRO	MUESTRA TIPO			
	I T°=27,5 UNT C°=14,6 UC	II T°=100,0 UNT C°= 21,0 UNT	III T°=27,5 UNT C°=25,0 UC	IV T°=100,0 UNT C°= 18,0 UC
DOSIS MAGNETITA (gr/l)	10,0	45,0	27,5	50,0
TURBIEDAD (% Remoción)	84,4	94,6	78,9	88,0
COLORE (% Remoción)	38,4	38,1	42,8	66,7

T° : Turbiedad inicial

C° : Color inicial

### 7.3 INFLUENCIA DEL PH

Es conocido que el valor del pH juega un papel importante en la desestabilización de las partículas y que este, depende de las características del agua que se utilice y de los reactivos que se empleen.

En los diversos ensayos que se hicieron cuando se utilizó sólo magnetita para la remoción de la turbiedad, se demostró que efectivamente esta alternativa de tratamiento trabaja eficientemente en rangos de pH ácidos ( $\text{pH} < 7$ ), lo cual indica una vez más, que la coagulación predominante en la remoción de dichas partículas es de adsorción superficial.

Para cada uno de los ensayos en donde se hizo variar el valor del pH desde 4 hasta 9, se comprobó que cuanto más ácida es el agua, mejores son los resultados, siempre y cuando se mantengan constantes las otras variables (dosis, gradientes, etc.).

Así mismo, se observó que la dosis de magnetita se incrementa al elevarse el valor del pH. Para una misma turbiedad la dosis varió de 5 gr/l a 10 gr/l cuando el valor del pH cambió de 3 a 6, respectivamente.

Para la alternativa magnetita-sulfato los mejores resultados se mostraron cuando las muestras presentaron valores de pH ligeramente alcalinos ( $\text{pH} = 7-8$ ).

Otro de los logros de estos ensayos fue el de demostrar que la magnetita es un mineral que actúa en el agua como una solución amortiguadora, este efecto se aprecia en los cuadros N° 7-5 y 7-6, muestras con pH ácidos ( $\text{pH} < 7$ ), al final del tratamiento experimentaron un ligero incremento en su pH (tendieron al neutro), el cual es más



**Cuadro N° 7-5**  
**pH FINALES PARA CADA TIPO DE MUESTRA CUANDO SE EMPLEA LA ALTERNATIVA**  
**MAGNETITA**

pH INICIAL	pH FINAL			
	TIPO I	TIPO II	TIPO III	TIPO IV
4	5,3	5,2	5,7	6,6
5	5,4	5,4	6,0	6,5
6	6,2	6,1	6,4	6,9
7	-	6,8	7,0	7,7
8	-	7,6	7,5	8,0
9	8,1	8,1	8,4	8,6

**Cuadro N° 7-6**  
**pH FINALES PARA CADA TIPO DE MUESTRA CUANDO SE EMPLEA LA ALTERNATIVA**  
**MAGNETITA-COAGULANTE**

pH INICIAL	pH FINAL			
	TIPO I	TIPO II	TIPO III	TIPO IV
4	5,2	5,1	5,8	4,9
5	5,6	5,3	5,8	5,0
6	6,3	6,0	6,1	5,5
7	7,1	6,7	6,6	6,4
8	7,8	7,2	6,9	6,9
9	8,3	7,3	7,6	7,1

marcado en muestras más ácidas. Muestras con valores de pH mayores a 7 sufrieron por el contrario al final del tratamiento una disminución de dicho valor (con tendencia también al neutro).

Este aumento o disminución del valor del pH al final del tratamiento, está relacionado con la dosis de magnetita que se emplee. Para las mismas características, dosis mayores provocaron incrementos mayores en rango ácido y descensos menores en rango básico. Por el contrario dosis bajas de magnetita ocasionaron incrementos menores de pH, en rango ácido y descensos mayores en rango básico.

#### 7.4 INFLUENCIA DE LA GRADIENTE DE VELOCIDAD

En la alternativa magnetita sola, la energía que se requiere para la distribución homogénea de la magnetita en toda la masa del agua depende básicamente de la turbiedad que presente el agua.

En las muestras que presentaron turbiedades bajas (27,5 UNT) el gradiente de velocidad que logró la mayor remoción correspondió para  $500 \text{ s}^{-1}$  (200 rpm), valores menores a  $184 \text{ s}^{-1}$  (100 rpm) provocaron sedimentabilidad del material adsorbente.

Las muestras con elevada turbiedad (100 UNT) requirieron gradientes óptimas de mezcla de  $700$  y  $925 \text{ s}^{-1}$  (250 y 300 rpm respectivamente). Este incremento de gradiente de velocidad, cuando la turbiedad del agua aumenta, se debe básicamente al aumento de la dosis, turbiedades mayores requieren dosis más elevadas por lo que es necesario que se le confiera al agua mayor energía a fin de poder distribuir homogéneamente el material en toda la masa del agua.

Durante los experimentos en los cuales se empleó la alternativa magnetita-coagulante, se comprobó que la agitación inicial debe

efectuarse rápidamente en el momento de agregar la magnetita y/o el coagulante, y para poder eliminar la turbiedad se requiere de una agitación lenta y regular durante la floculación.

Así la agitación del agua en esta alternativa tiene dos propósitos diferentes:

- Homogenización del coagulante y/o magnetita en el agua que se va a tratar y,
- Formación de flóculos.

La dosis de magnetita que se requiere cuando se emplea esta alternativa de tratamiento, es bastante baja, en comparación a la alternativa magnetita sola, por lo que en general gradientes de velocidades de  $500 \text{ s}^{-1}$  (200 rpm) no provocan sedimentabilidad del material y proporcionan los mejores resultados. Así mismo, para la homogenización del coagulante se requiere en promedio un gradiente también de  $500 \text{ s}^{-1}$  (200 rpm).

En la etapa de formación de los flóculos fue necesario distribuir uniformemente el gradiente de velocidad en todo el volumen del agua, lo cual se consiguió con movimientos regulares lentos, para que los microflóculos se aglomeren en macroflóculos y produzcan un copo de asentamiento rápido. Así, en esta etapa se estudio la floculación para cada tipo de agua, con G variando entre 40 y  $80 \text{ s}^{-1}$  y T entre 5 y 30 min.

Como se puede observar en las figuras N° 7-25, 7-43, 7-61 y 7-79 el gradiente óptimo de velocidad (G) para cada período de floculación (T) estudiado, se obtiene en función de la turbiedad residual mínima. Los valores de G se grafican en función de los períodos de floculación respectivos, como se muestra en las figuras N° 7-26, 7-44, 7-62 y 7-80.

En general, el gradiente de velocidad promedio de agitación que presentó los mejores resultados, durante esta fase, para cada tipo de agua, fue de  $68 \text{ s}^{-1}$  (50 rpm).

## 7.5 TIEMPO DE CONTACTO

En los diferentes ensayos cuando se utilizó sólo magnetita, la adsorción de los coloides en la superficie de este mineral fue bastante rápida, esto era lo esperado desde que las fuerzas electrostáticas son más importantes en los procesos de adsorción.

La adsorción de las partículas de turbiedad y color en la superficie de la magnetita se consiguieron con etapas de contacto que variaron de 1 a 5 minutos, por lo general se requirieron tiempos de un minuto.

Cuando se empleó la alternativa magnetita-coagulante, como se dijo anteriormente, las muestras fueron sometidas a dos tipos de movimientos, el primero de ellos consistió en un movimiento rápido y por lo general este, tuvo una duración de un minuto (tanto para la magnetita como para el coagulante), el último fue un movimiento lento y tuvo una duración mayor, durante este tiempo se permitió que el proceso de aglutinación de las partículas tengan oportunidad de completarse hasta producir un floc que pueda sedimentar en el menor tiempo posible dejando una turbiedad remanente mínima. A este tiempo adicional se le suele llamar tiempo de floculación, y para este estudio las diferentes muestras presentaron un tiempo de floculación que fluctuó entre 20 y 30 minutos. Las muestras que presentaron valores de alcalinidad altos mostraron tiempos de 20 minutos, mientras que las muestras con valores menores, presentaron tiempos ligeramente mayores 22,5 y 30 minutos.

## 7.6 SEDIMENTACION

Los diferentes ensayos de sedimentación realizados cuando se empleó la alternativa magnetita han determinado que esta tecnología no logra una buena clarificación (turbiedad residual entre 4 y 12 UNT) en comparación a la otra alternativa.

Además, se pudo demostrar que tanto la alcalinidad como la dureza presentes juegan un papel importante, siendo la eficiencia de sedimentación mucho mejor al tratar aguas con alto contenido de ellas.

Para las muestras tipo I y III se presenta en la figura N° 7-1, las curvas de eficiencia de sedimentabilidad en función de la velocidad de sedimentación. Se aprecia que la muestra tipo I con valores de alcalinidad y dureza elevados, ofrece mejores resultados. Caso similar se observa en la figura N° 7-2, en donde la muestra tipo II presenta, para cualquier valor de velocidad de sedimentación, remanentes de turbiedad muy por debajo de los que señala la muestra tipo IV.

En la segunda fase para todas las muestras en estudio, cuando se empleó magnetita como auxiliar, fue posible la obtención, en forma rápida, de un sobrenadante con turbiedad mucho más baja que la obtenida cuando se utilizó solamente sulfato de aluminio. Además, en las muestras que presentaron valores de alcalinidad y dureza relativamente bajos, muestras tipo II y IV, se pudo reducir sensiblemente el valor de la dosis óptima del sulfato de aluminio en 14,3 y 20 % respectivamente, de modo que aparte de mejorar la calidad del agua en un tiempo menor, se produjo una gran reducción en los gastos totales del sulfato de aluminio empleado.

En promedio, la eficiencia remocional durante los primeros 20 y 25 minutos de sedimentación, resulta ser mucho mejor para la combina-

Figura N 7-1

COMPARACION DE LAS CURVAS DE SEDIMENTABILIDAD PARA LAS MUESTRAS TIPO I Y III CUANDO SE UTILIZA EL PROCESO MAGNETITA

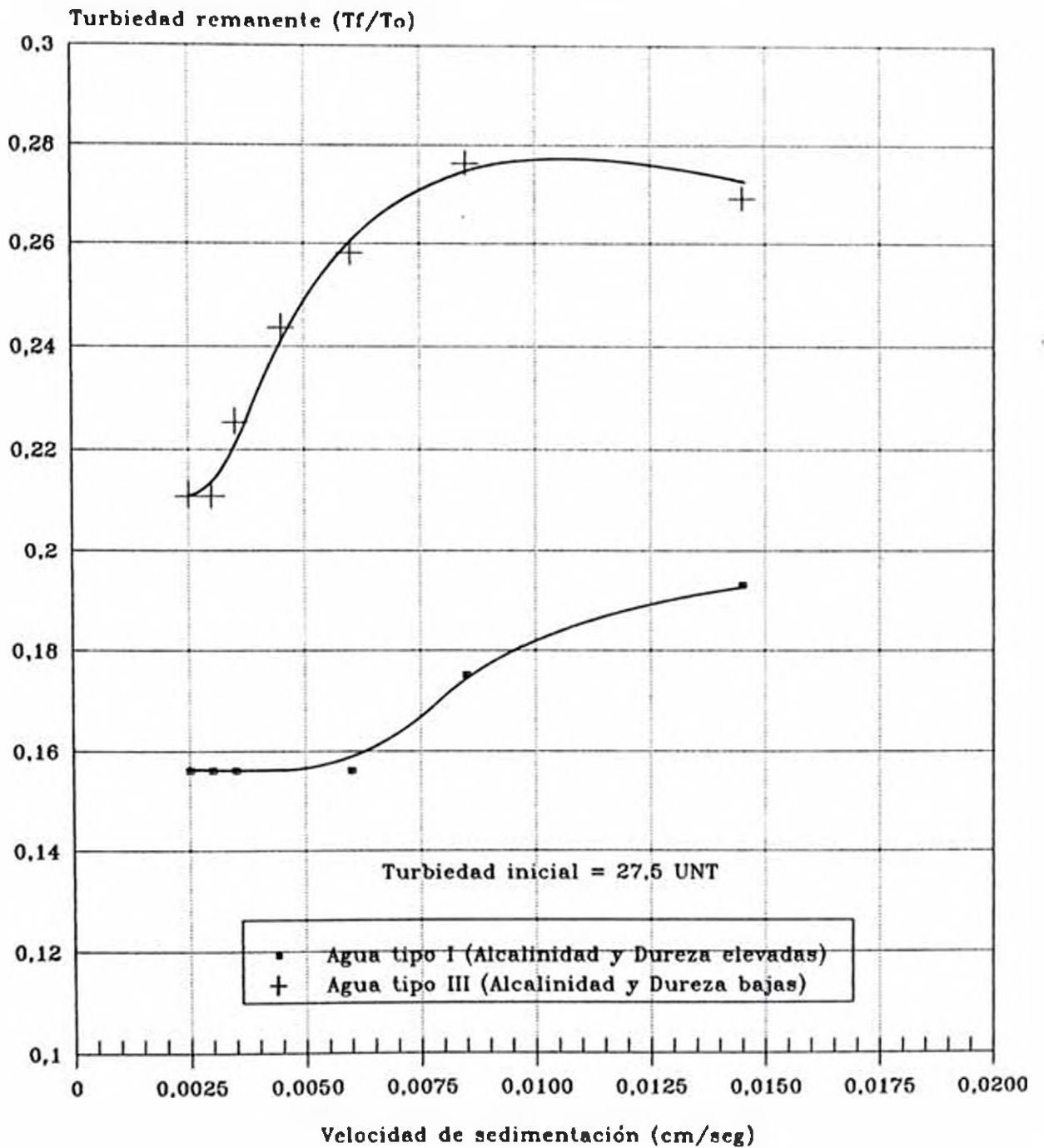


Figura N 7-2

COMPARACION DE LAS CURVAS DE SEDIMENTABILIDAD PARA LAS MUESTRAS TIPO II Y IV CUANDO SE UTILIZA EL PROCESO MAGNETITA

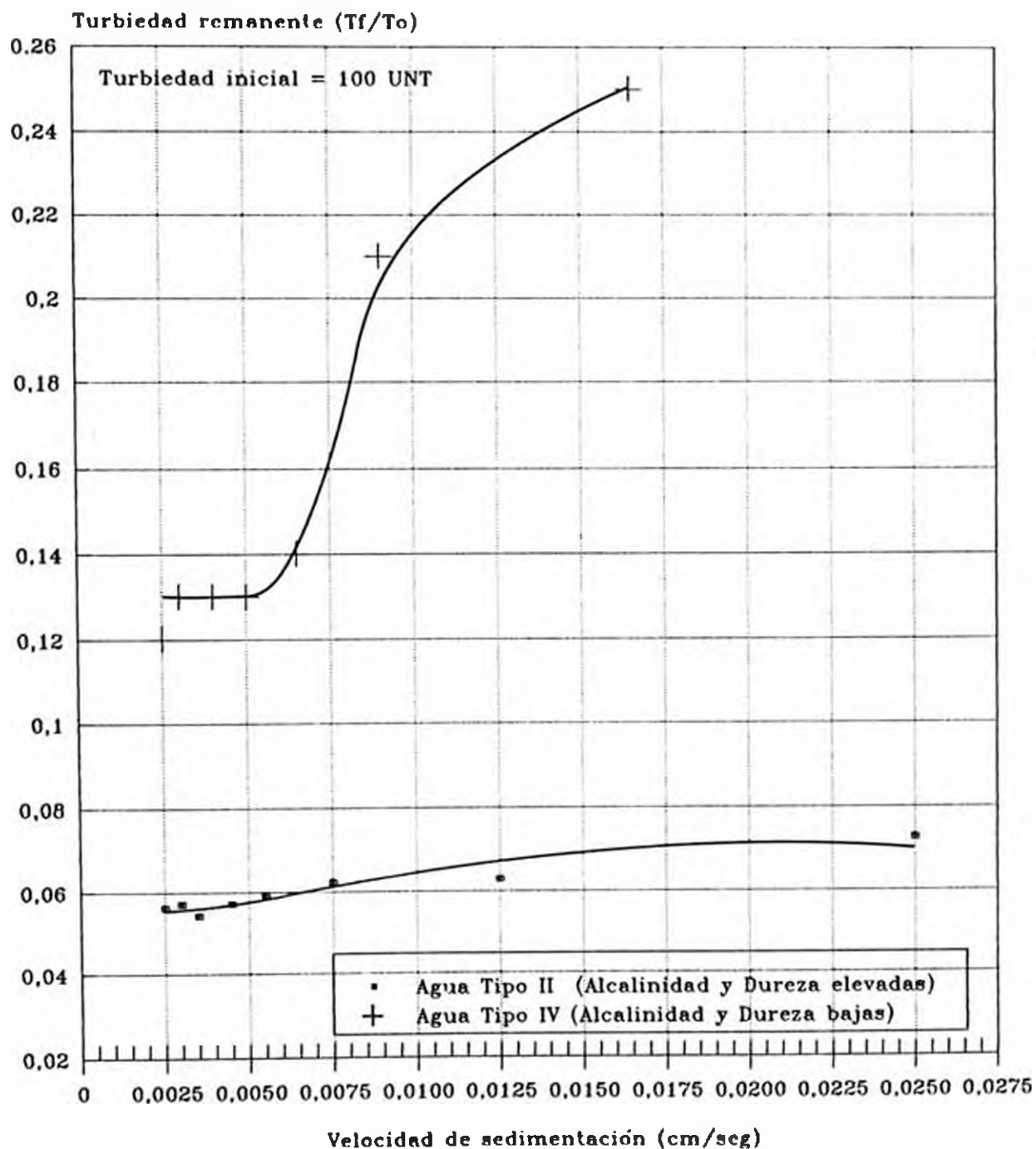


Figura N 7-3

VELOCIDAD DE SEDIMENTACION vs TURBIEDAD REMANENTE  
MUESTRA TIPO I

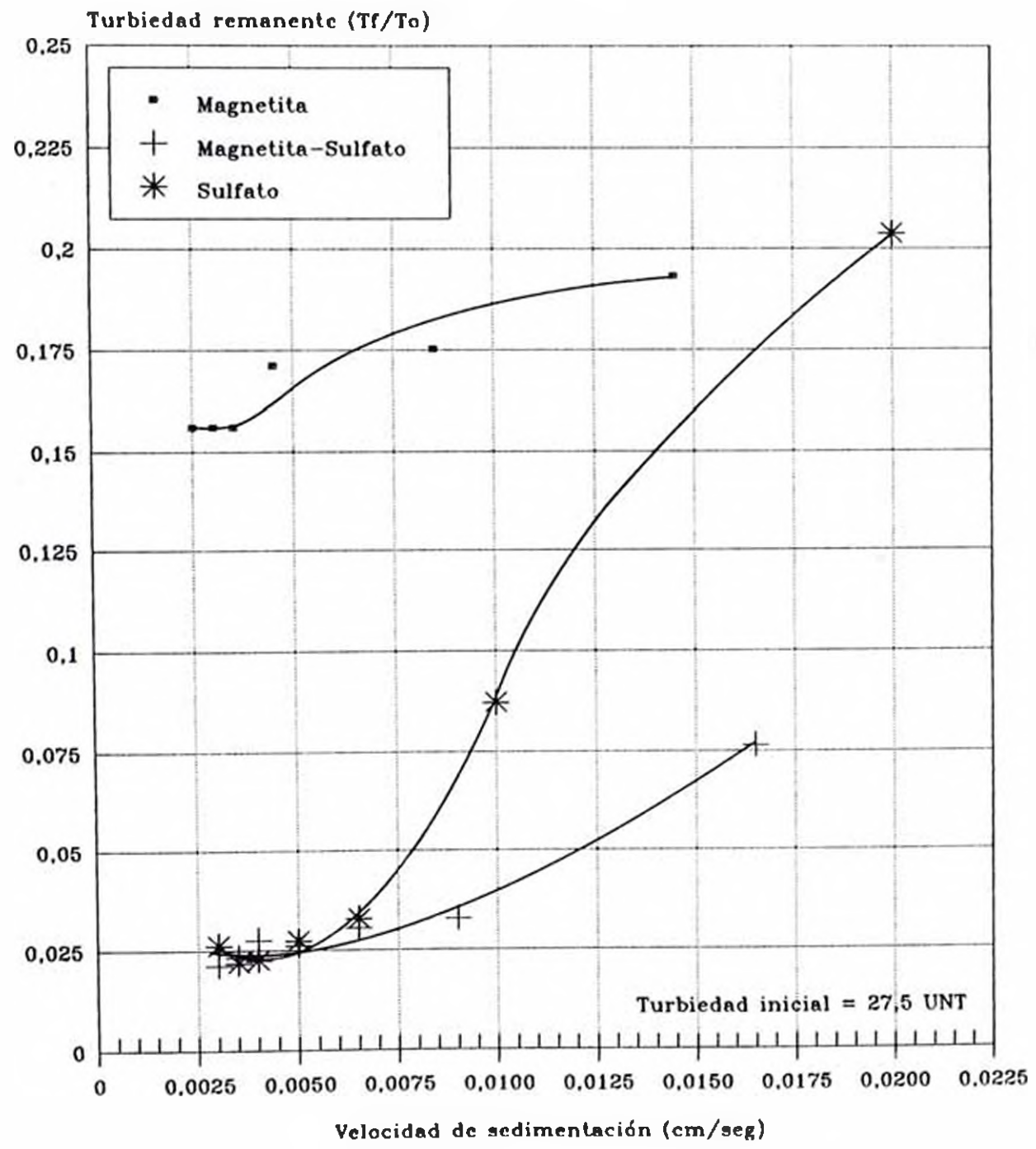




Figura N 7-4

VELOCIDAD DE SEDIMENTACION vs TURBIEDAD REMANENTE  
MUESTRA TIPO II

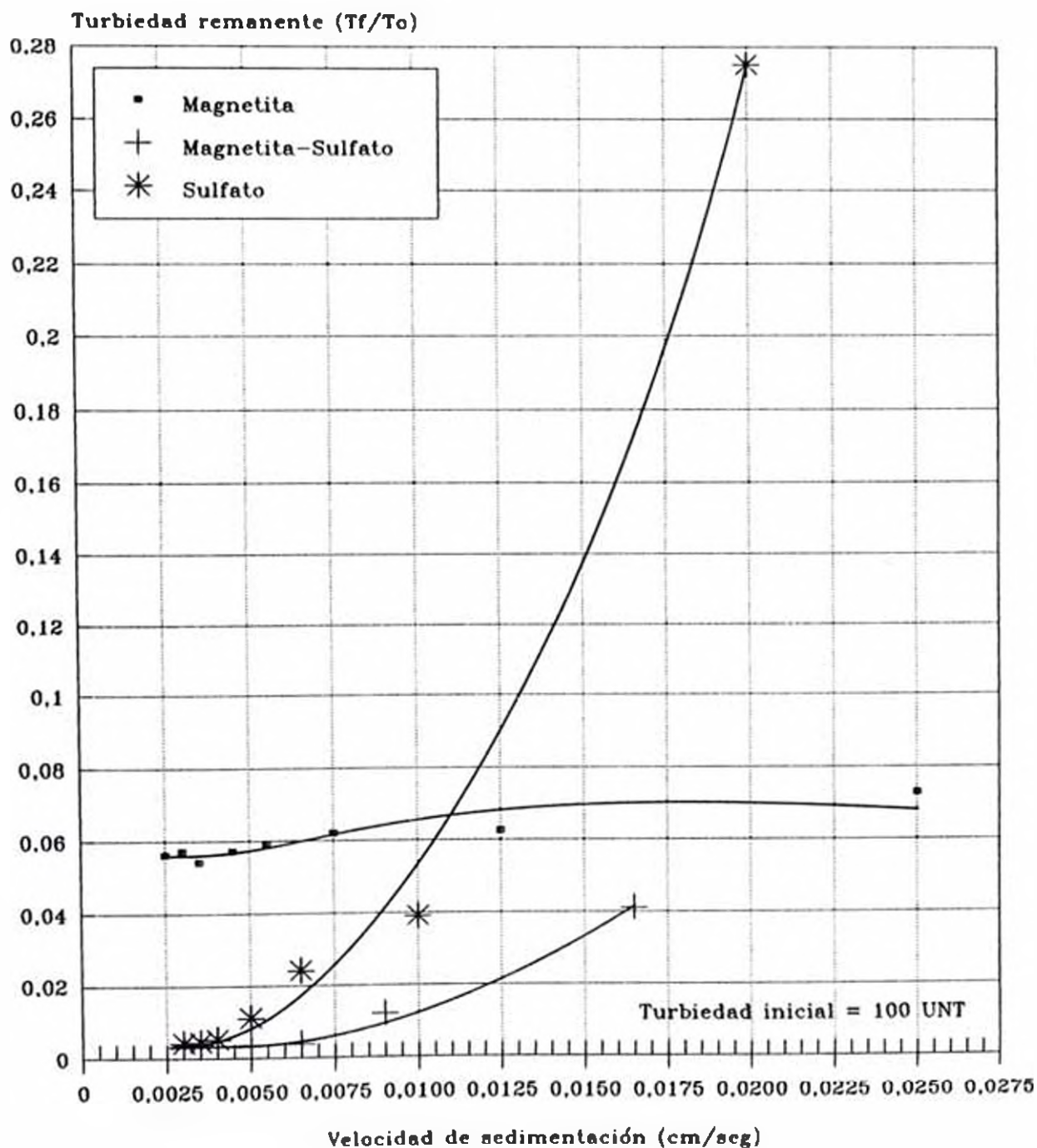


Figura N 7-6

VELOCIDAD DE SEDIMENTACION vs TURBIEDAD REMANENTE  
MUESTRA TIPO III

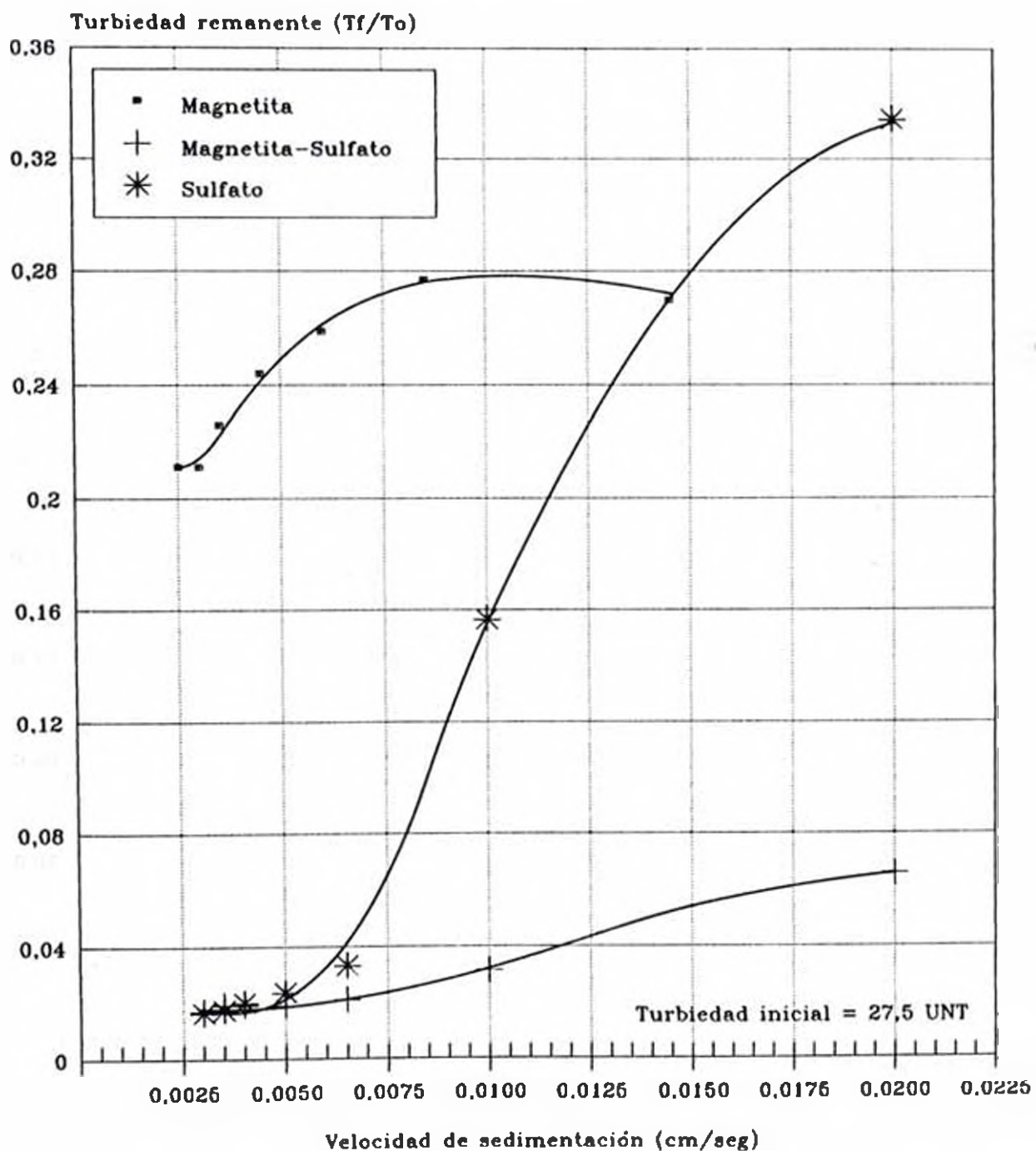
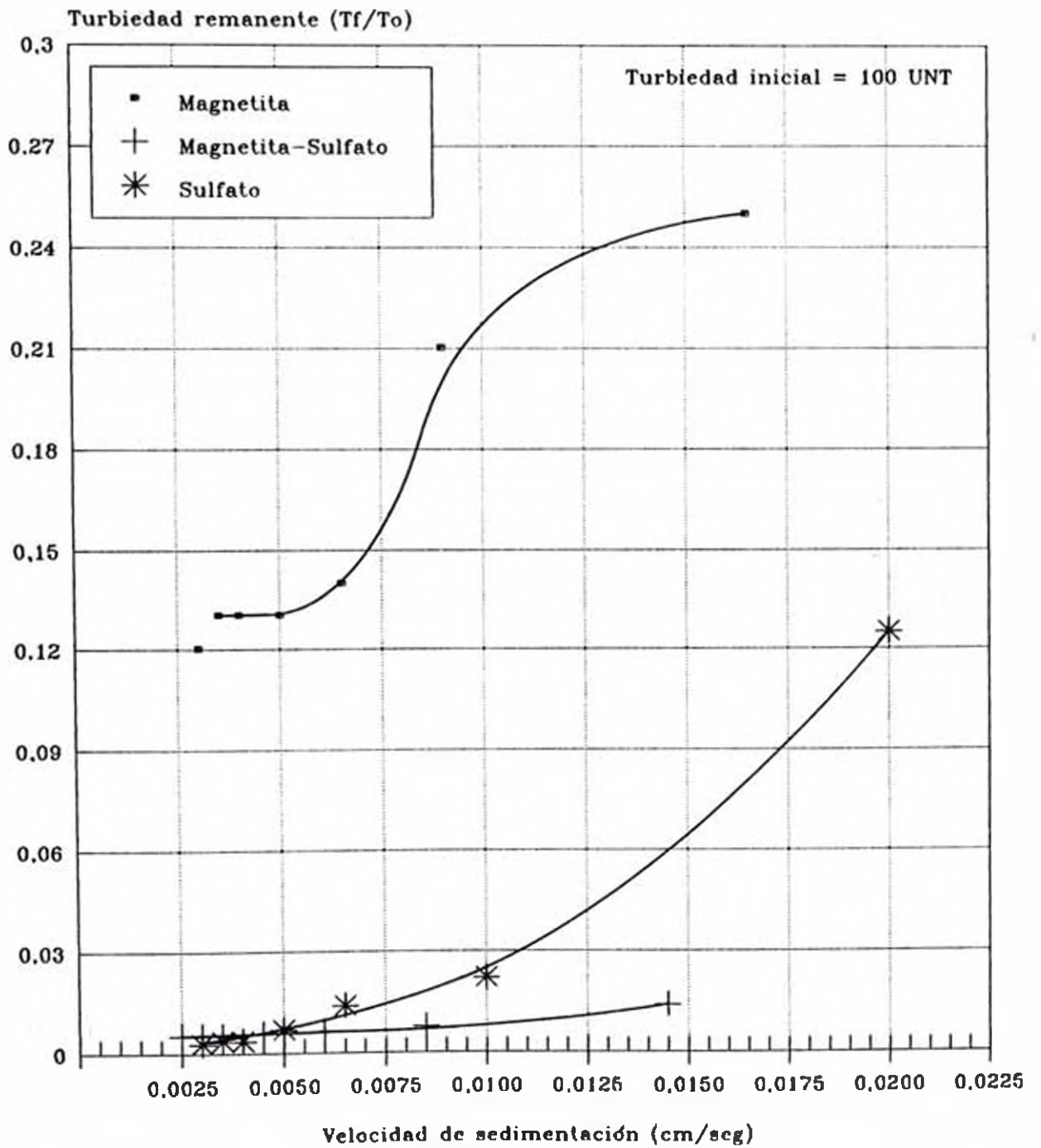


Figura N 7-6

VELOCIDAD DE SEDIMENTACION vs TURBIEDAD REMANENTE  
MUESTRA TIPO IV



ción magnetita-sulfato que para el caso en donde se emplea solo sulfato de aluminio. Transcurrido este tiempo, las eficiencias alcanzadas por ambos tratamientos resultan ser muy similares.

Las figuras N° 7-3, 7-4, 7-5 y 7-6 muestran las curvas de sedimentación correspondientes a cada una de las muestras estudiadas, los resultados presentados en estas figuras no exigen mayor discusión, pues demuestran de manera evidente que la mayor velocidad de sedimentación se obtiene para el proceso magnetita-coagulante, lo cual indica que la utilización conjunta de sulfato de aluminio y magnetita produce flóculos más densos y pesados.

#### 7.7 INFLUENCIA DEL CAMPO MAGNETICO EN LA SEDIMENTACION

La magnetita es un material ferromagnético por lo que presenta una característica muy especial, como la de quedarse polarizada una vez que ha sido sometida a la acción de un campo magnético.

Cada partícula de hierro presenta regiones llamadas dominios, los cuales son de tamaño microscópico. Cuando las partículas no han sido expuestas a la acción de un campo magnético los sentidos de los campos magnéticos de los dominios se encuentran distribuidos al azar. La aplicación de un campo a las partículas, hace que estas cambien su orientación, resultando un alineamiento parcial en la dirección del campo o un alineamiento total cuando el campo es lo suficientemente intenso, quedando así imantada.

De esta manera, cada diminuta partícula de hierro se transforma en un imán permanente, teniendo su propio polo norte y sur, lo cual permite el aglutinamiento con otras partículas, adquiriendo por lo tanto un peso mayor y como consecuencia de ello, una sedimentación más rápida.

Los diferentes ensayos realizados han demostrado que la sedimentación se ve influenciada por la acción de un campo magnético cuando se emplea la alternativa magnetita, esto debido a la gran cantidad de partículas de hierro suspendidas en el agua. Cuando se emplea la alternativa magnetita-coagulante la influencia del campo en la sedimentación es casi despreciable por encontrarse en suspensión un mínimo de ellas cuando se aplica dicho campo.

Con la finalidad de demostrar la eficiencia provocada por la acción del campo magnético se realizaron dos pruebas con características similares con la única diferencia de ser sometidas ambas, a campos diferentes. La mayor eficiencia remocional fue presentada por aquella muestra que fue expuesta a la acción del campo provocada por el imán artificial (electroiman) siendo esta de 85 gauss<sup>2</sup>. Mientras que la muestra que fue sometida a la acción del imán natural, 5 gauss<sup>2</sup> de intensidad, mostró una remoción menor en comparación a la anterior (Ver figura N° 7-7).

La diferencia de resultados en ambas pruebas no sólo radica en la intensidad del campo aplicado, sino también en la distribución de dicho campo. Lamentablemente no fue posible obtener dos imanes con la misma forma, por lo que el primero que fue fabricado exclusivamente para estas pruebas, tal como se aprecia en la figura N° 7-8, presentó la forma de un vaso de dos litros, con líneas de flujo paralelas al eje del mismo en toda la longitud. El imán natural, en cambio tenía la forma de un paralelepípedo con dimensiones de 13,5 \* 14 \* 4 cms (ver figura N° 7-9), el cual fue ubicado en la base del vaso, por lo que las líneas de flujo eran perpendiculares el eje de este, con influencia muy cerca a la base y casi imperceptible en la superficie del agua.

<sup>2</sup> Intensidad magnética que corresponde al centroide de gravedad de un vaso de dos litros.

Figura N 7-7  
**INFLUENCIA DEL CAMPO MAGNETICO  
 EN LA SEDIMENTACION**

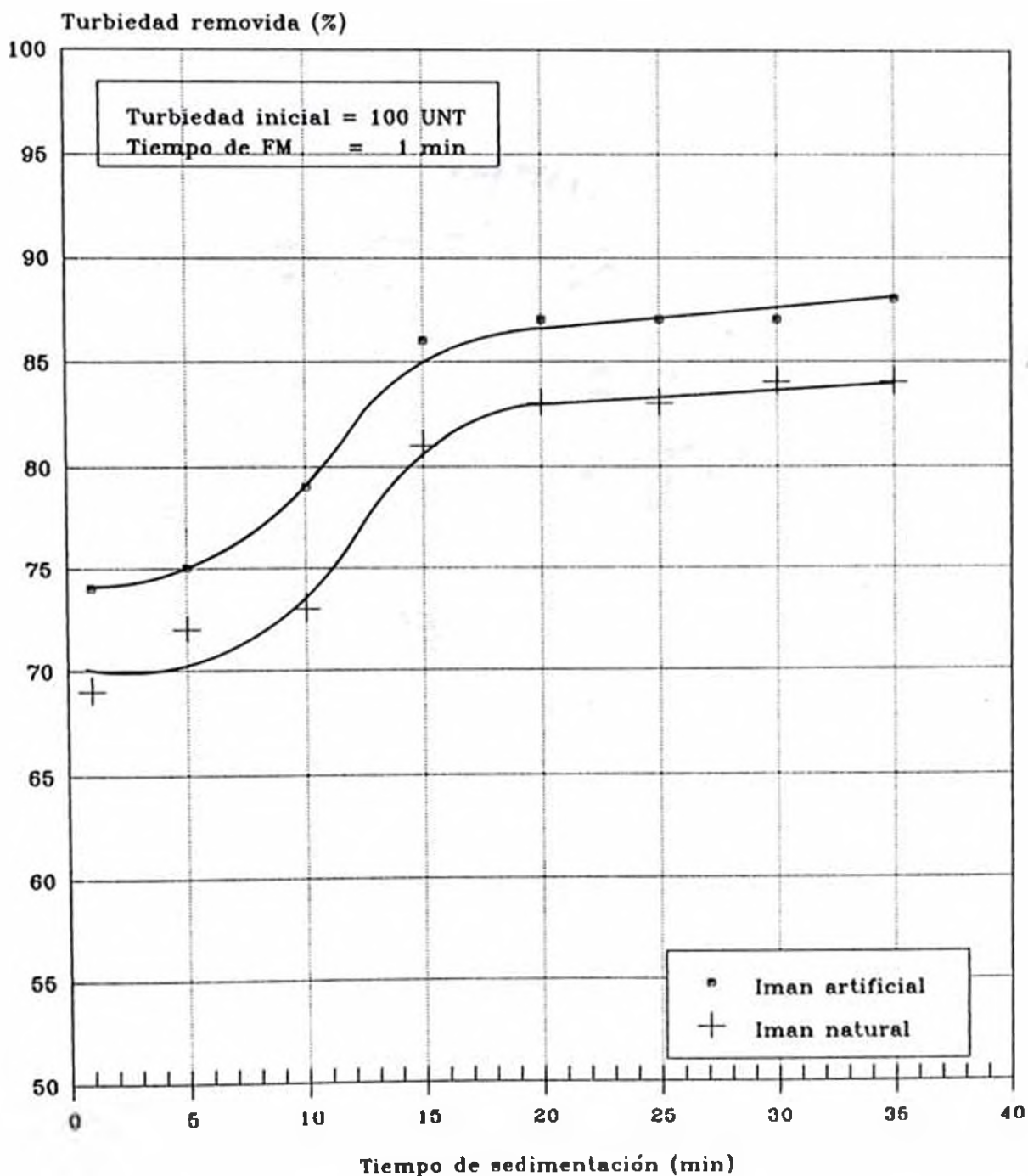




Figura N° 7-8: IMAN ARTIFICIAL (SOLENOIDES)



Figura N° 7-9: IMAN NATURAL.

De lo obtenido líneas arriba, se deduce que la sedimentación cuando se emplea la alternativa magnetita sola, se ve influenciada favorablemente cuando ésta se somete a la aplicación de un campo magnético. Y que dicha influencia depende directamente de la intensidad aplicada, es decir, a mayor intensidad mayor efecto remocional. Asimismo, se comprobó que la distribución homogénea de las líneas de flujo también son de suma importancia en la remoción de dichas partículas.



## 7.8 INFLUENCIA DE LA ALCALINIDAD

El grado de alcalinidad que presenta el agua, juega un rol importante en la desestabilización de los coloides de turbiedad. Para las alternativas en estudio, se comprobó que una alta alcalinidad en muestras con poca concentración de coloides son necesarias dosis menores de magnetita, así como tiempos de floculación y sedimentación también menores. Este efecto se puede apreciar en la figura N° 7-10, en donde los mejores resultados se obtuvieron para aquella muestra que presentó alcalinidad alta.

Cuando el agua cruda presentó una turbiedad elevada, los mejores resultados se obtuvieron en muestras con bajo contenido de alcalinidad (requirieron menores dosis).

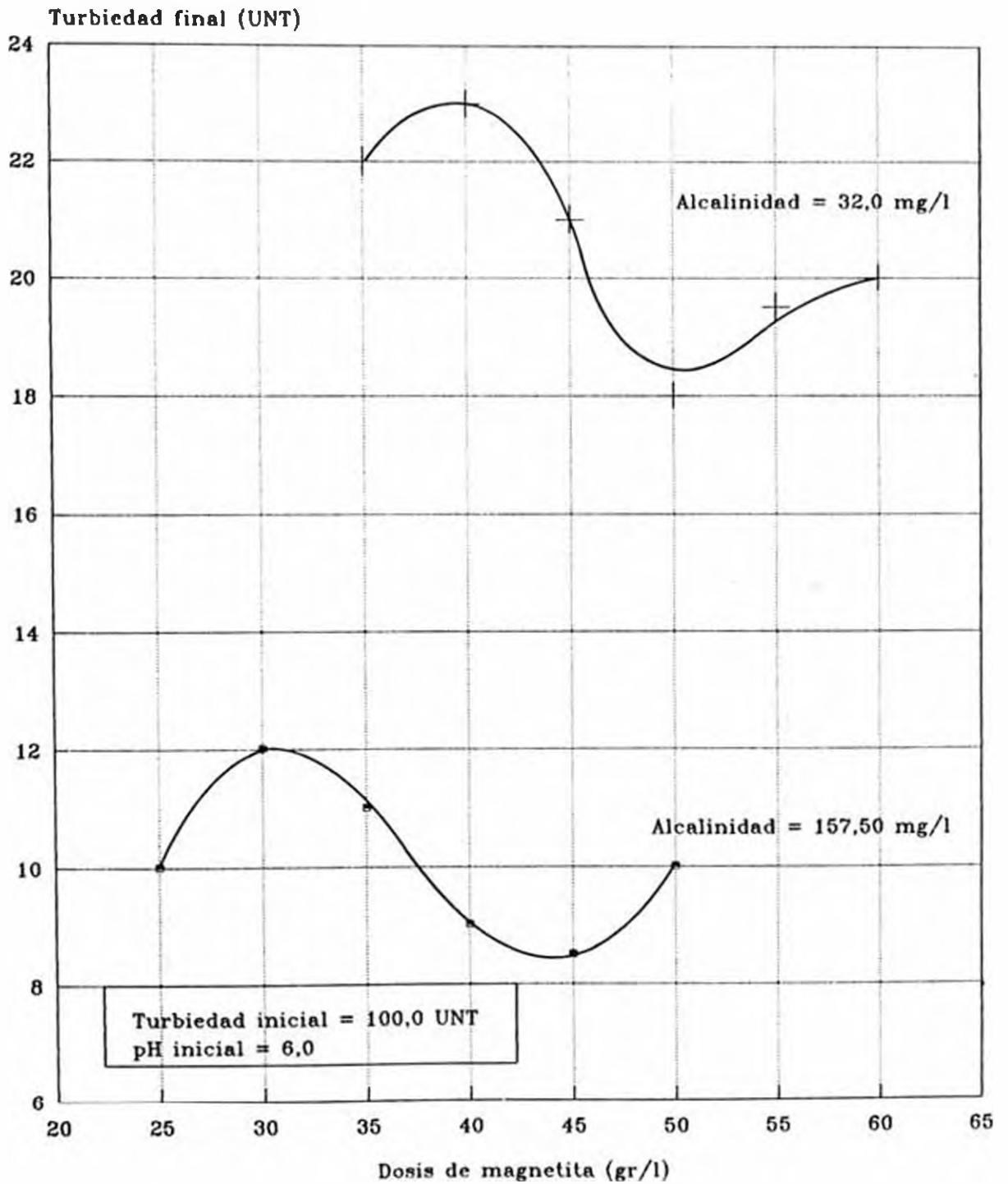
Así mismo, se pudo apreciar en los cuatro tipos de agua en estudio, tal como se observa en el cuadro N° 7-7, que el mayor consumo de alcalinidad lo realizó la alternativa magnetita, mientras que las alcalinidades finales obtenidas para las otras alternativas presentaron valores similares.

Cuadro N° 7-7

% DE ALCALINIDAD CONSUMIDA EN CADA UNO DE LOS TIPOS DE AGUA Y TRATAMIENTOS ESTUDIADOS

TRATAMIENTO	CONSUMO DE ALCALINIDAD (%)			
	AGUA TIPO I (A°=158,0 ppm)	AGUA TIPO II (A°=157,5 ppm)	AGUA TIPO III (A°=32,0 ppm)	AGUA TIPO IV (A°=32,0 ppm)
Magnetita	69,6	56,8	37,5	29,7
Magnetita-Sulfato	19,0	7,3	0,0	18,8
Sulfato	20,3	6,0	25,0	12,5

Figura N 7-10  
 INFLUENCIA DE LA ALCALINIDAD DEL AGUA



## 7.9 RANGO DE TURBIEDAD

### 7.9.1 TRATAMIENTO MAGNETITA

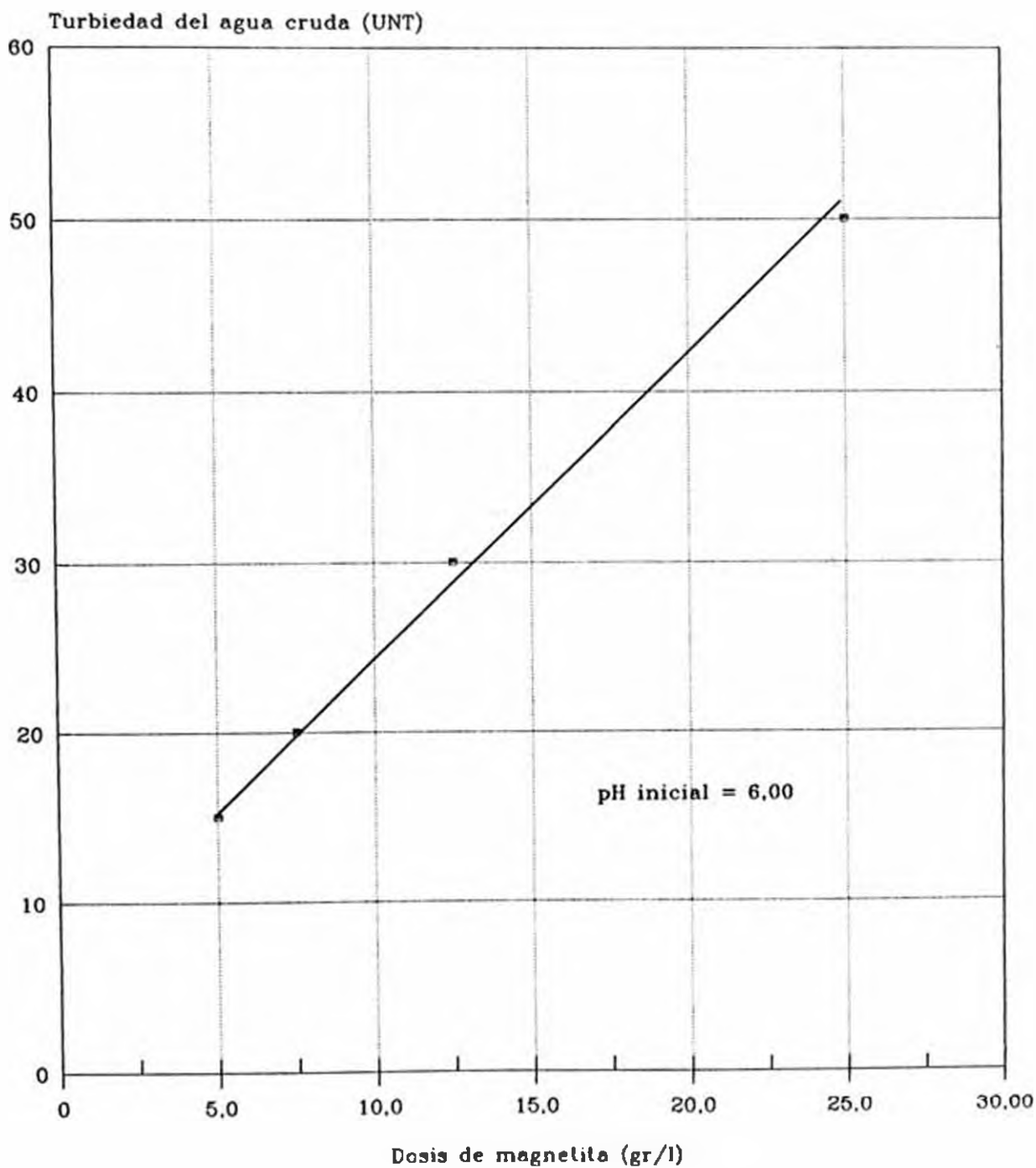
La gran cantidad del material de hierro requerido en las diferentes pruebas cuando la turbiedad era elevada, hizo suponer desde un inicio, que la dosis de dicho material se incrementaba al aumentar la turbiedad, por lo que económicamente esta alternativa de tratamiento era factible para muestras que presentaban turbiedades bajas.

Con la finalidad de determinar el rango de acción de dicho tratamiento, se efectuaron una serie de pruebas para turbiedades menores o iguales a 50 UNT. Los diferentes ensayos realizados permitieron establecer que la dosis del material adsorbente se incrementa a medida que aumenta la turbiedad, tal como se aprecia en la figura N° 7-11.

Esto era lo que se esperaba, ya que el mecanismo de acción predominante en esta alternativa es la adsorción, siendo por lo tanto un fenómeno netamente de superficie. Así la alta capacidad de adsorción dependerá entre otros factores, del área superficial generada por todas las partículas de magnetita. Una baja concentración de coloides requerirá menor superficie de adsorción, lo cual se consigue con una dosis menor de magnetita, una alta concentración de coloides necesitará por lo tanto mayor área adsorbente lo cual trae como consecuencia el uso de una dosis mayor.

La gran cantidad del material requerido al aumentar la turbiedad, hace de esta alternativa un tratamiento recomendable para aguas que presentan turbiedades menores o iguales a 30 UNT.

Figura N 7-11  
DOSIS DE MAGNETITA vs TURBIEDAD  
CUANDO SE EMPLEA EL PROCESO MAGNETITA



valores mayores no son aconsejables desde ningún punto de vista.

### 7.9.2 TRATAMIENTO MAGNETITA-COAGULANTE

Los ensayos realizados han permitido establecer que esta alternativa de tratamiento es eficiente para cualquier rango de turbiedad, sin embargo la reducción de la dosis aproximadamente en un 20% en muestras que presentaron turbiedades iniciales altas (100 UNT) hace de esta alternativa un tratamiento recomendable para muestras con turbiedades mayores o iguales a 100 UNT.

### 7.10 RECUPERACION Y REGENERACION DE LA MAGNETITA

Las bibliografías existentes indican que la limpieza de la magnetita para su reutilización ocurre a valores de pH altos (12). Con la finalidad de demostrar esto se realizaron pruebas preliminares (cualitativas) en donde se demostraron que efectivamente la desadsorción de los coloides se efectúa en un medio alcalino, por lo que las pruebas definitivas (cuantitativas) se realizaron para un pH igual a 11,5.

#### 7.10.1 PREPARACION DEL AGUA DE LAVADO

Volumen de agua : 20,0 litros

Volumen de NaOH 1N : 120,0 ml

pH muestra : 11,5

Calculo del peso (W) de hidróxido utilizado:

$$N = N^{\circ} \text{ equi-gr}_{\text{soluto}} / V_{\text{solución}}$$

$$N = (W/PM * \theta) / V$$

Entonces:

$$W = N * PM * V / \theta$$

$$W = 1 * 40 * 0,120 / 1$$

$$W = 4,80 \text{ gr}$$

### 7.10.2 LAVADO DE LA MAGNETITA

Con la finalidad de determinar los requerimientos del lavado se procedió a efectuar dos estudios diferentes, uno en donde la magnetita cargada procedía de la alternativa magnetita sola y el otro de la alternativa magnetita-sulfato.

La limpieza de la magnetita, para ambas alternativas, continuó hasta observarse que el efluente líquido obtenido después de cada lavado con soda cáustica, presentaba una turbiedad mínima, es decir, de 10 UNT aproximadamente (turbiedad originada por las mismas partículas de magnetita, debido al poco tiempo de sedimentación, el cual fue de 2 minutos).

Los requerimientos para ambos estudios fueron similares, por lo que se puede decir que no existe diferencia en lo que a lavado y regeneración se refiere.

Acontinuación se presentan los requerimientos tanto del agua de la red pública, como del agua alcalina:

#### 7.10.2.1 Magnetita

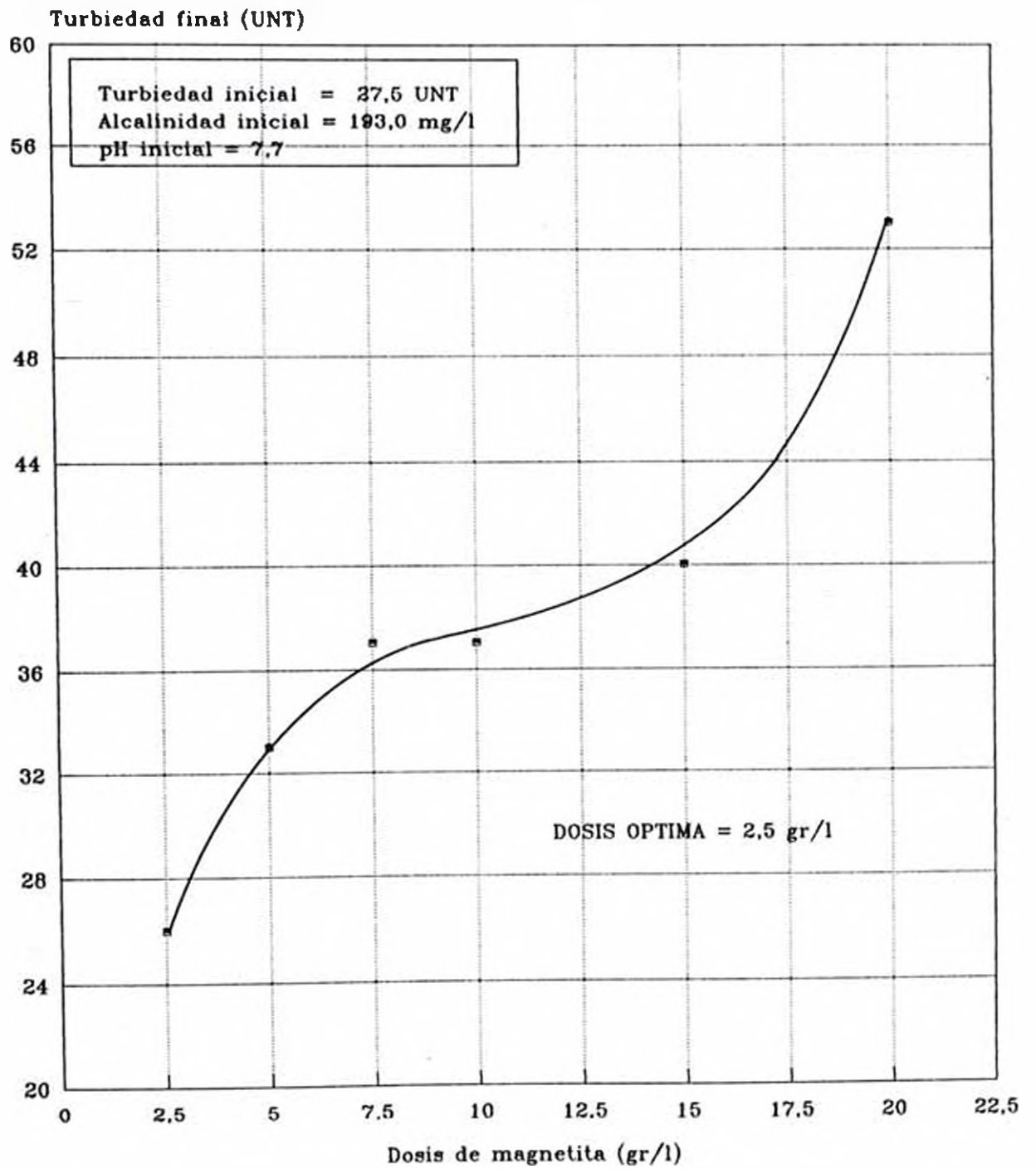
Peso magnetita cargada	:	242,5 gr
Volumen de agua alcalina	:	5,8 lt
Volumen de agua de la red pública	:	6,8 lt

#### 7.10.2.2 Magnetita - Sulfato de Aluminio

Peso magnetita cargada : 215,0 gr  
Volumen de agua alcalina : 5,2 lt  
Volumen de agua de la red  
pública : 5,6 lt

La calidad del agua alcalina obtenida en los últimos lavados, plantea la posibilidad de reutilización de esta, a fin de minimizar los costos químicos que demanda la limpieza.

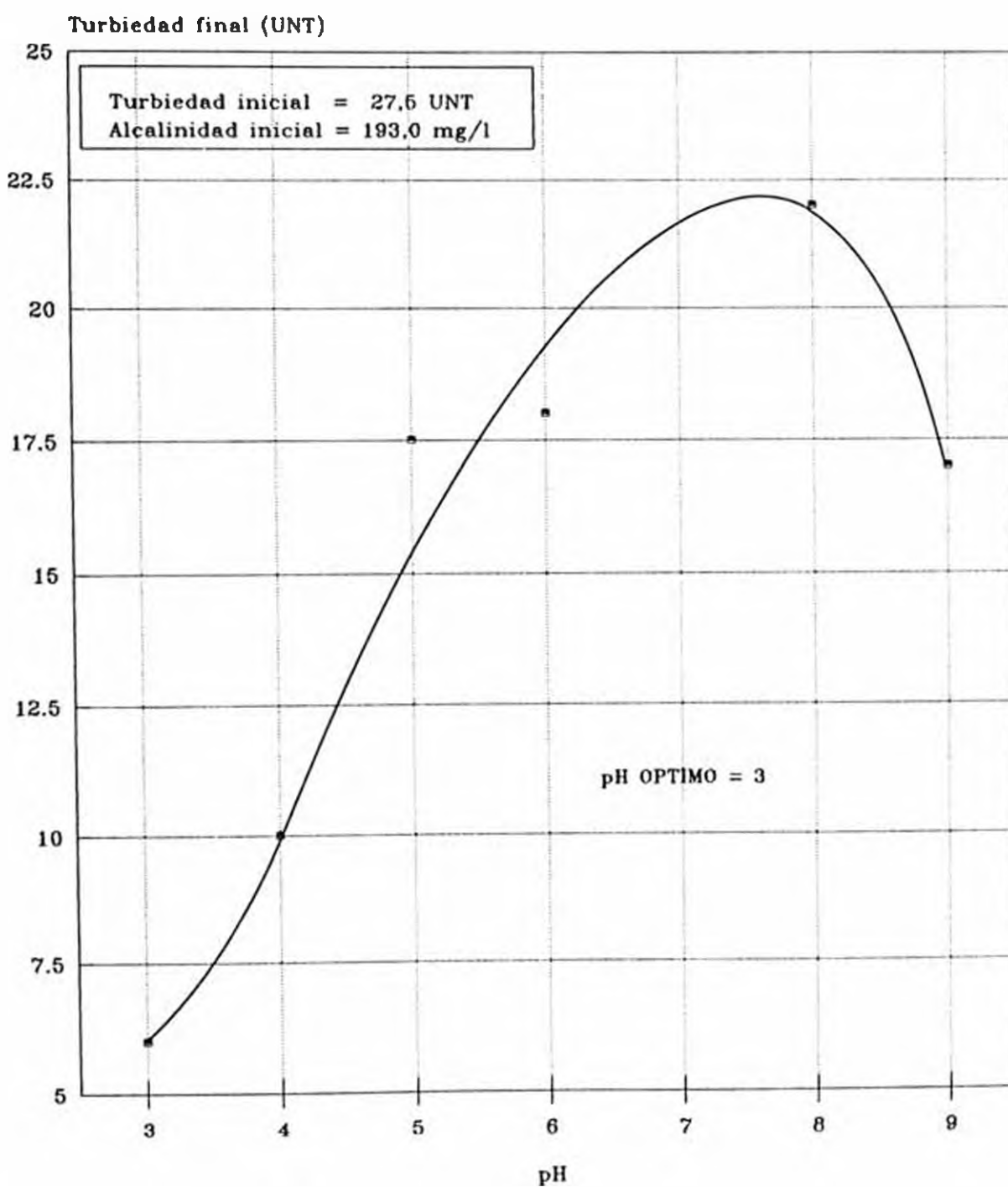
Figura N 7-12  
**DOSIS OPTIMA DE MAGNETITA**



Agua tipo: I  
 Proceso Magnetita

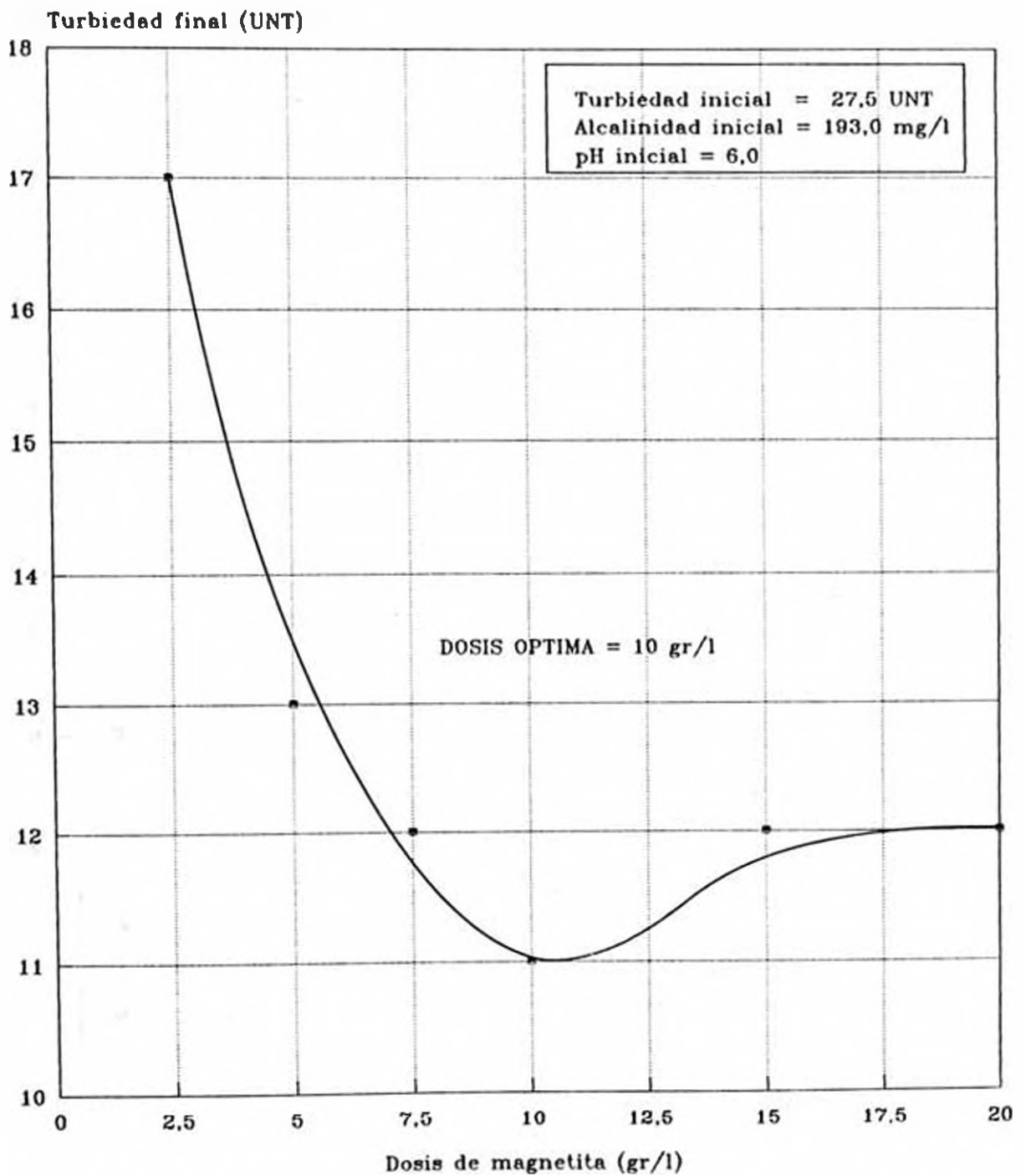


Figura N 7-13  
pH OPTIMO



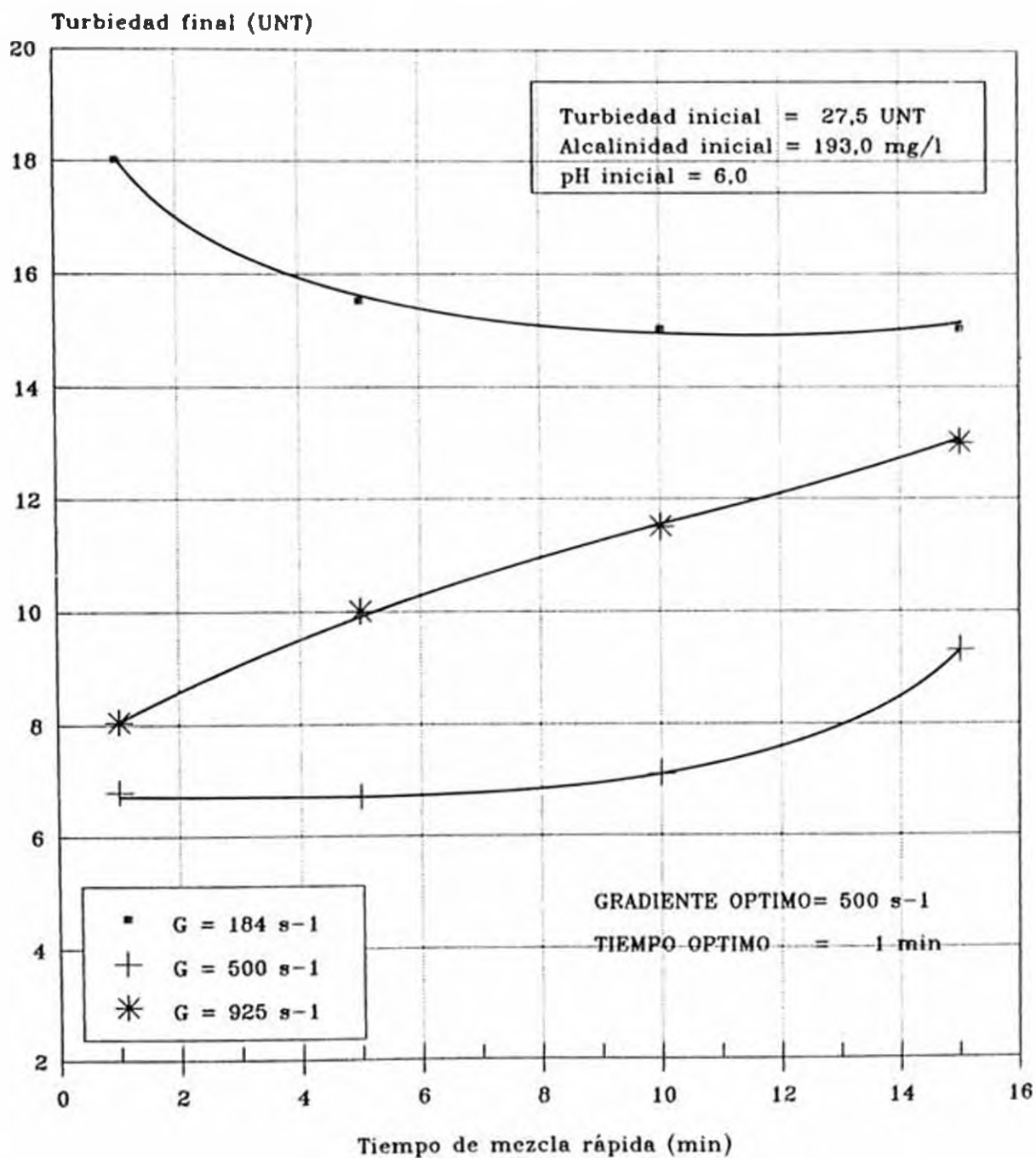
Agua tipo: I  
Proceso Magnetita

Figura N 7-14  
 NUEVA DOSIS OPTIMA DE MAGNETITA



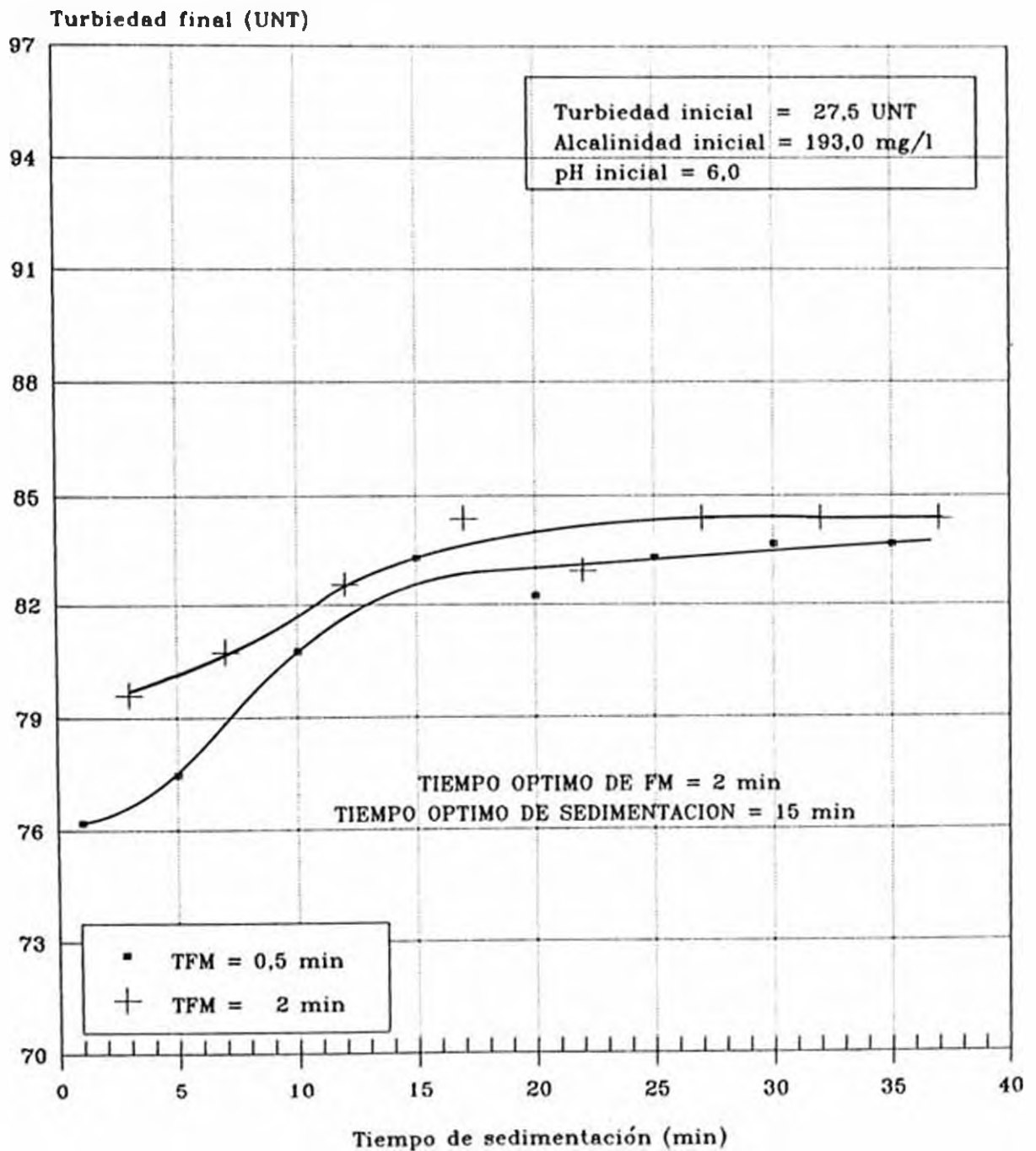
Agua tipo: 1  
 Proceso Magnetita

Figura N 7-15  
GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE  
MEZCLA RAPIDA



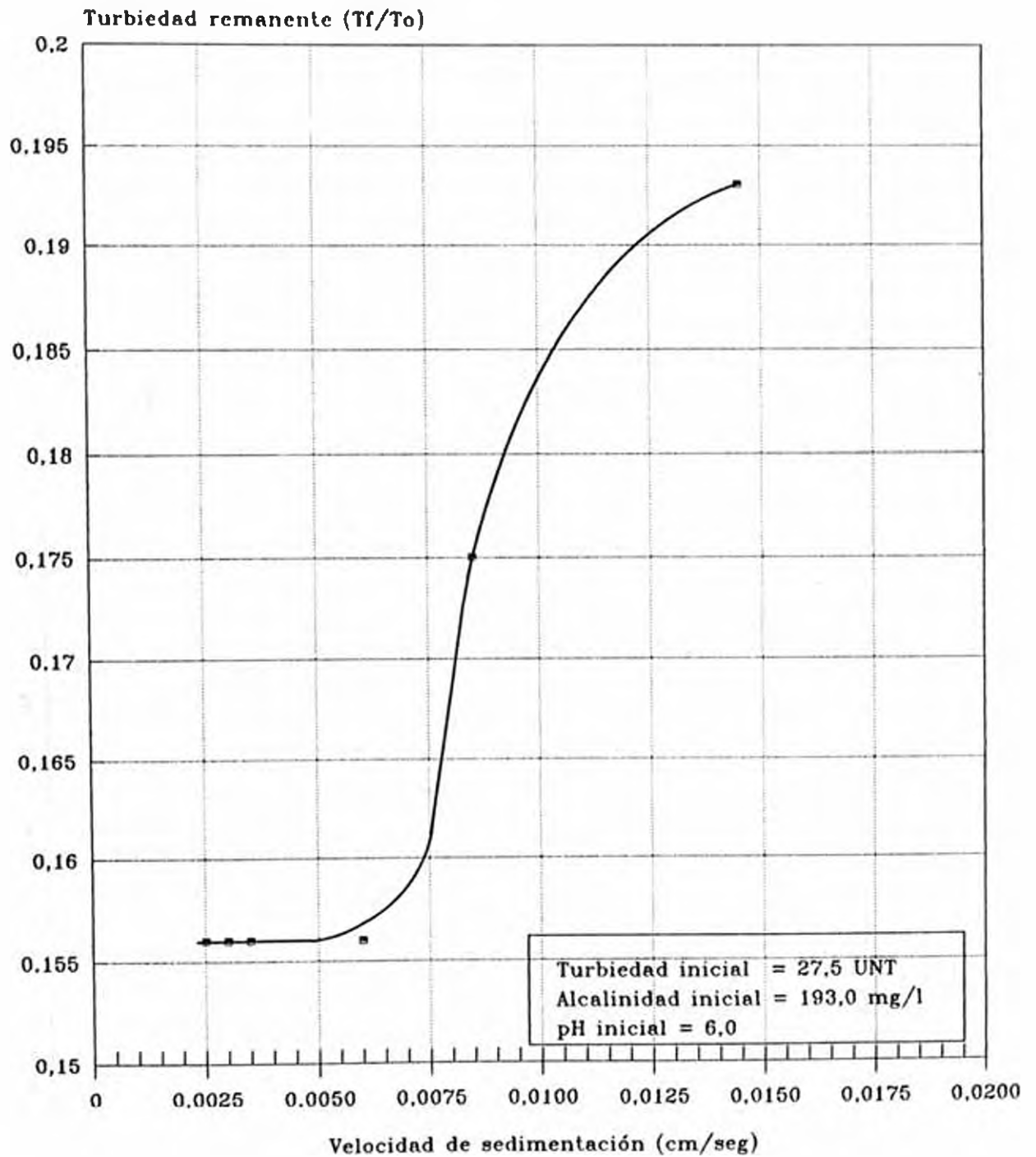
Agua tipo: I  
Proceso Magnetita

Figura N 7-16  
**TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION MAGNETICA  
 Y SEDIMENTACION**



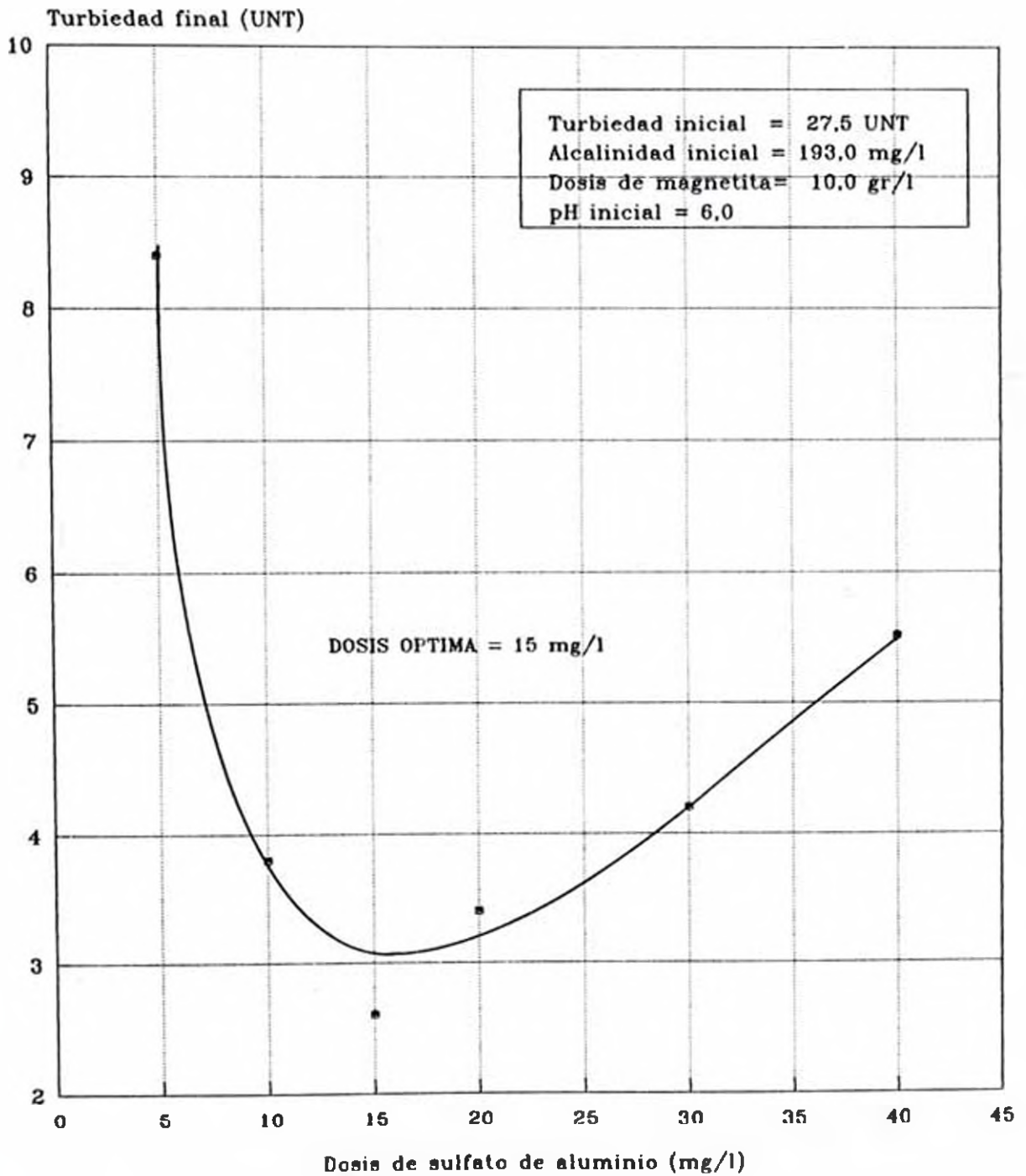
Agua tipo: I  
 Proceso Magnetita

Figura N 7-17  
**EFICIENCIA DE SEDIMENTABILIDAD**



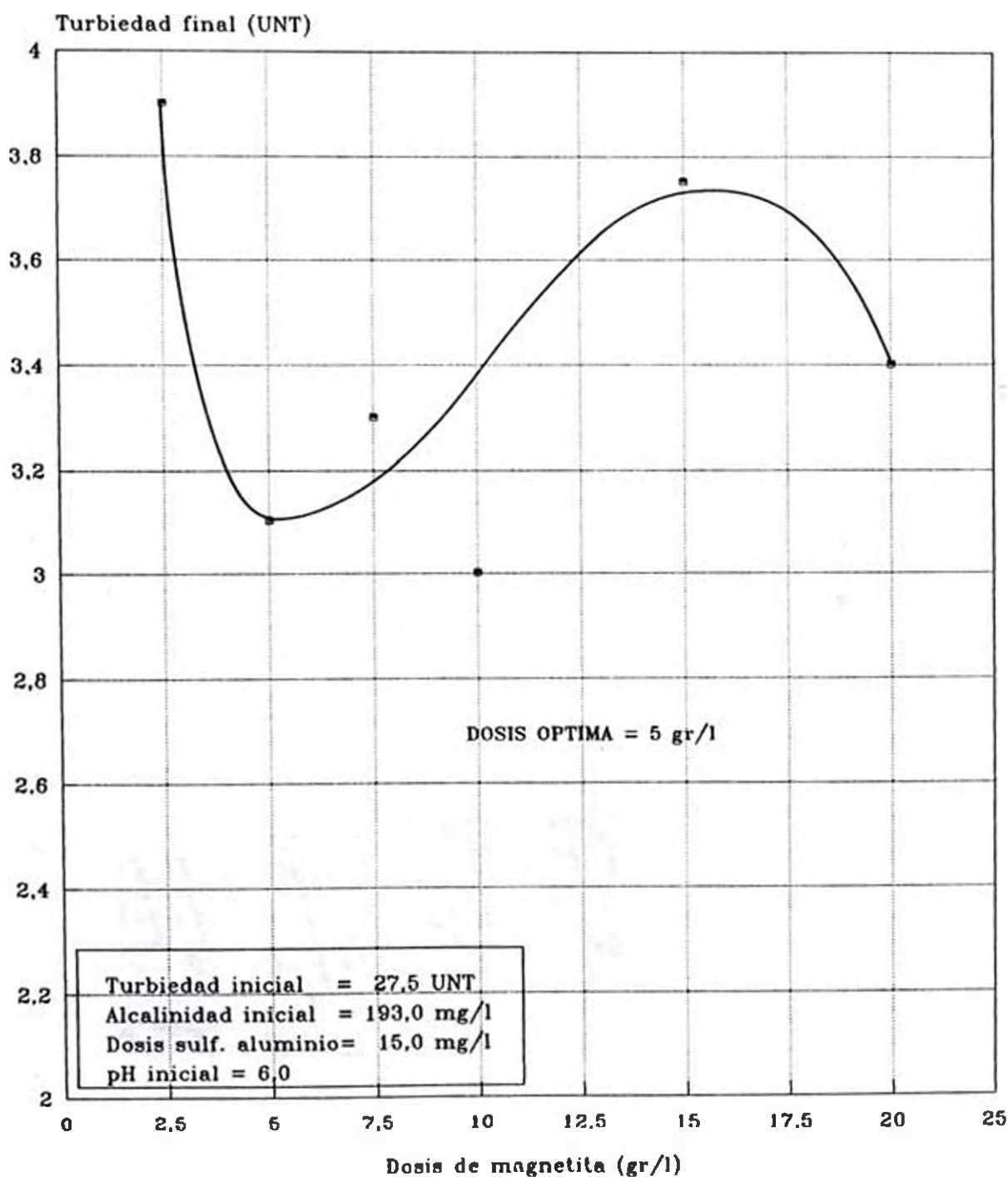
Agua tipo: I  
 Proceso Magnetita

Figura N 7-18  
DOSIS OPTIMA DE SULFATO DE ALUMINIO



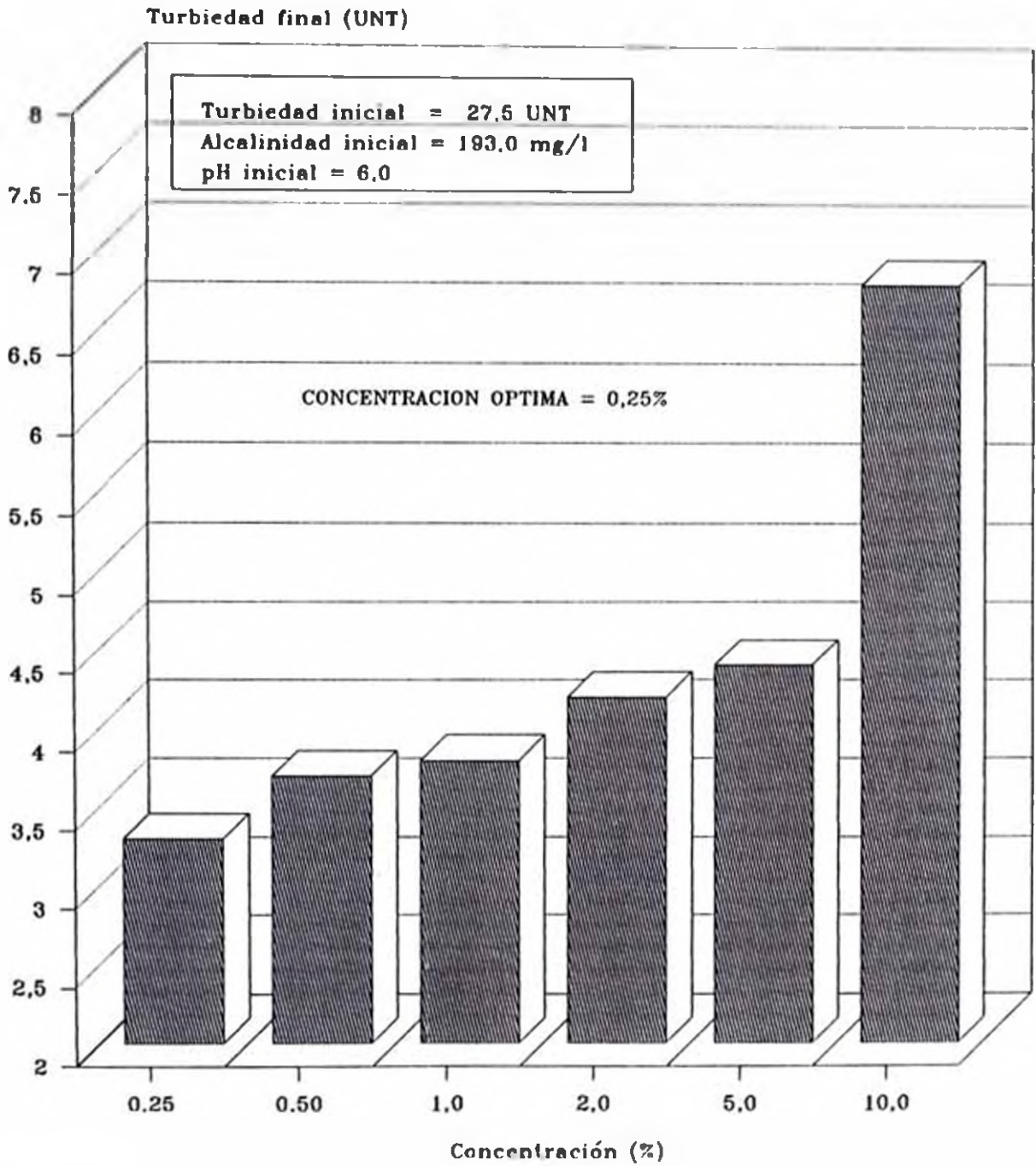
Agua tipo: I  
Proceso Magnetita-Sulfato

Figura N 7-18  
 NUEVA DOSIS OPTIMA DE MAGNETITA



Agua tipo: 1  
 Proceso Magnetita-Sulfato

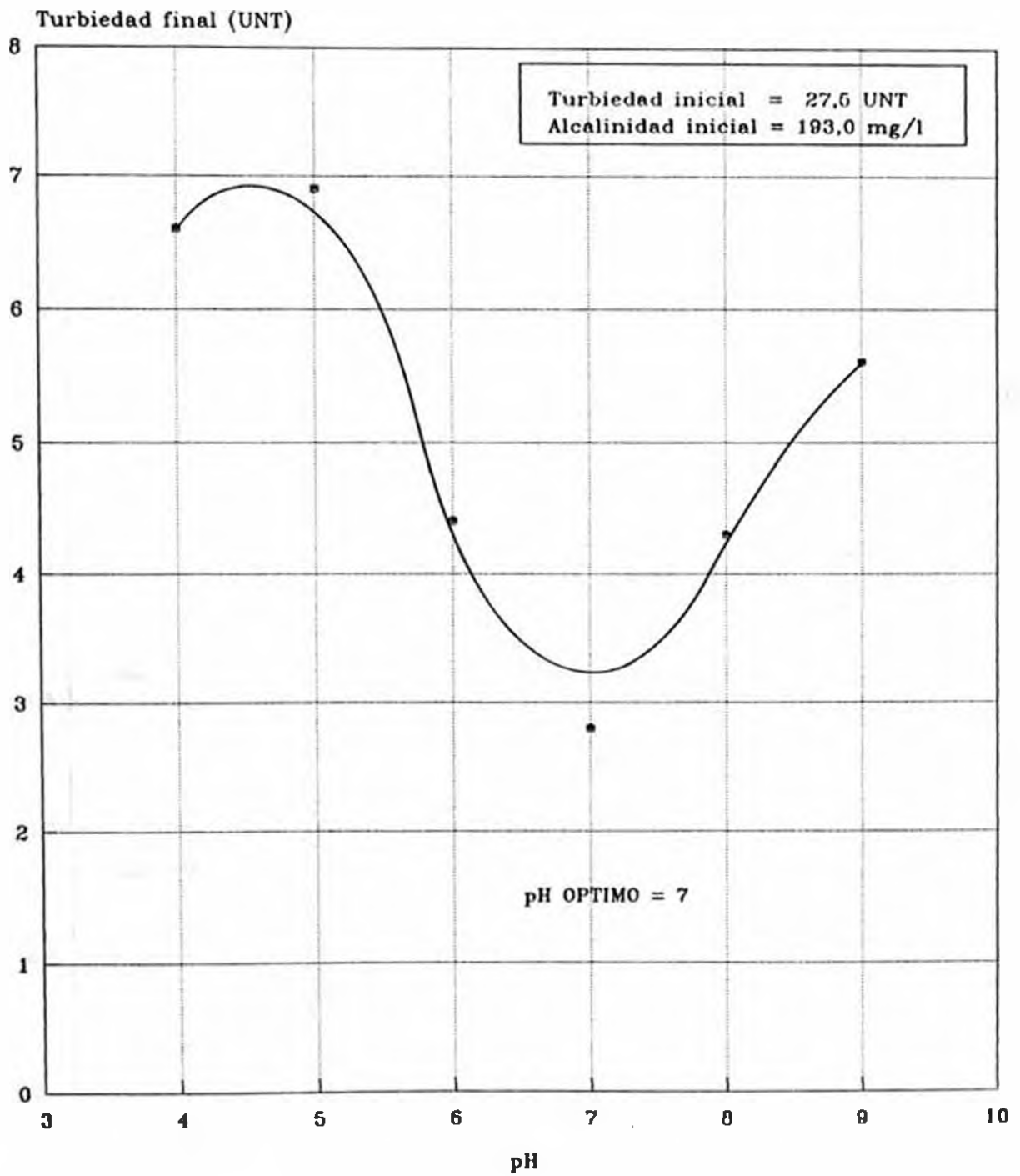
Figura N 7-20  
CONCENTRACION OPTIMA DE  
SULFATO DE ALUMINIO



Agua tipo: I  
Proceso Magnetita-Sulfato

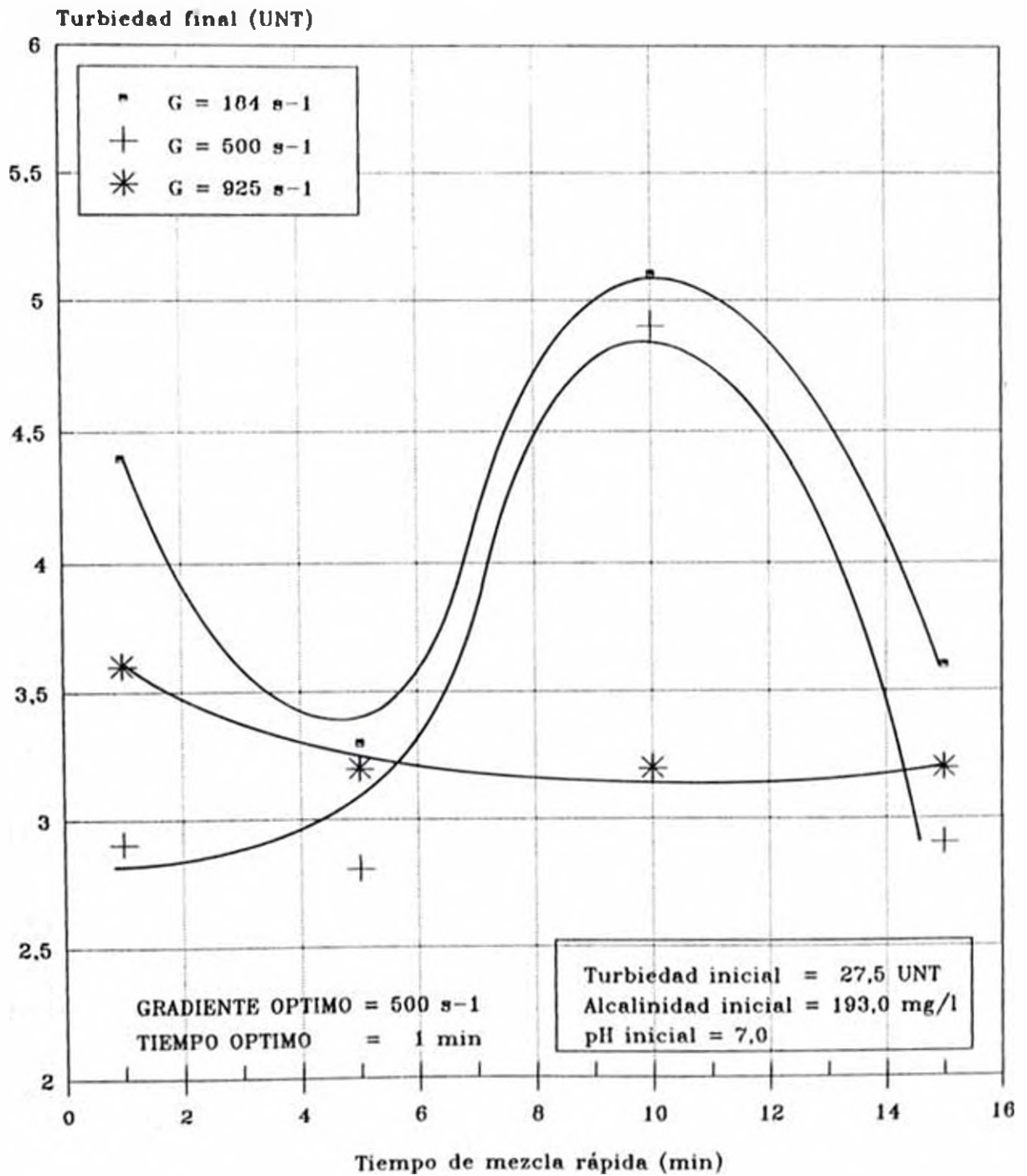


Figura N 7-21  
pH OPTIMO



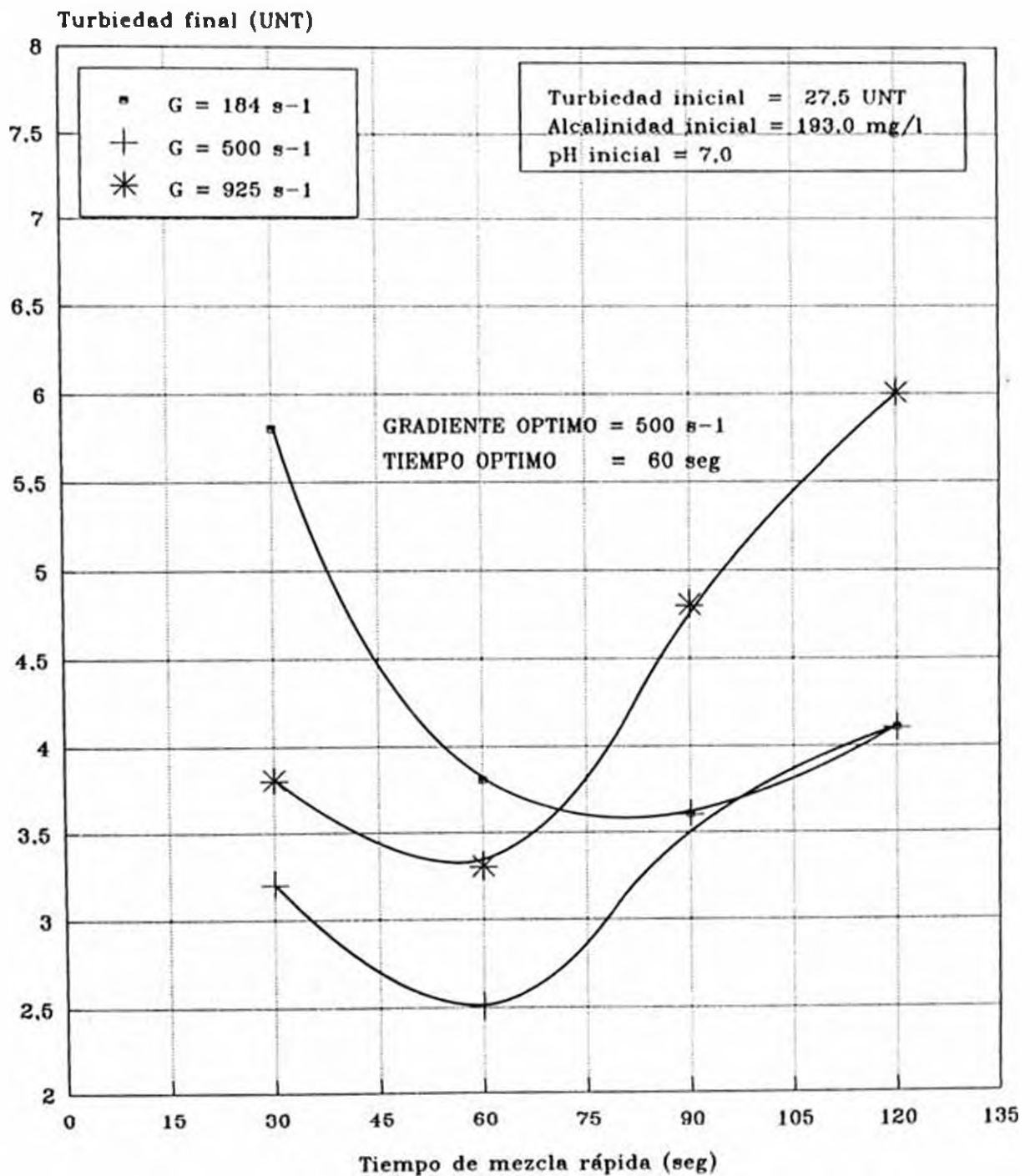
Agua tipo: I  
Proceso Magnetita-Sulfato

Figura N 7-22  
GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR1



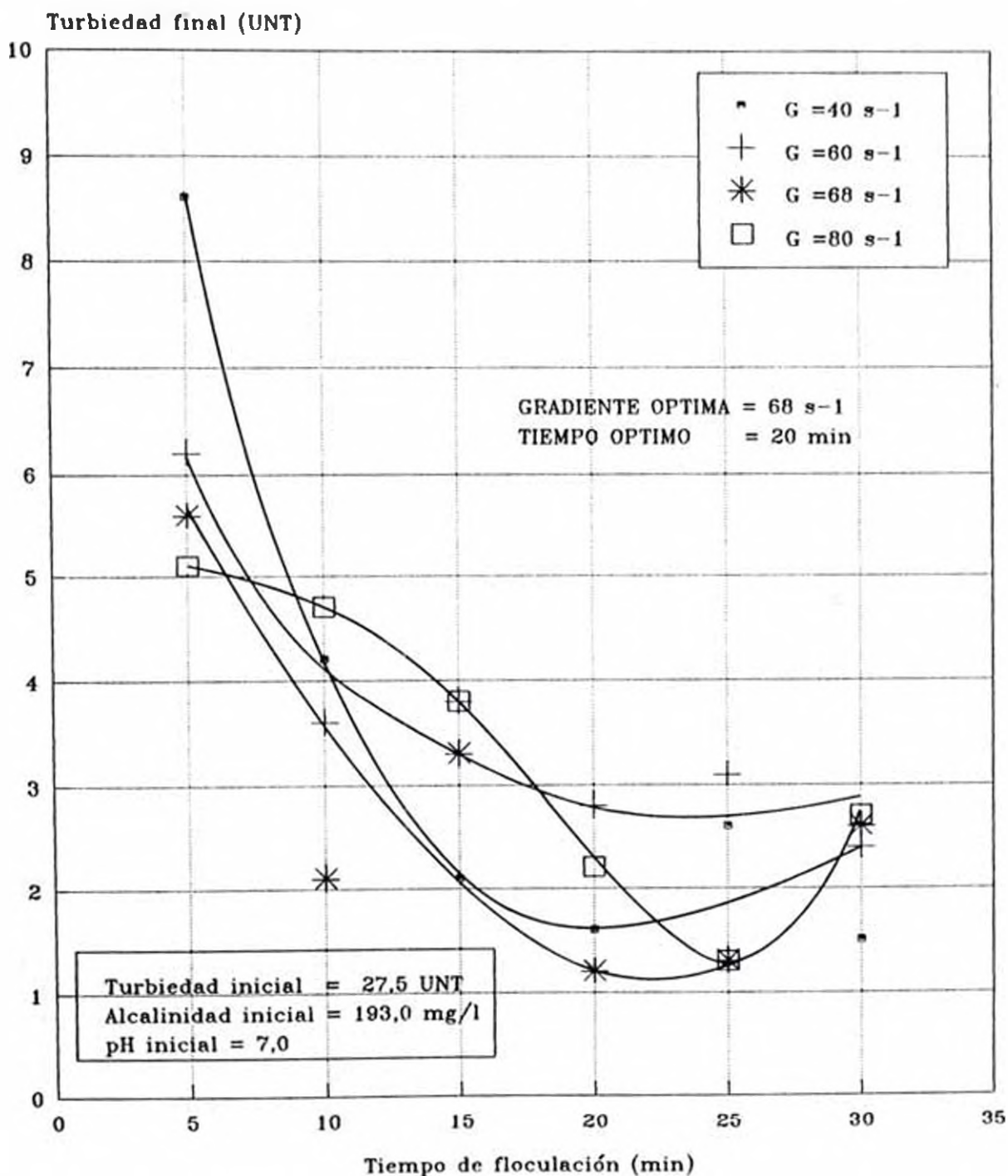
Agua Tipo: I  
Proceso Magnetita-Sulfato

Figura N 7-23  
GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR2



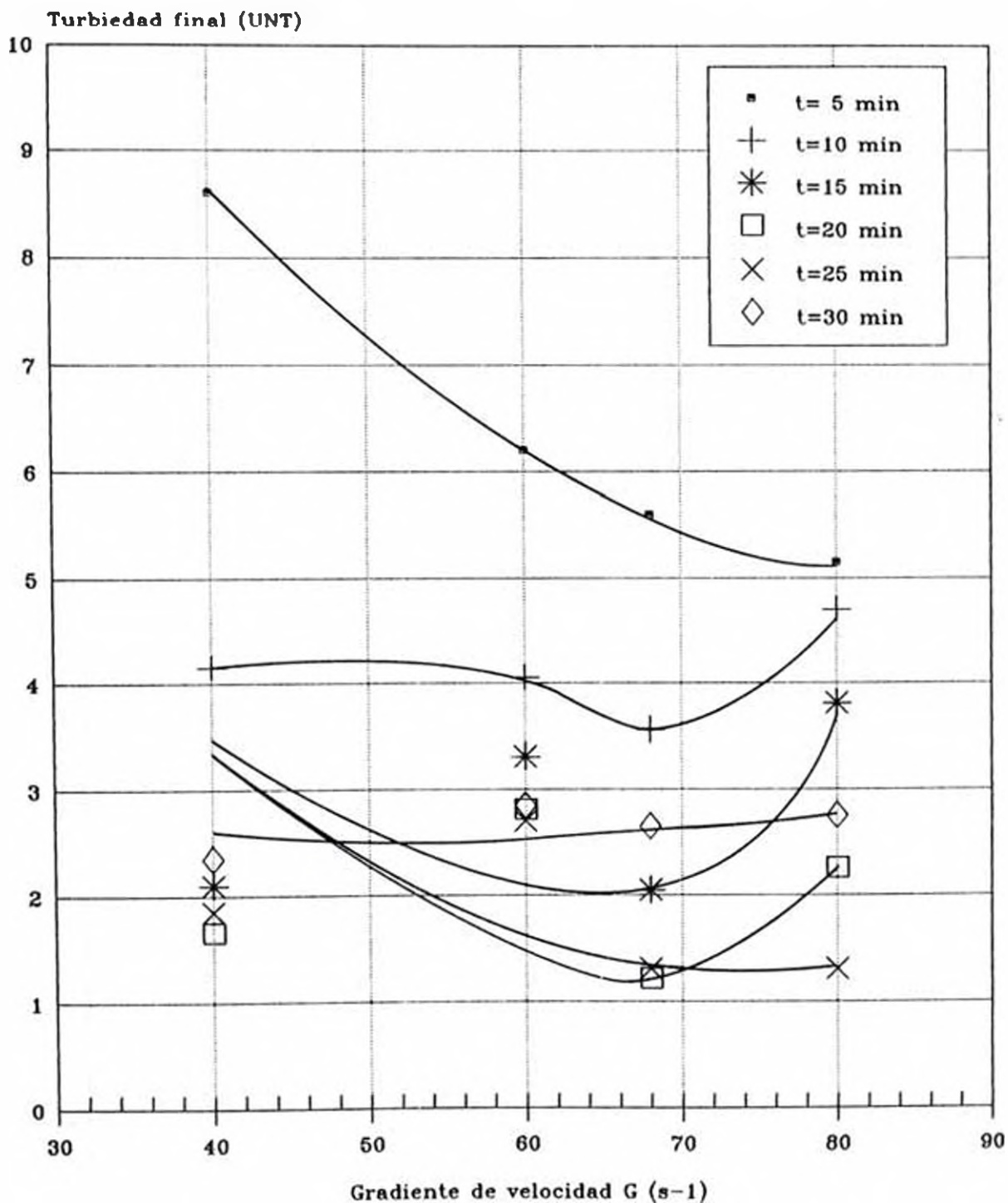
Agua tipo: I  
Proceso Magnetita-Sulfato

Figura N 7-24  
GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION



Agua tipo: I  
 Proceso Magnetita-Sulfato

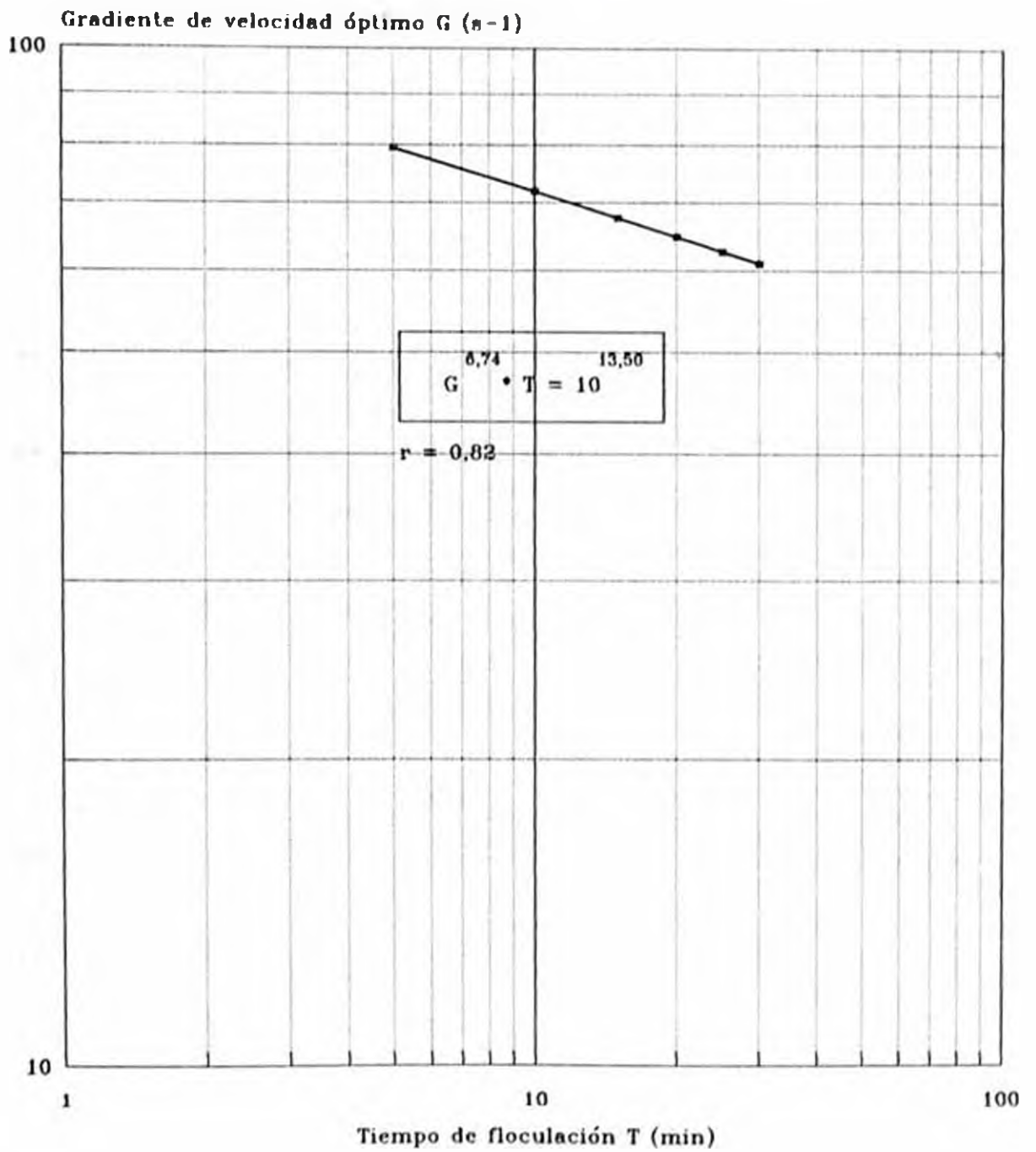
Figura N 7-25  
**TURBIEDAD FINAL vs GRADIENTE DE VELOCIDAD**



Agua tipo: I  
 Proceso Magnetita-Sulfato

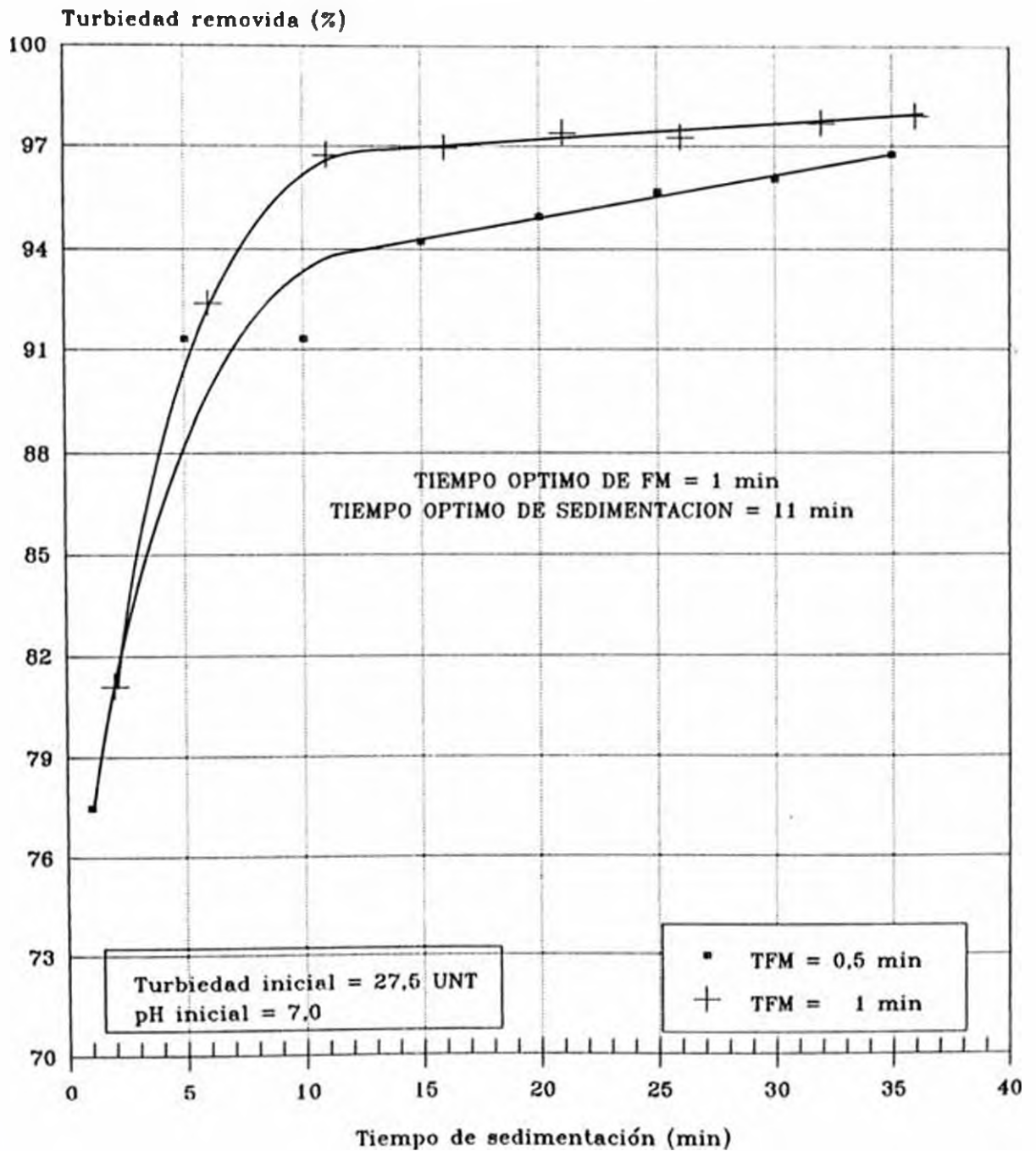
Figura N 7-26

VARIACION DEL GRADIENTE DE VELOCIDAD OPTIMO EN FUNCION DEL TIEMPO DE FLOCULACION



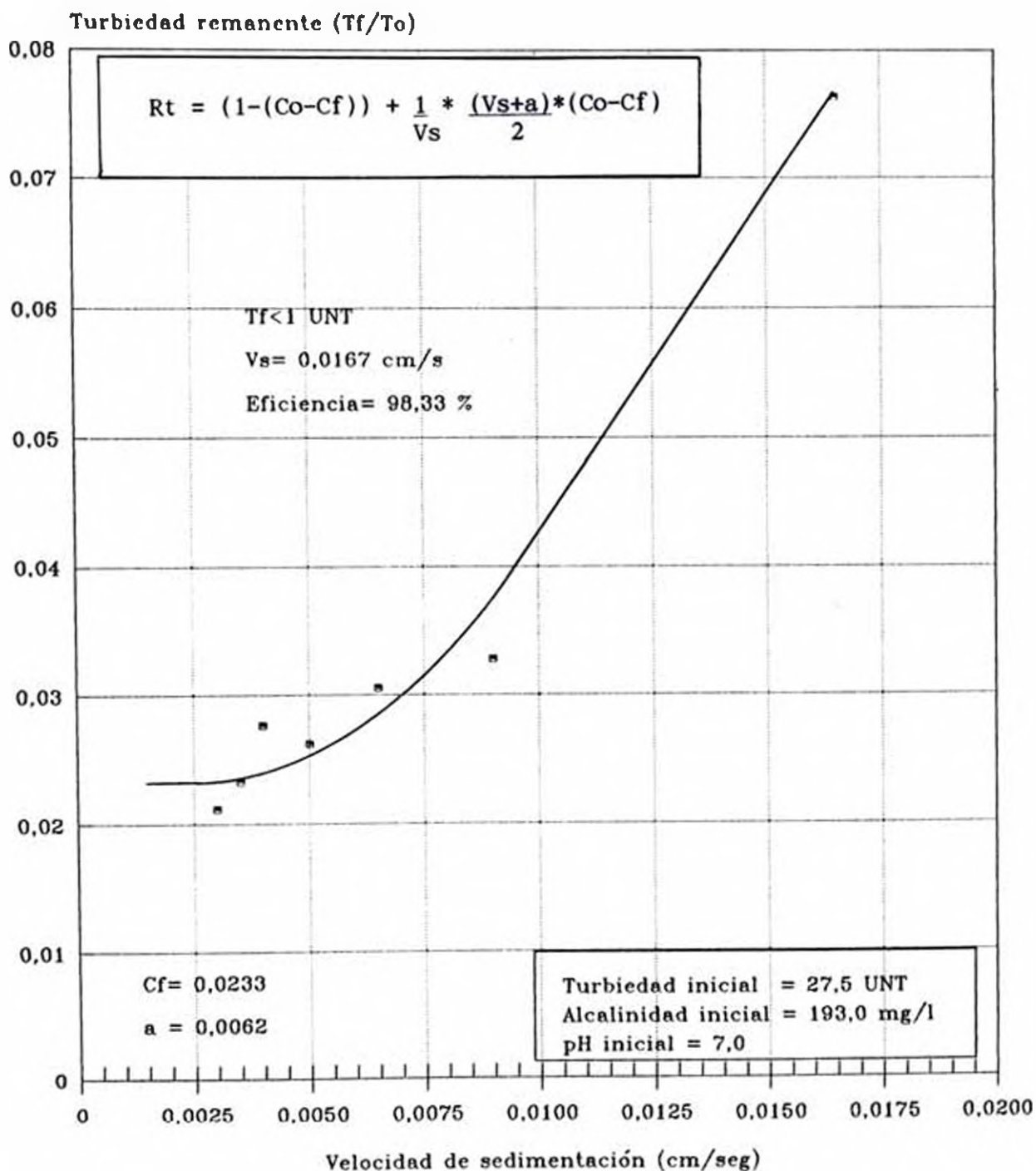
Agua tipo: I  
Proceso Magnetita-Sulfato

Figura N 7-27  
**TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION MAGNETICA  
 Y SEDIMENTACION**



Agua tipo: 1  
 Proceso Magnetita-Sulfato

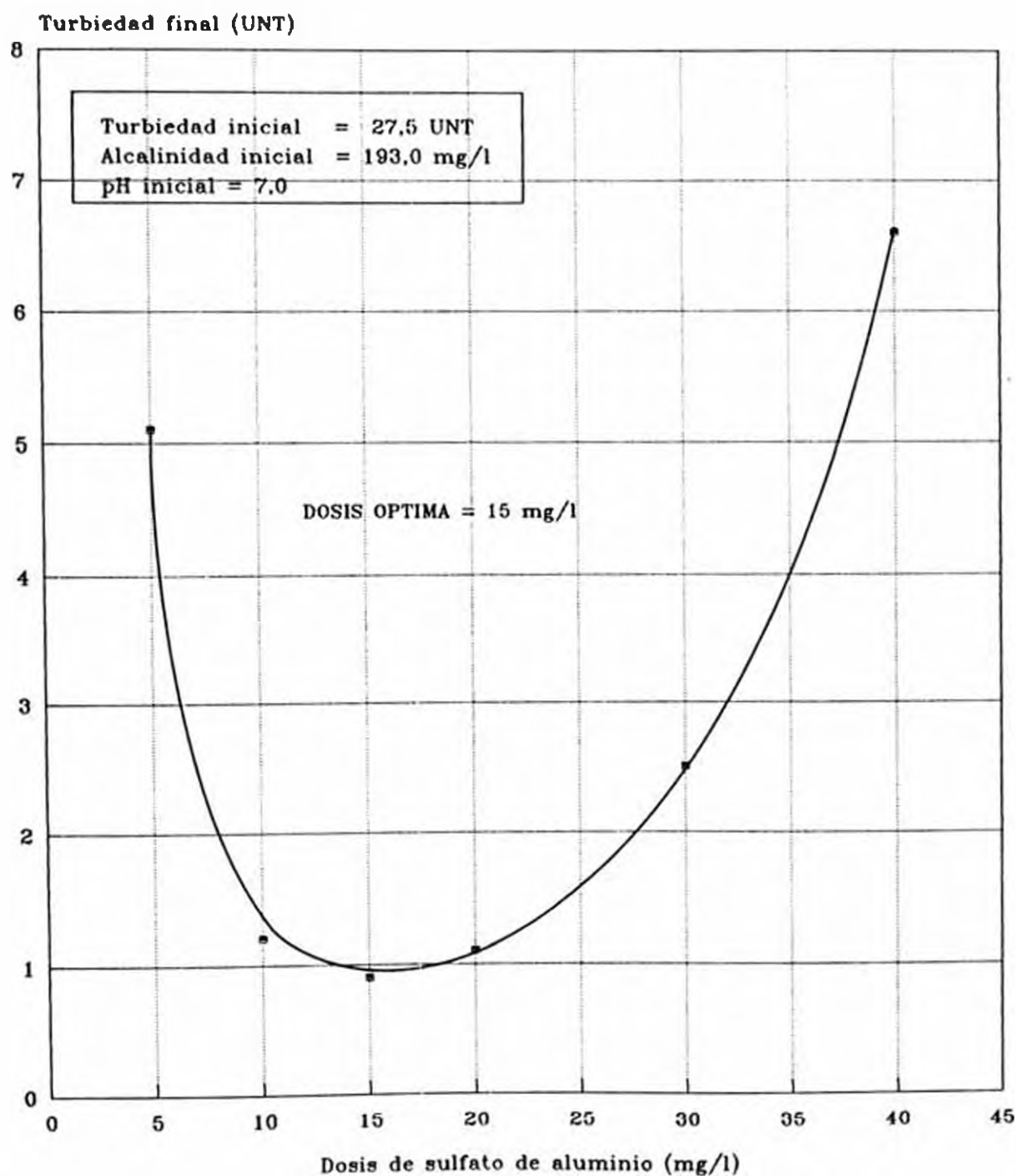
Figura N 7-20  
**EFICIENCIA DE SEDIMENTABILIDAD**



Agua tipo: I  
 Proceso Magnetita-Sulfato

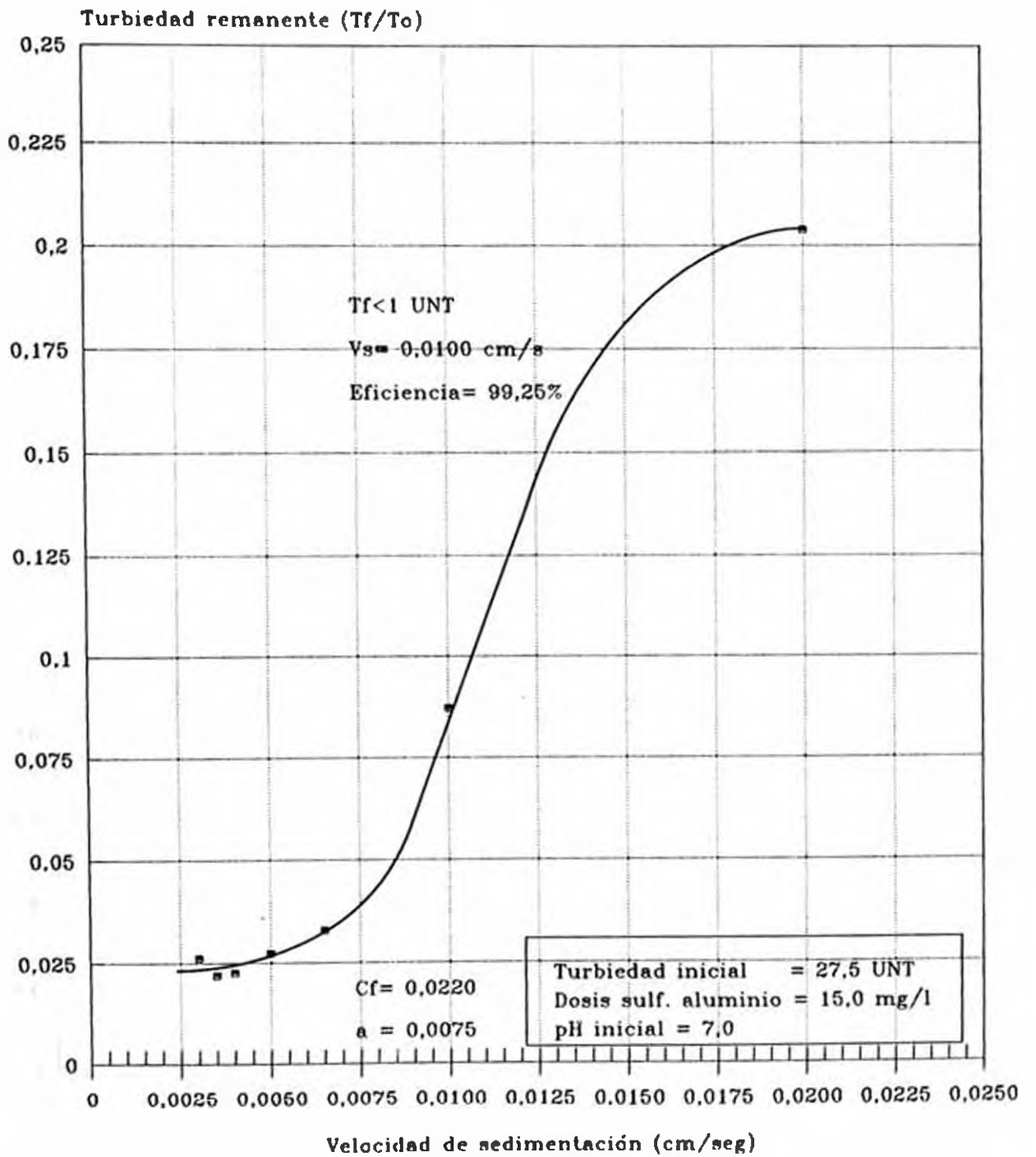


Figura N 7-29  
**DOSIS OPTIMA DE SULFATO DE ALUMINIO**



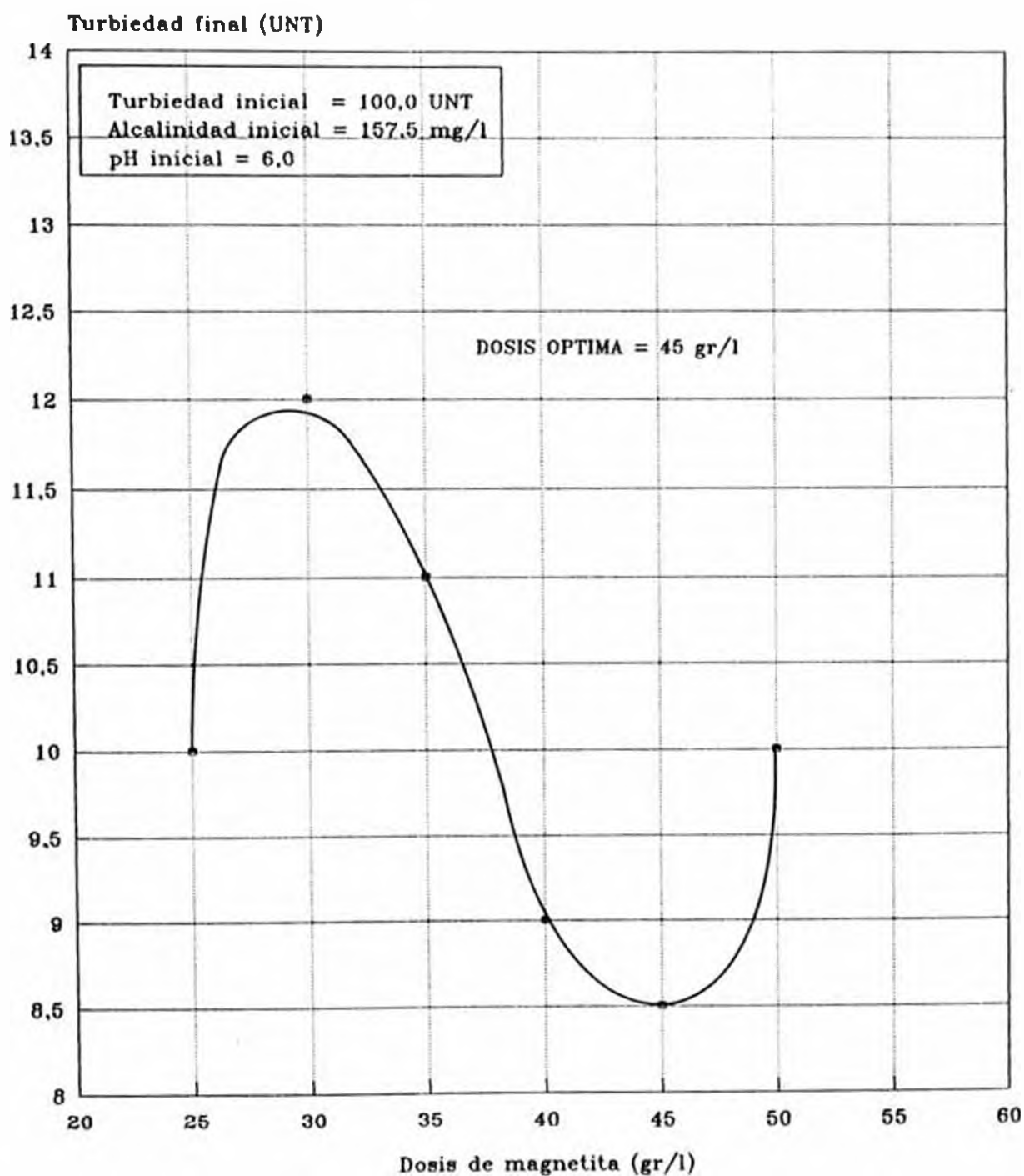
Agua tipo: 1  
 Proceso Sulfato de Aluminio

Figura N 7-30  
**EFICIENCIA DE SEDIMENTABILIDAD**



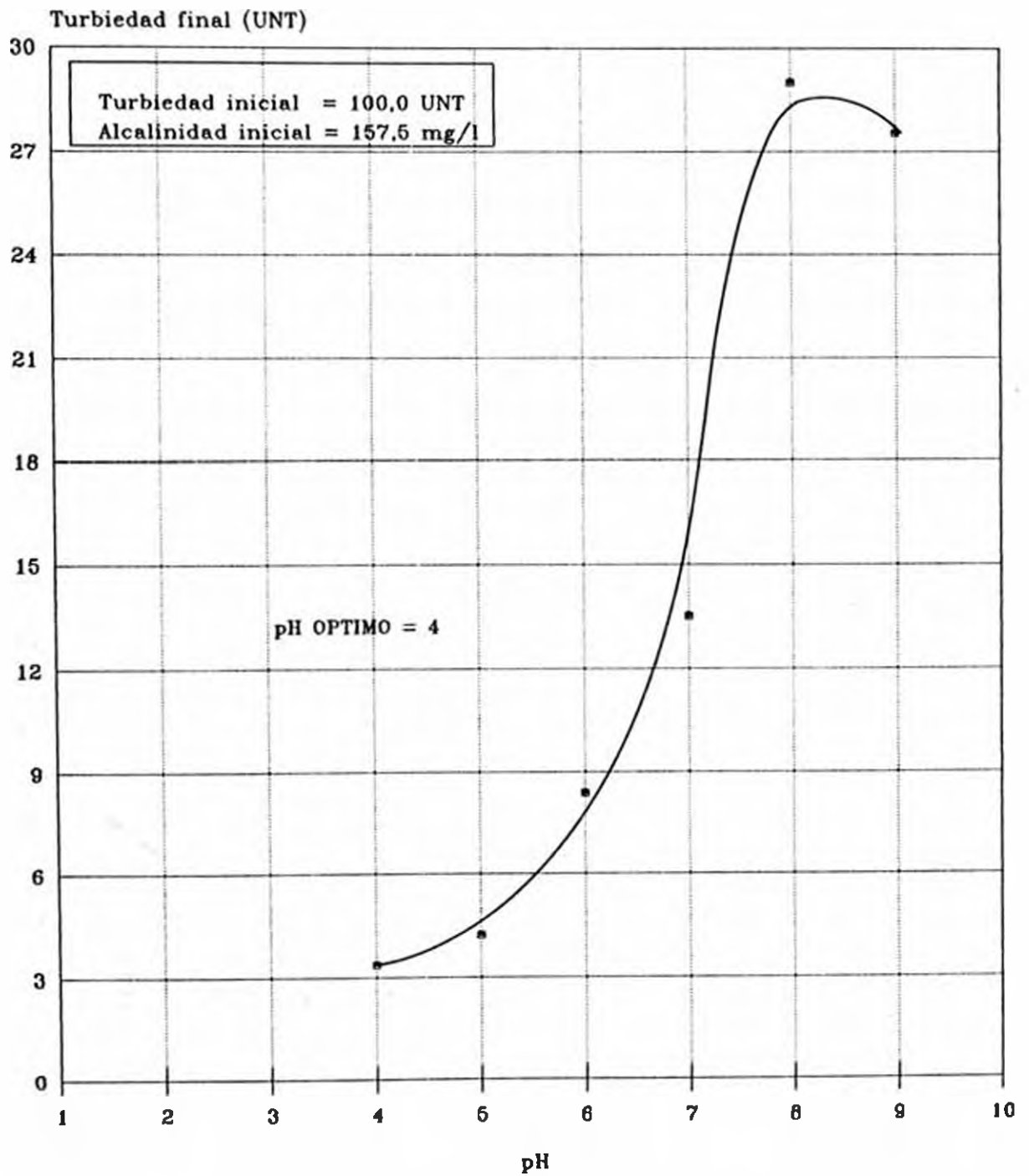
Agua tipo: I  
 Proceso Sulfato de Aluminio

Figura N 7-31  
**DOSIS OPTIMA DE MAGNETITA**



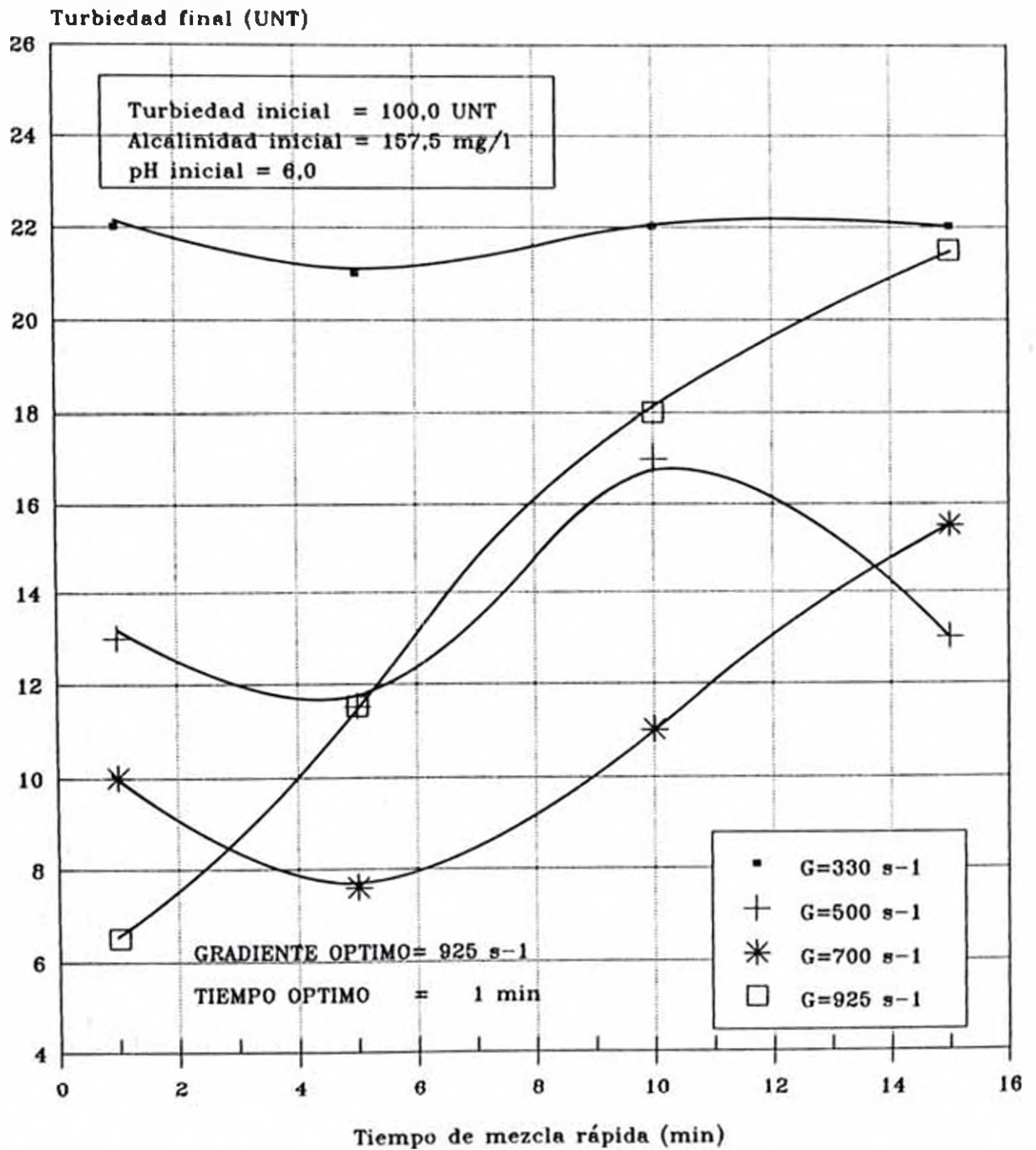
Agua tipo: II  
 Proceso Magnetita

Figura N 7-32  
pH OPTIMO



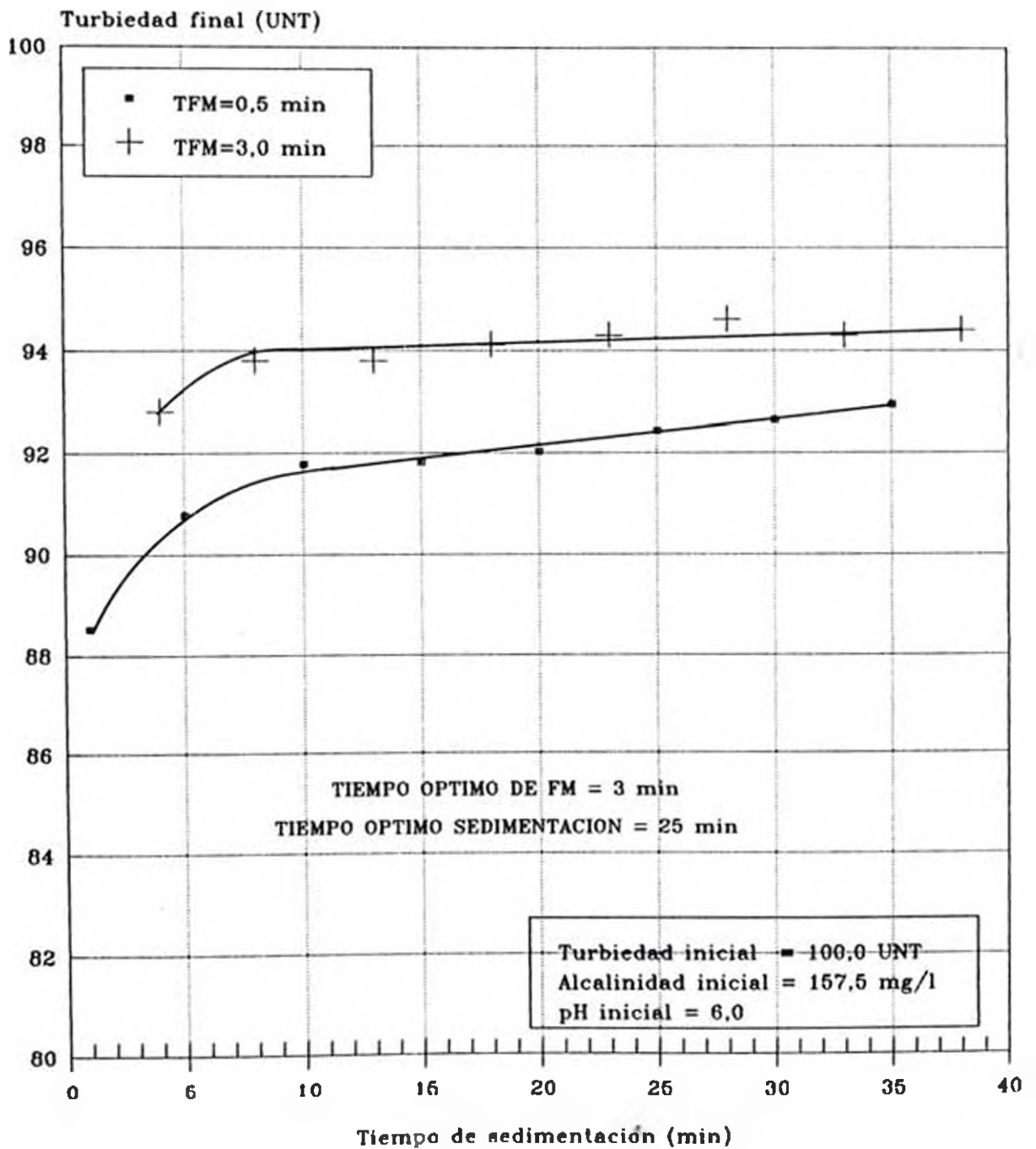
Agua tipo: II  
Proceso Magnetita

Figura N 7-33  
GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE  
MEZCLA RAPIDA



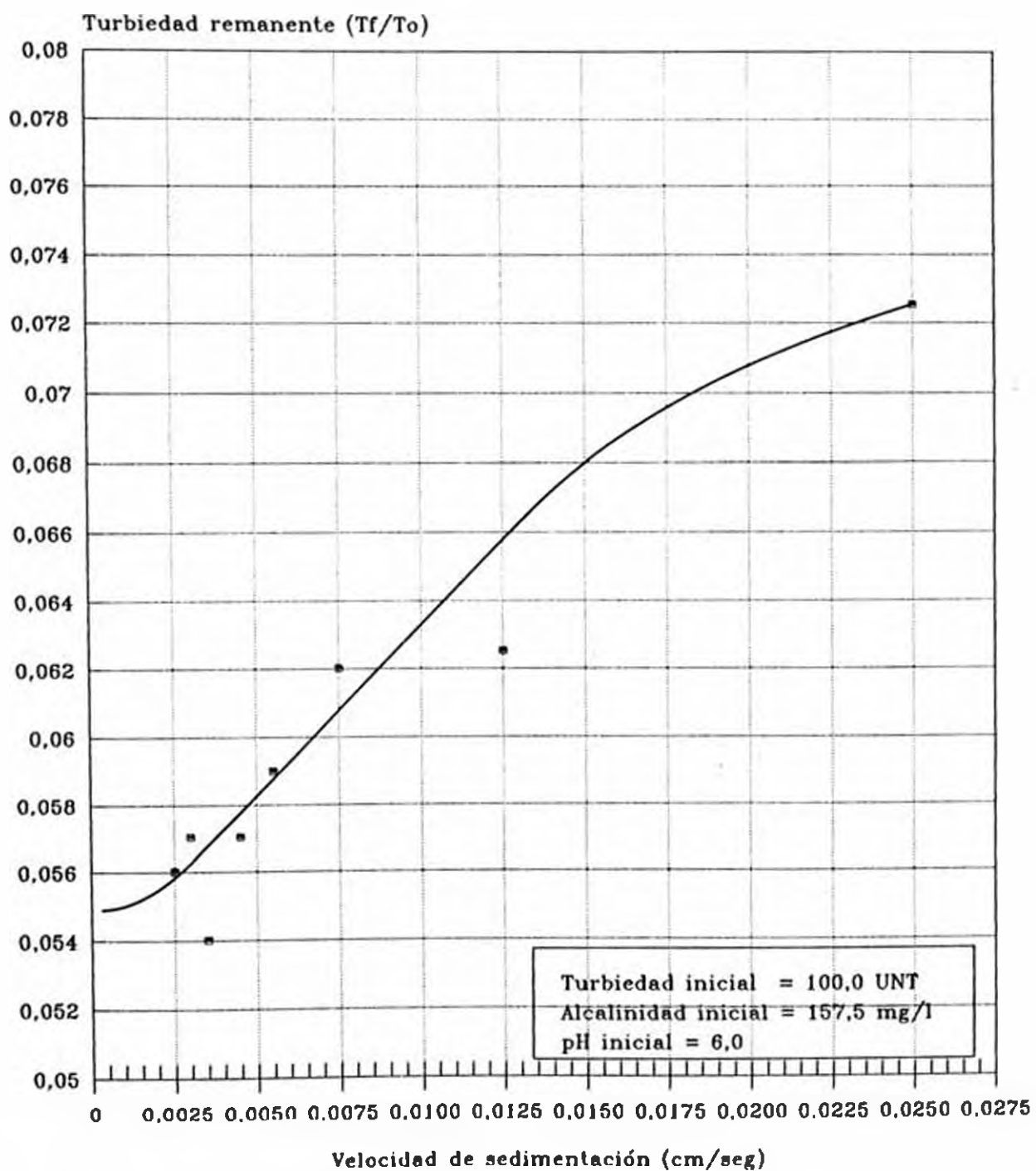
Agua tipo: II  
Proceso Magnetita

Figura N 7-34  
**TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION MAGNETICA  
 Y SEDIMENTACION**



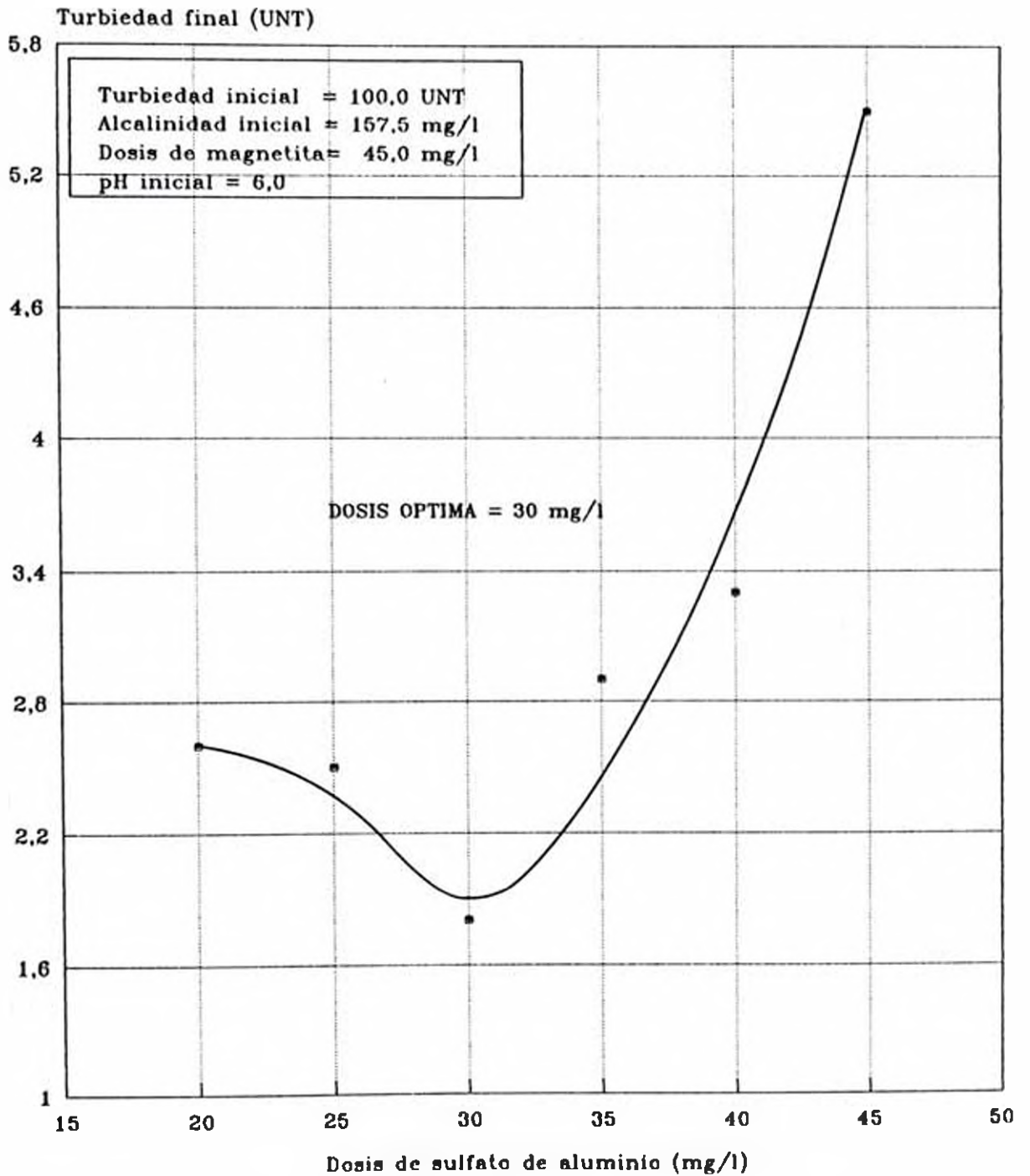
Agua tipo: II  
 Proceso Magnetita

Figura N 7-35  
**EFICIENCIA DE SEDIMENTABILIDAD**



Agua tipo: II  
 Proceso Magnetita

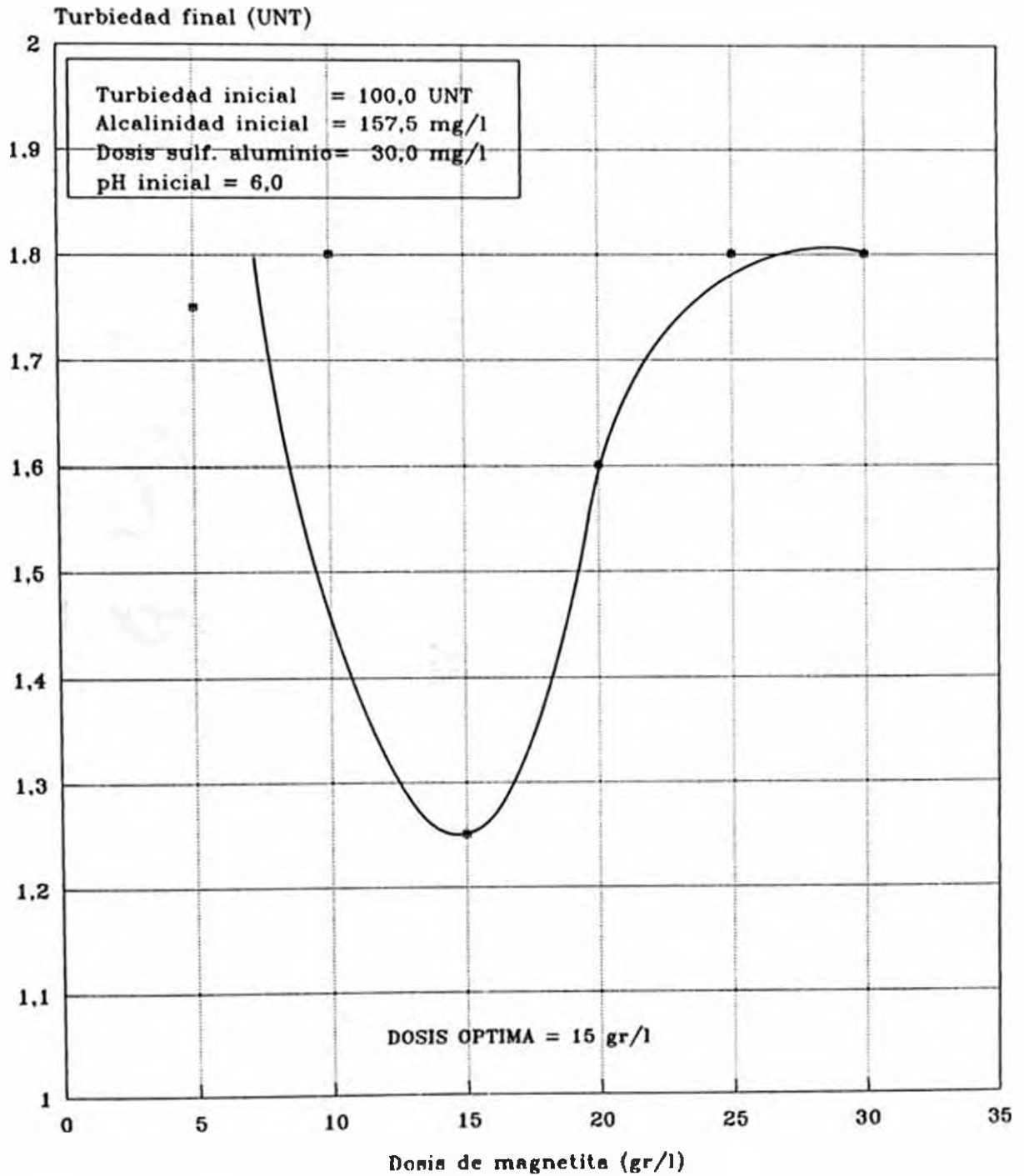
Figura N 7-36  
**DOSIS OPTIMA DE SULFATO DE ALUMINIO**



Agua tipo: II  
 Proceso Magnetita-Sulfato

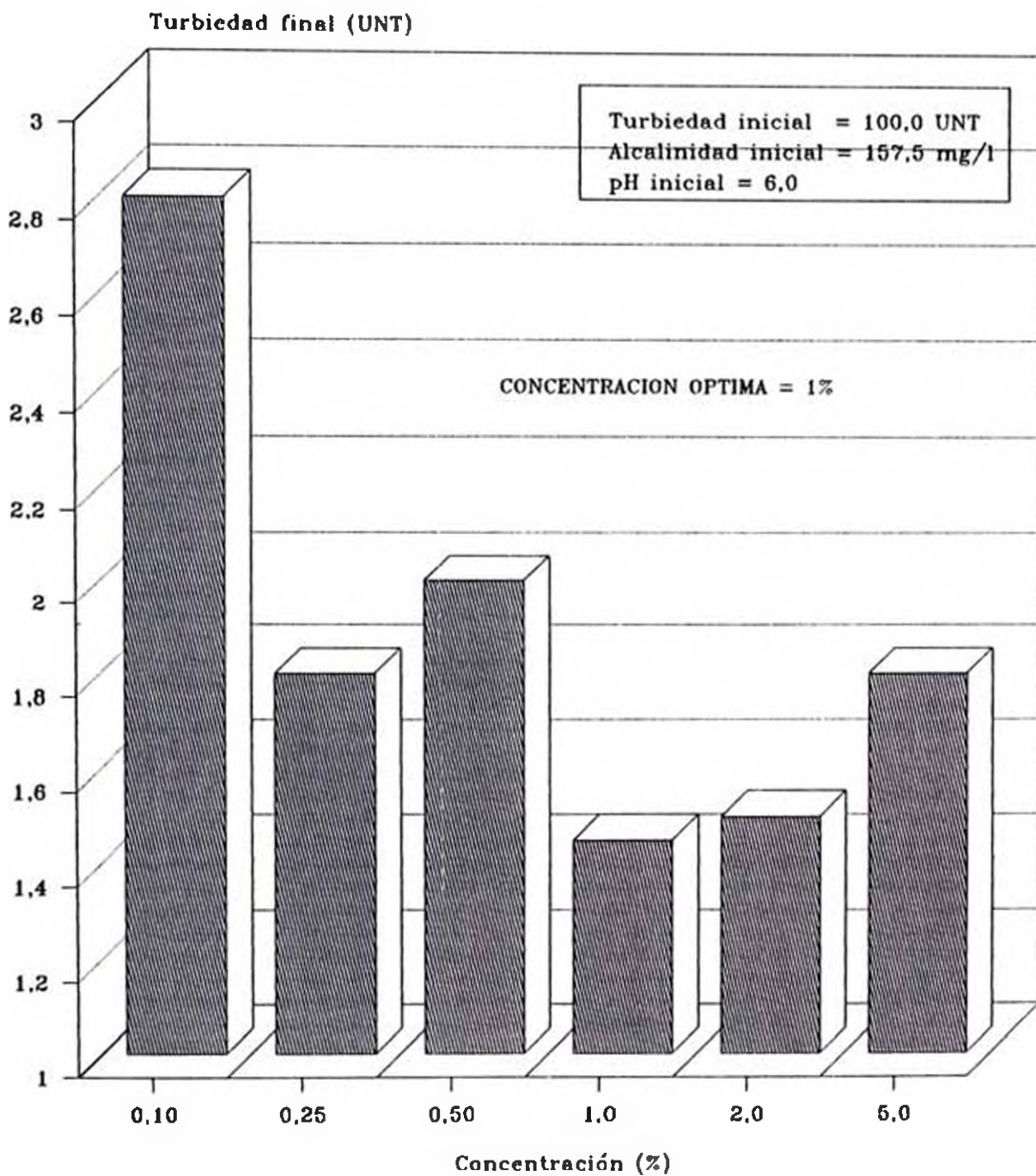


Figura N 7-37  
**NUEVA DOSIS OPTIMA DE MAGNETITA**



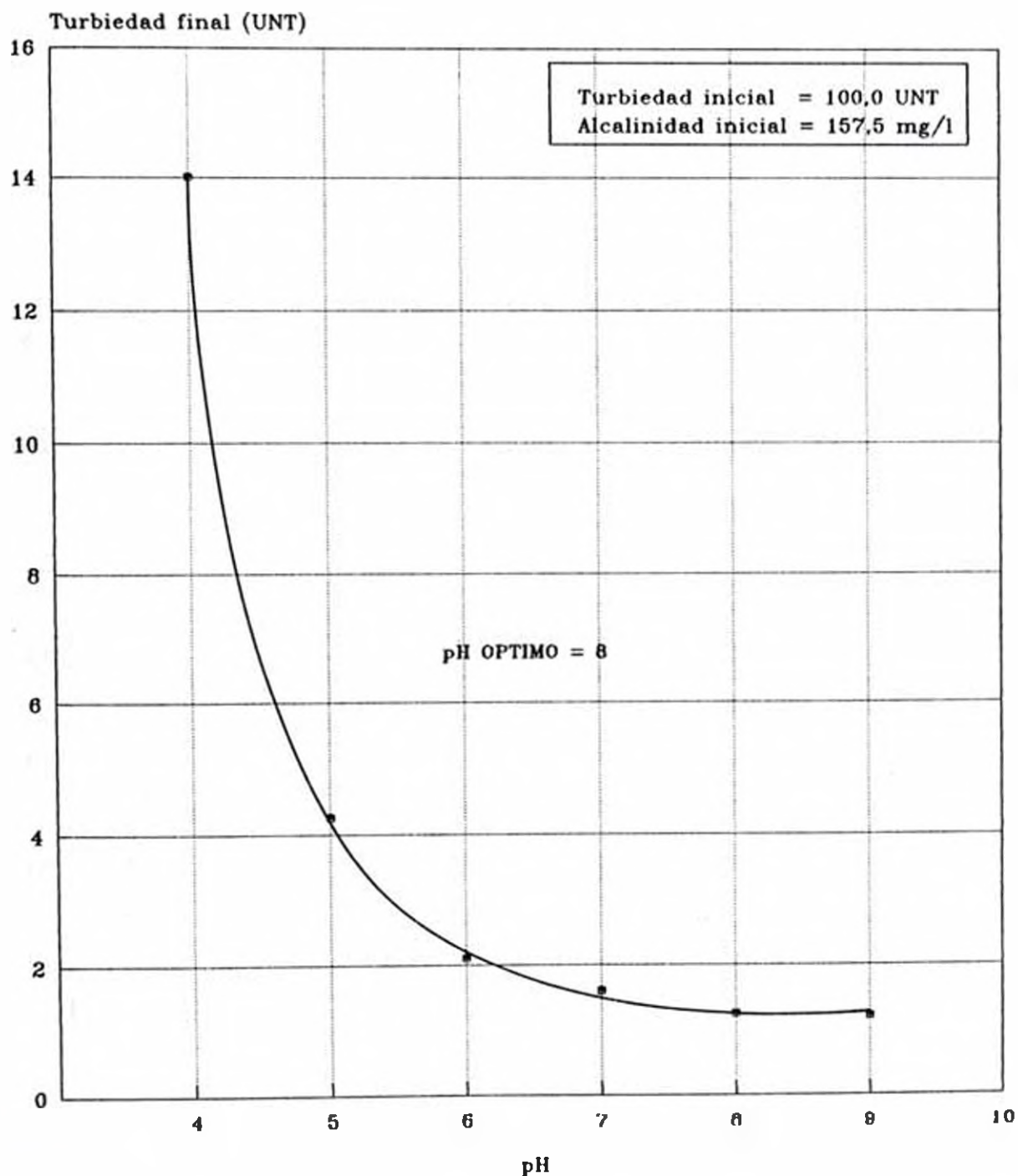
Agua tipo: II  
 Proceso Magnetita-Sulfato

Figura N 7-38  
**CONCENTRACION OPTIMA DE  
 SULFATO DE ALUMINIO**



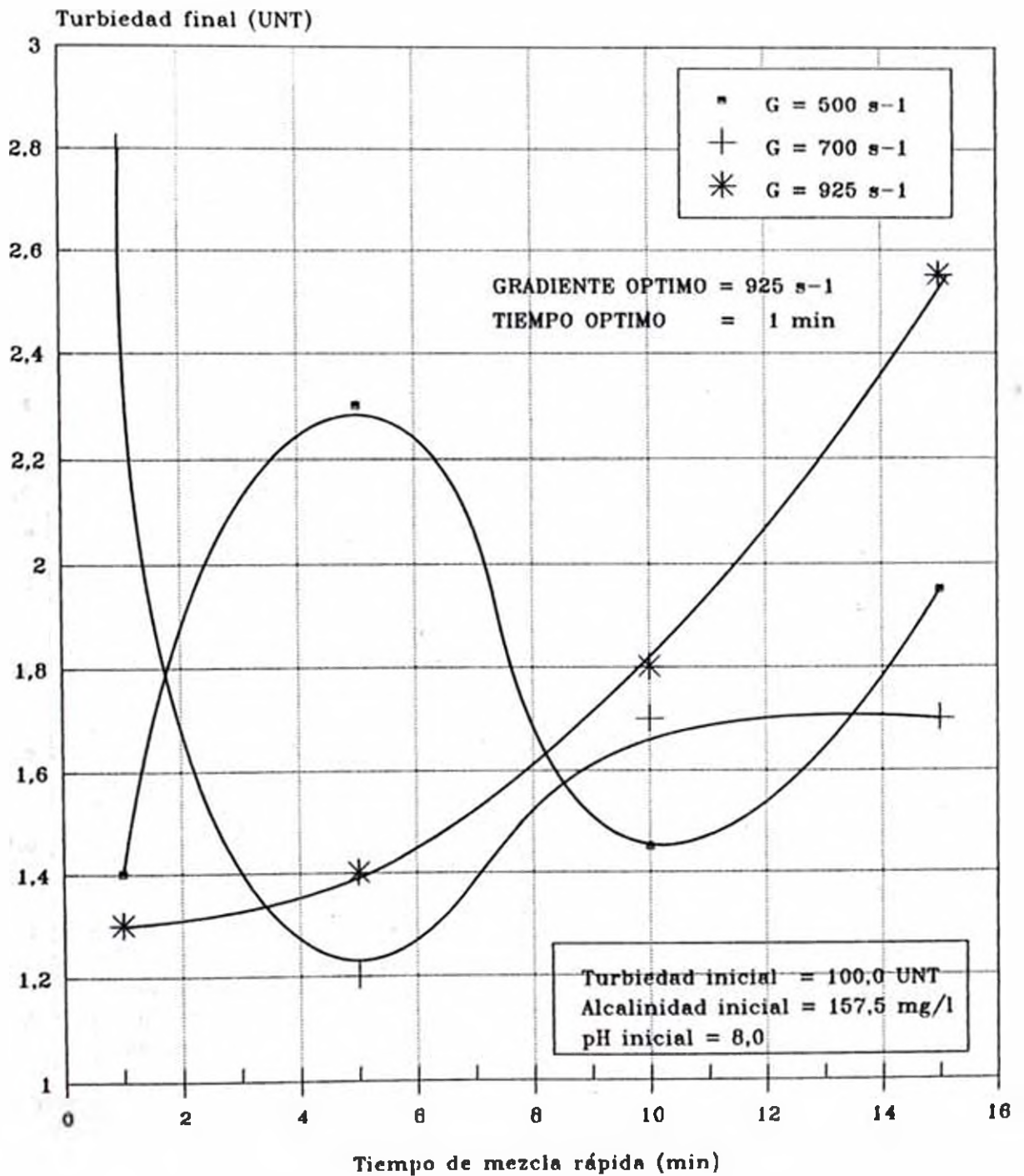
Agua tipo: II  
 Proceso Magnetita-Sulfato

Figura N 7-38  
pH OPTIMO



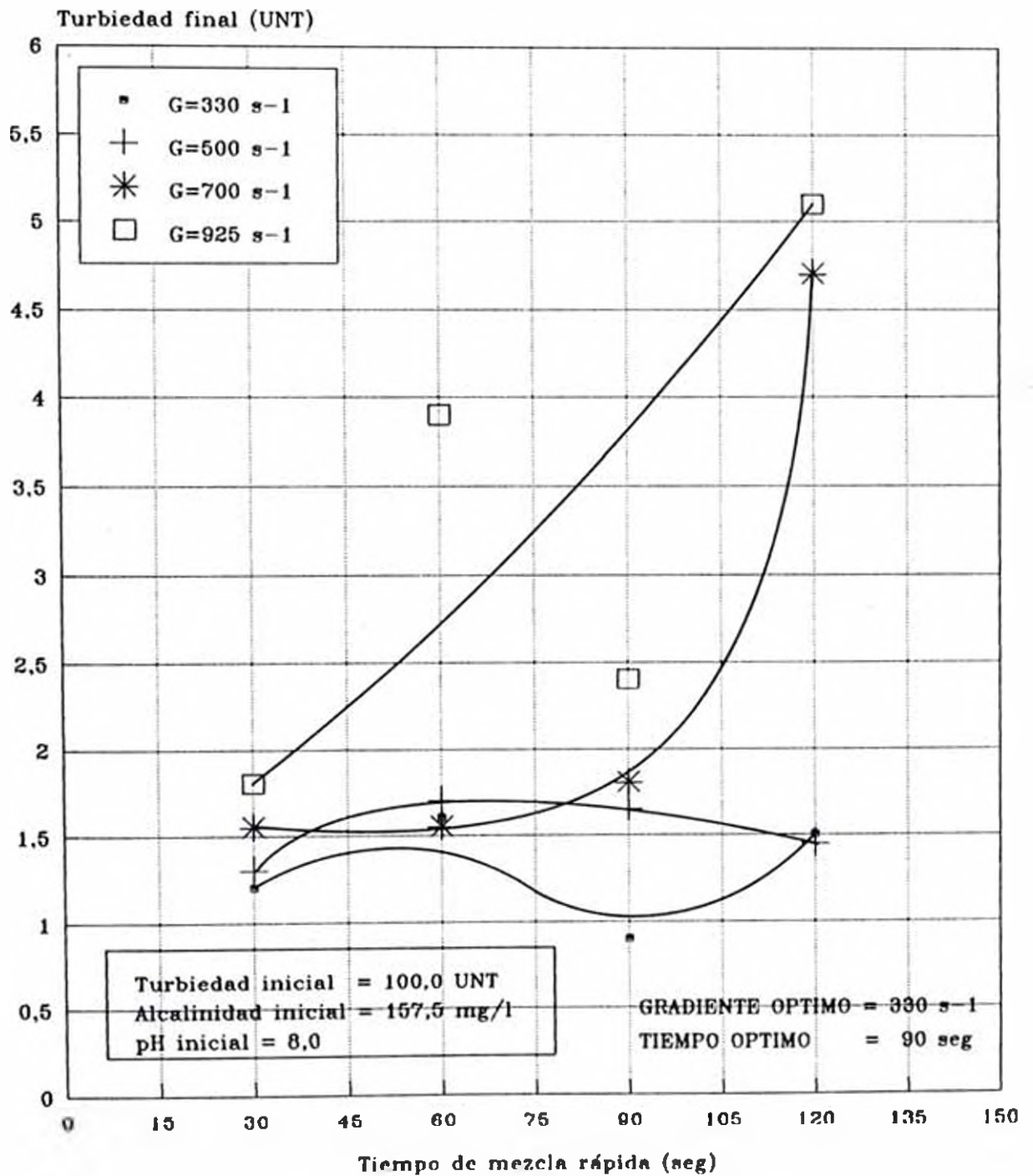
Agua tipo: II  
Proceso Magnetita-Sulfato

Figura N 7-40  
GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR1



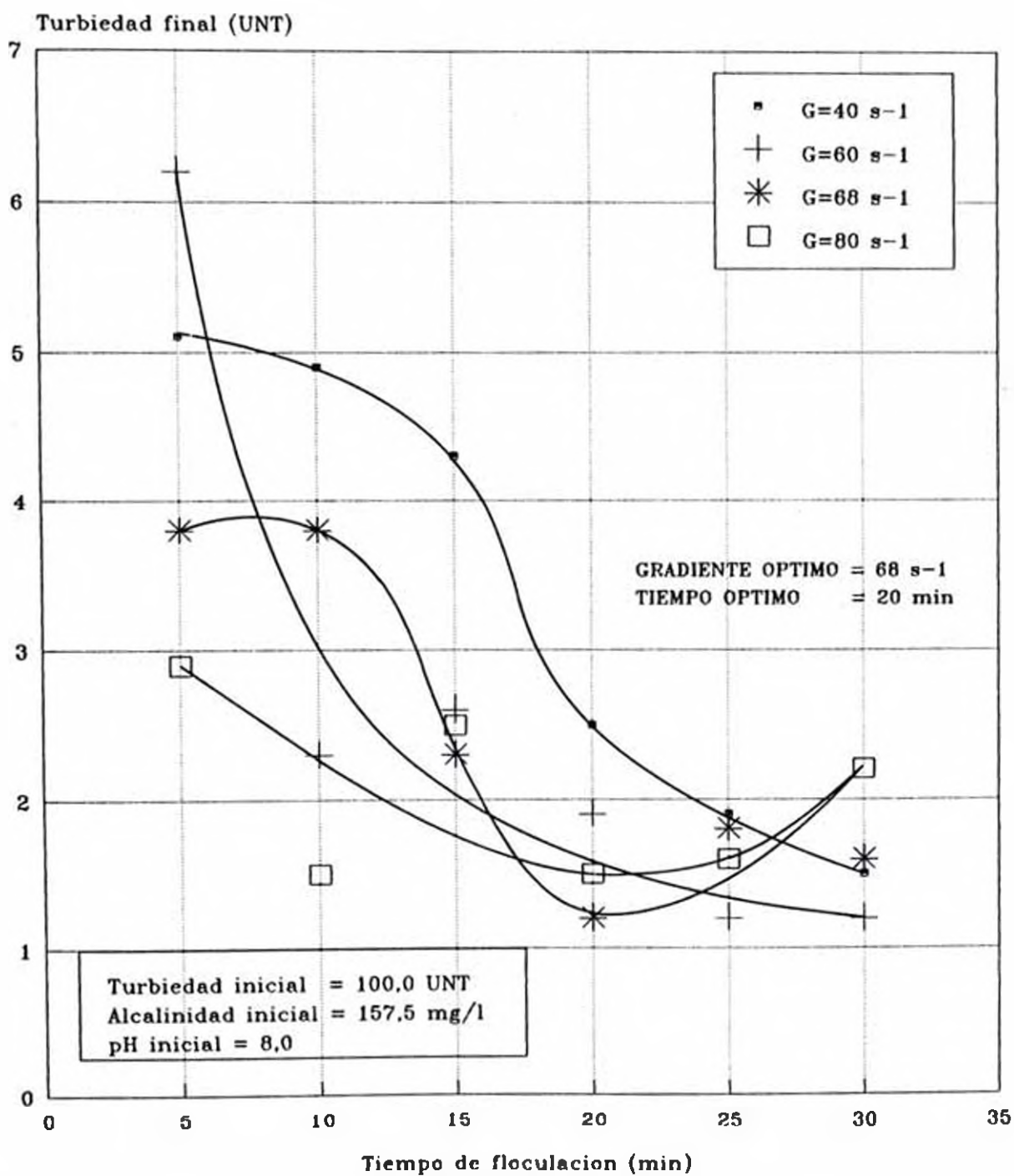
Agua Tipo: II  
Proceso Magnetita-Sulfato

Figura N 7-41  
GRADIENTE Y TIEMPO EN MR2



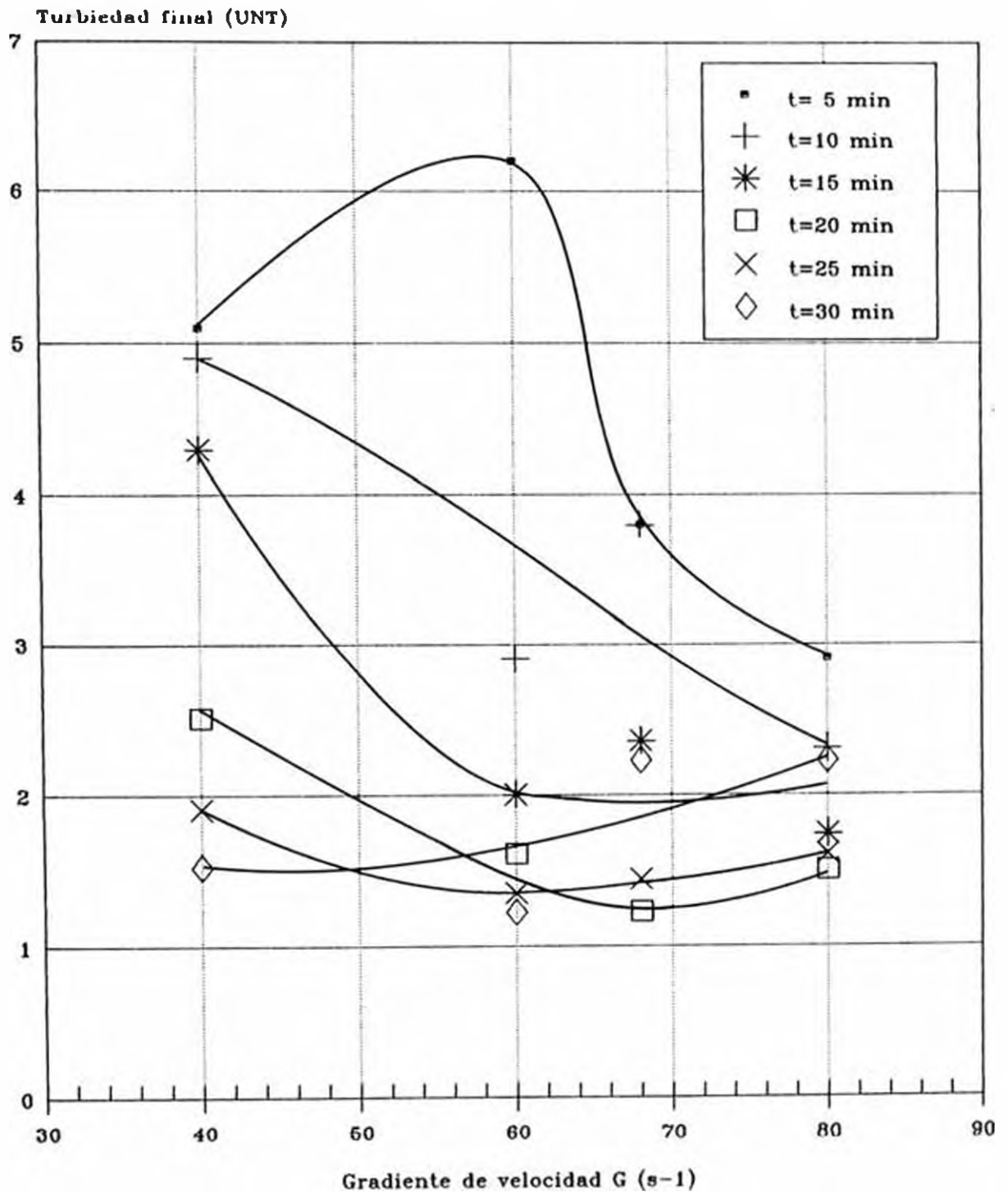
Agua tipo: II  
Proceso Magnetita-Sulfato

Figura N 7-42  
GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION



Agua tipo: II  
Proceso Magnetita-Sulfato

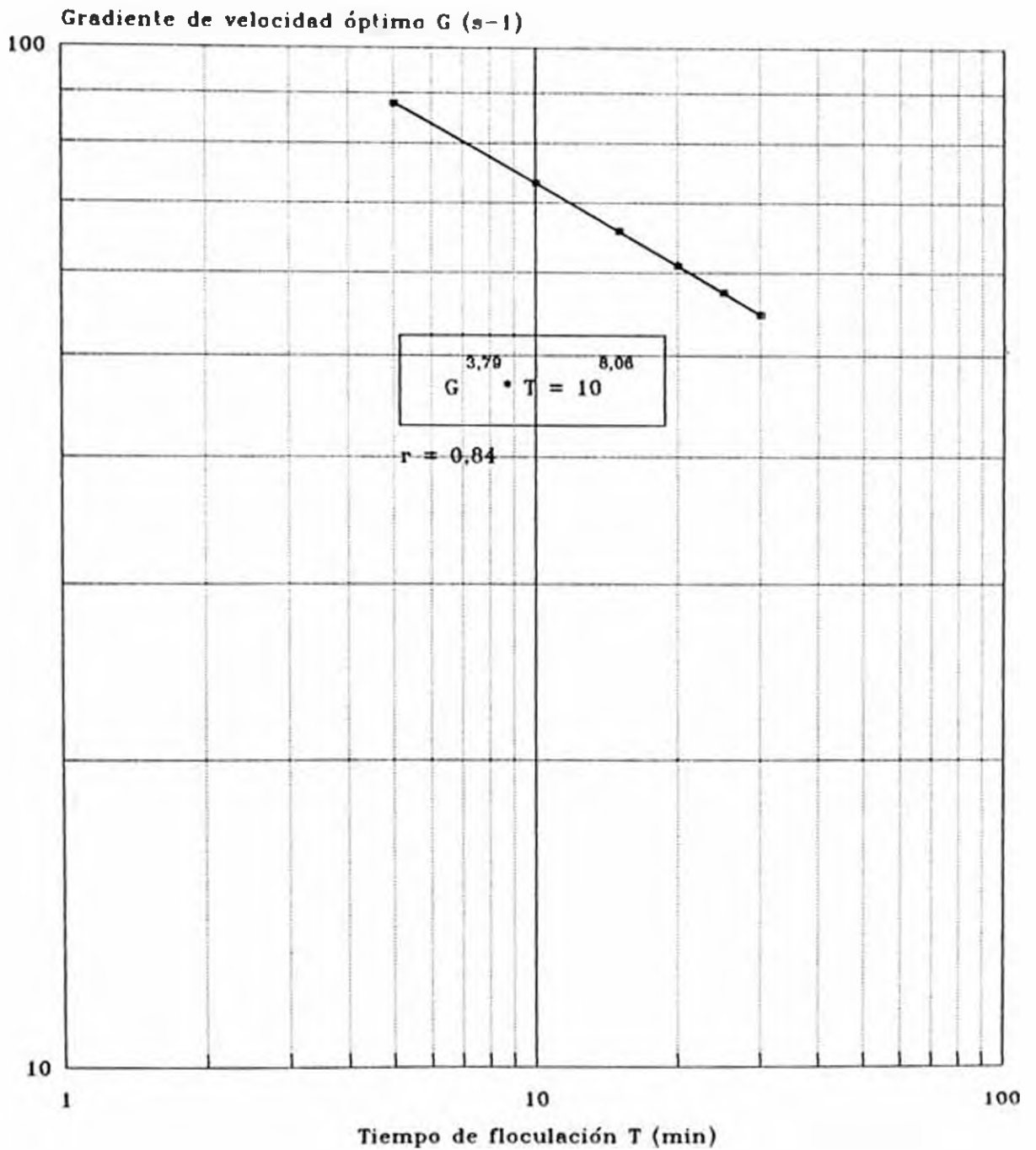
Figura N 7-43  
**TURBIEDAD FINAL vs GRADIENTE DE VELOCIDAD**



Agua tipo: II  
 Proceso Magnetita-Sulfato

Figura N 7-44

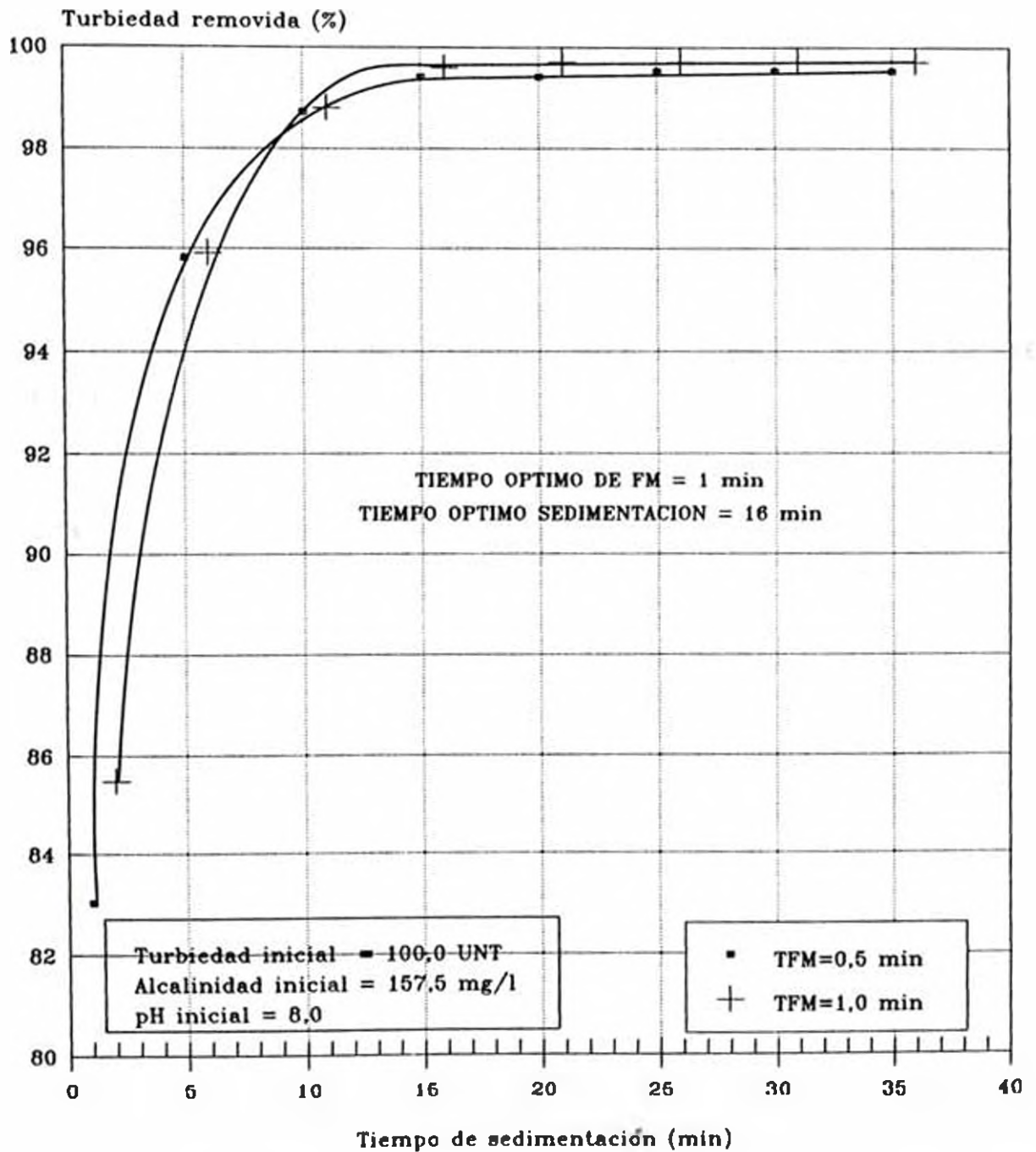
VARIACION DEL GRADIENTE DE VELOCIDAD OPTIMO EN FUNCION DEL TIEMPO DE FLOCULACION



Agua tipo: II  
Proceso Magnetita-Sulfato

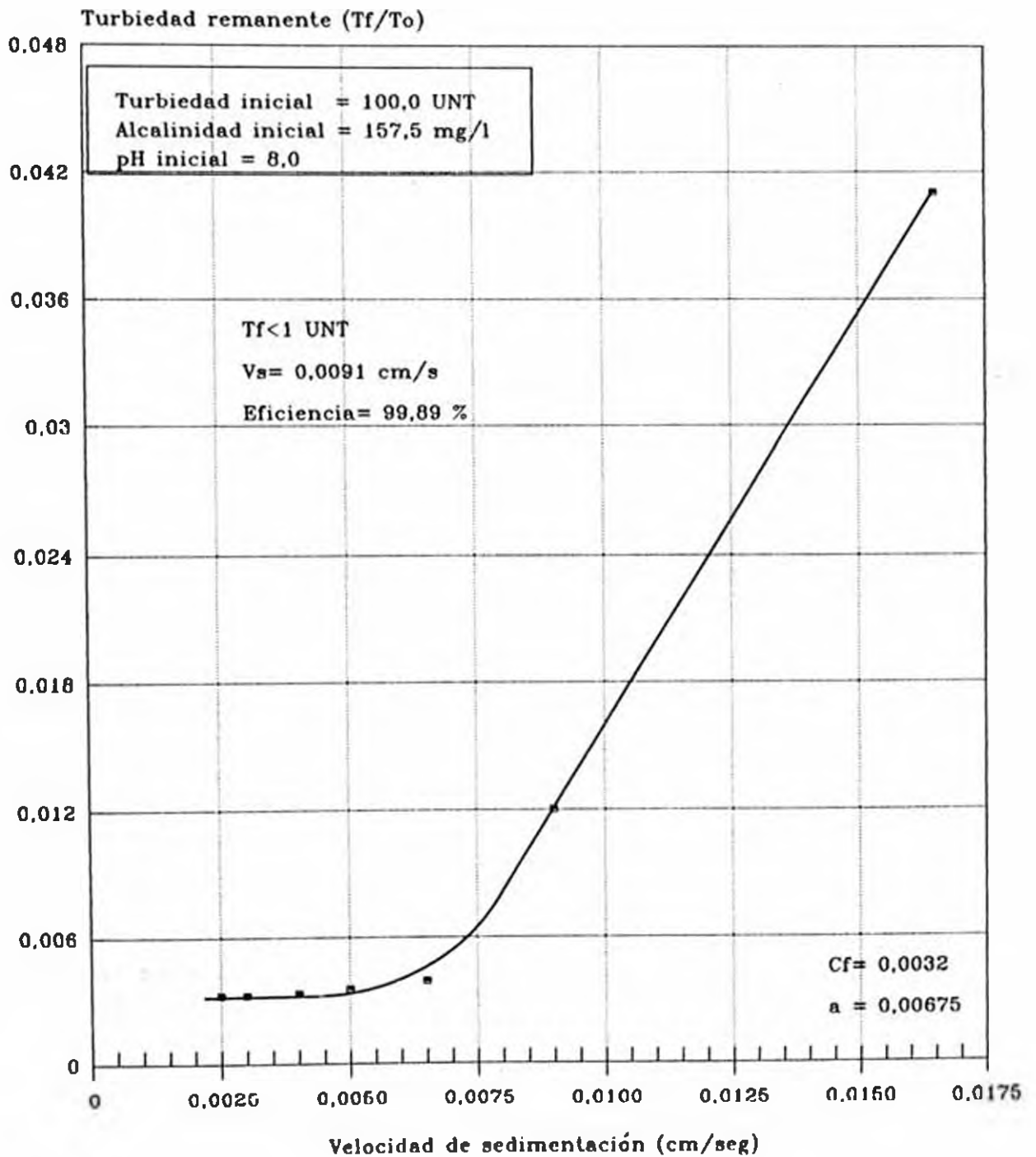


Figura N 7-45  
**TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION MAGNETICA  
 Y SEDIMENTACION**



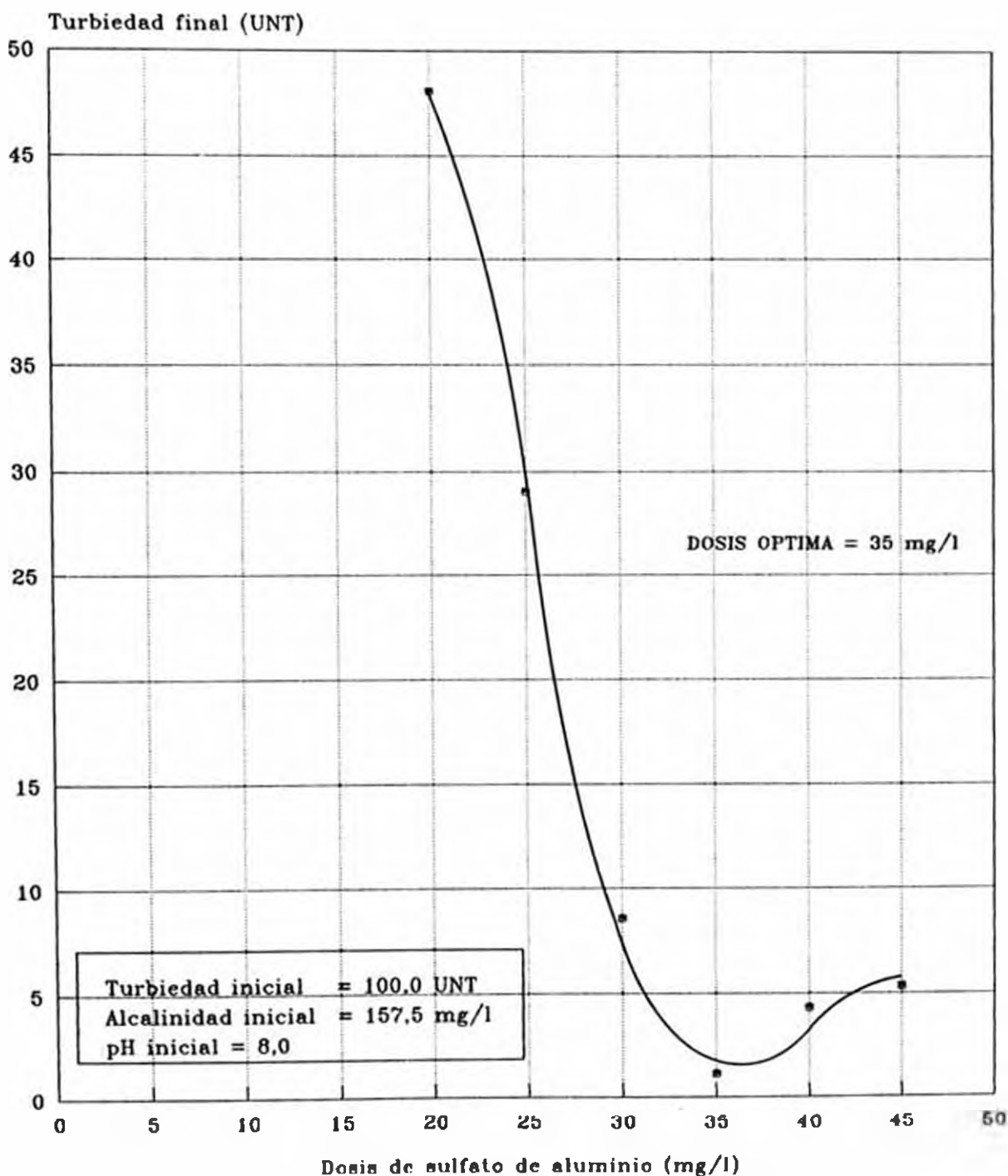
Agua tipo: II  
 Proceso Magnetita-Sulfato

Figura N 7-48  
**EFICIENCIA DE SEDIMENTABILIDAD**



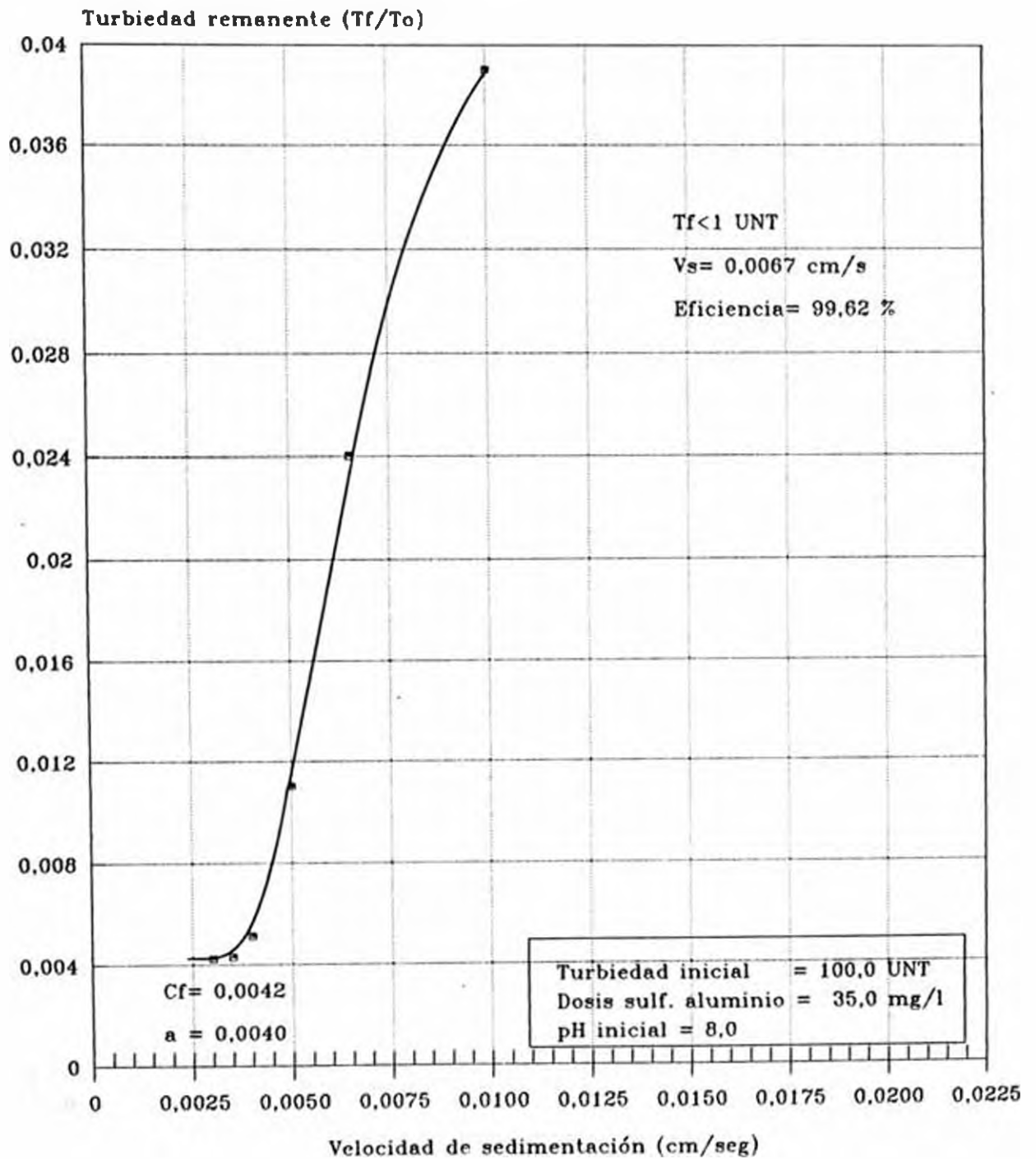
Agua tipo: II  
 Proceso Magnetita-Sulfato

Figura N 7-47  
**DOSIS OPTIMA DE SULFATO DE ALUMINIO**



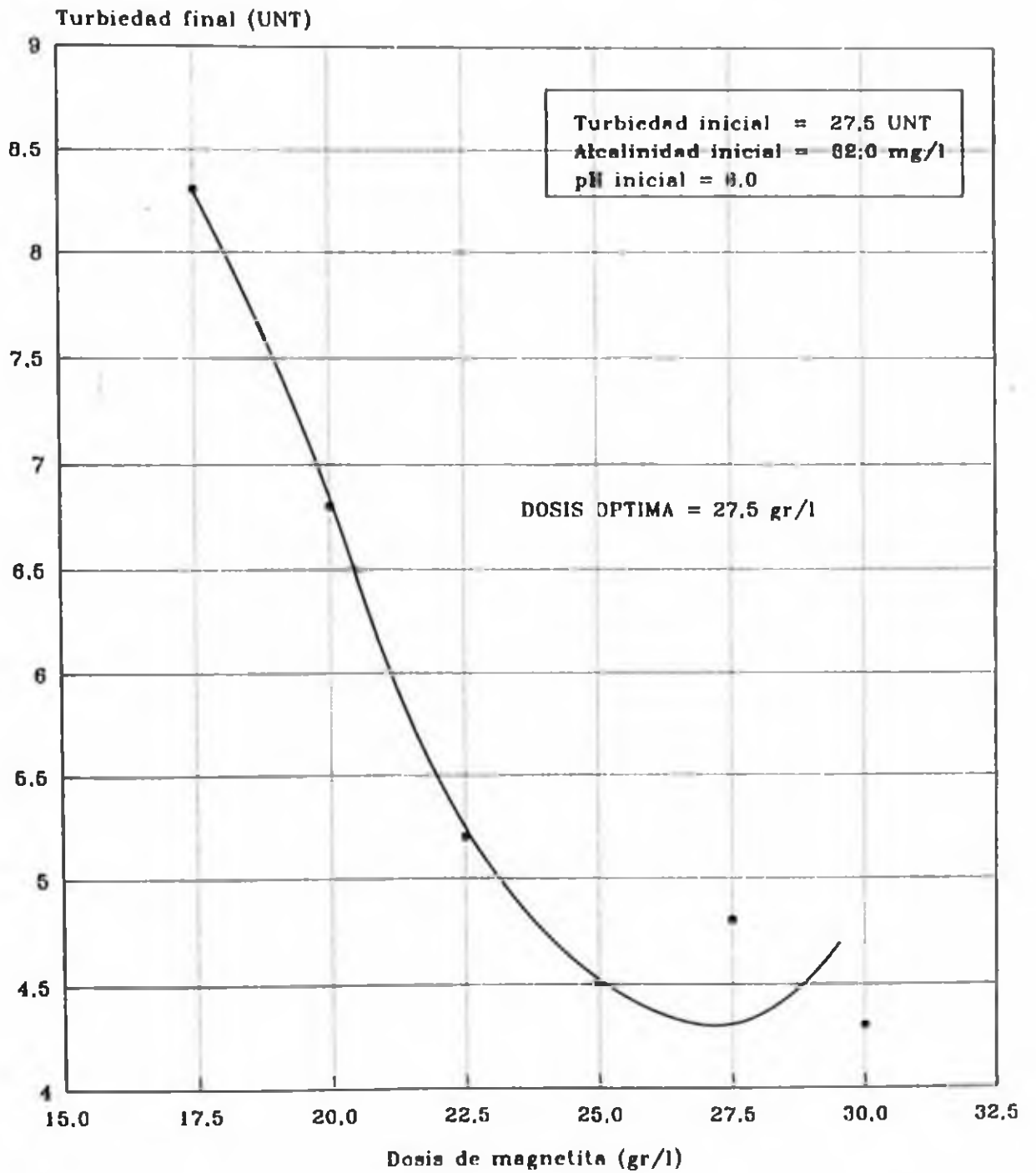
Agua tipo: II  
 Proceso Sulfato de Aluminio

Figura N 7-48  
**EFICIENCIA DE SEDIMENTABILIDAD**



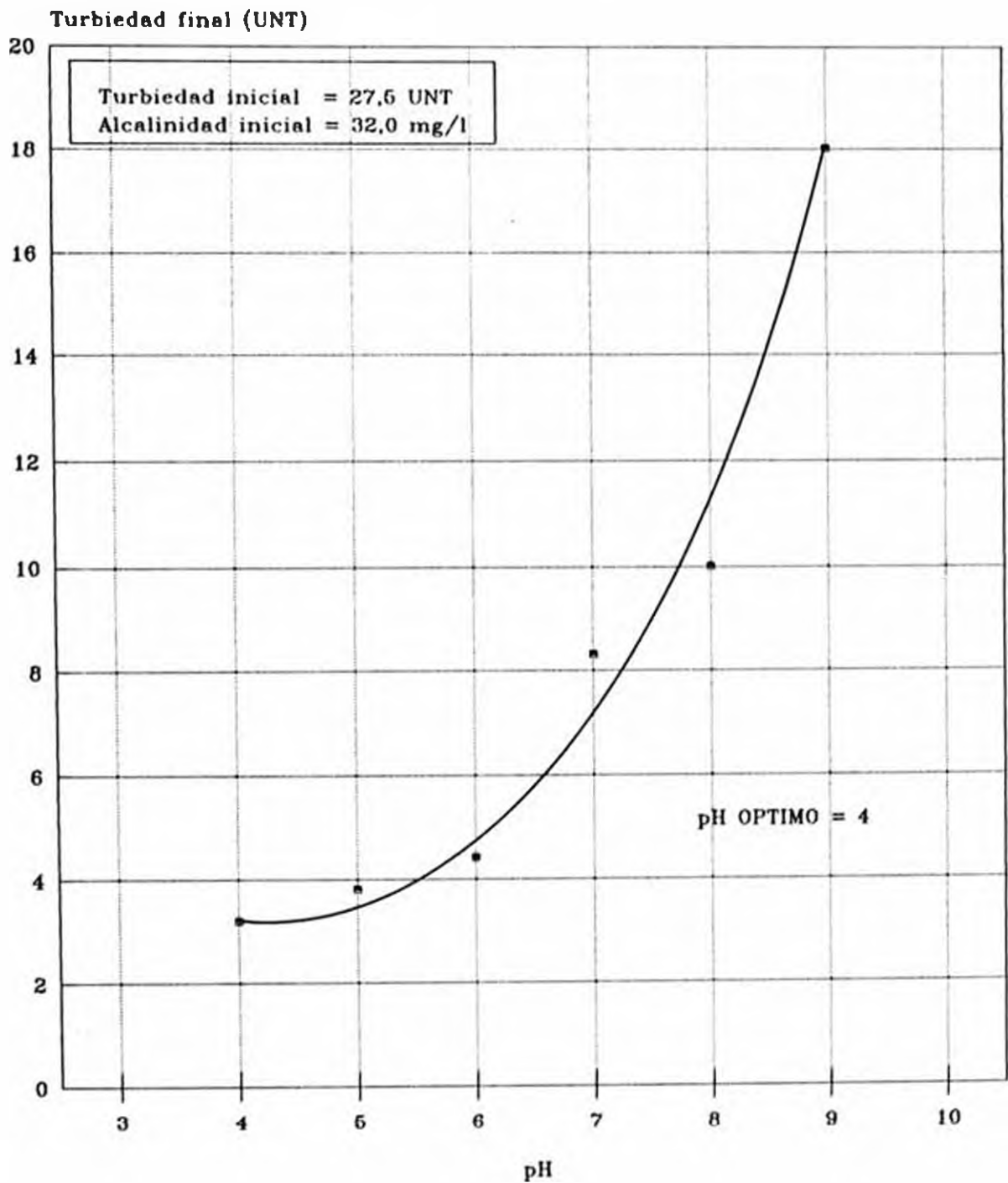
Agua tipo: II  
 Proceso Sulfato de Aluminio

Figura N 7-49  
**DOSIS OPTIMA DE MAGNETITA**



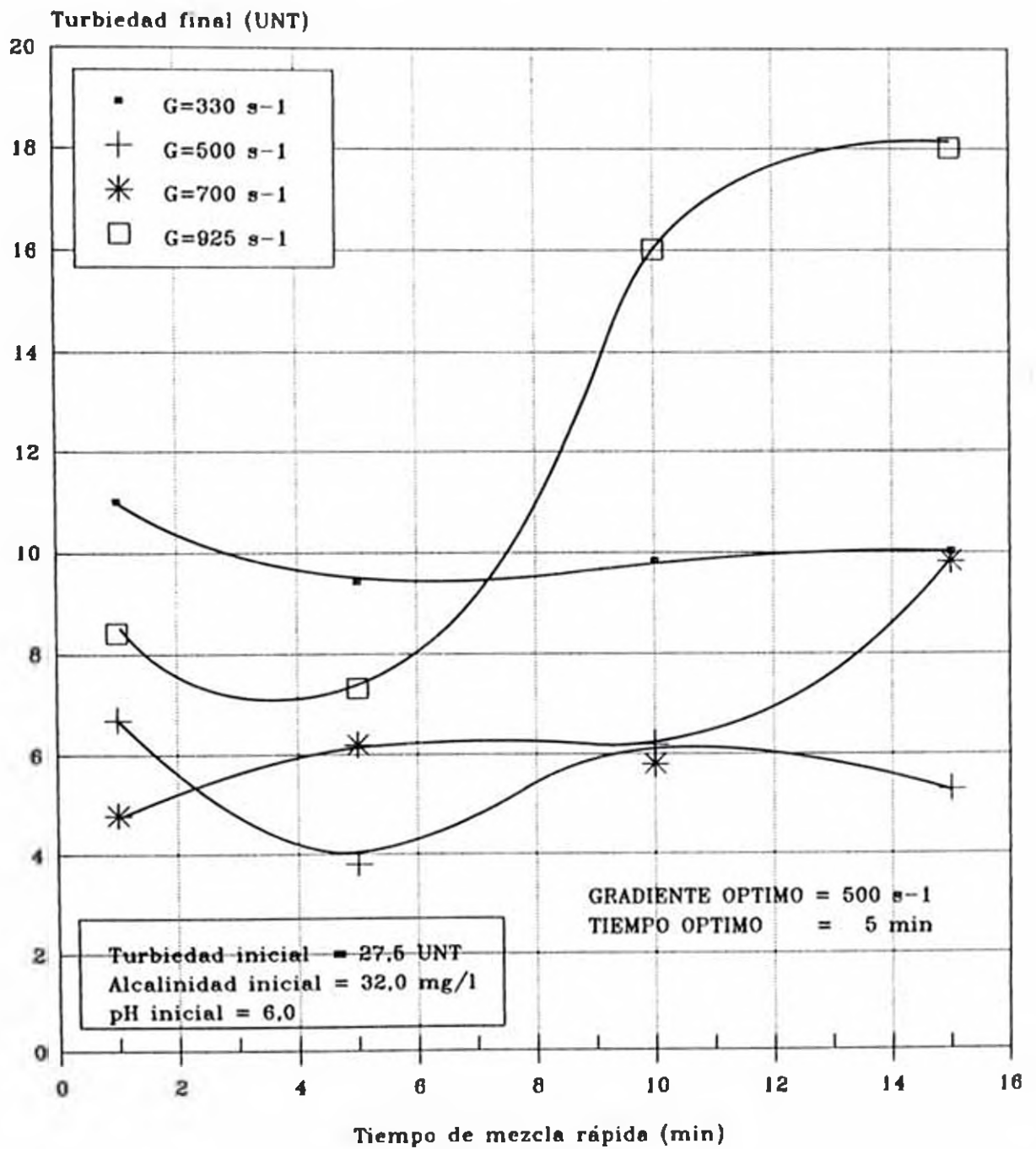
Agua tipo: III  
 Proceso Magnetita

Figura N 7-60  
pH OPTIMO



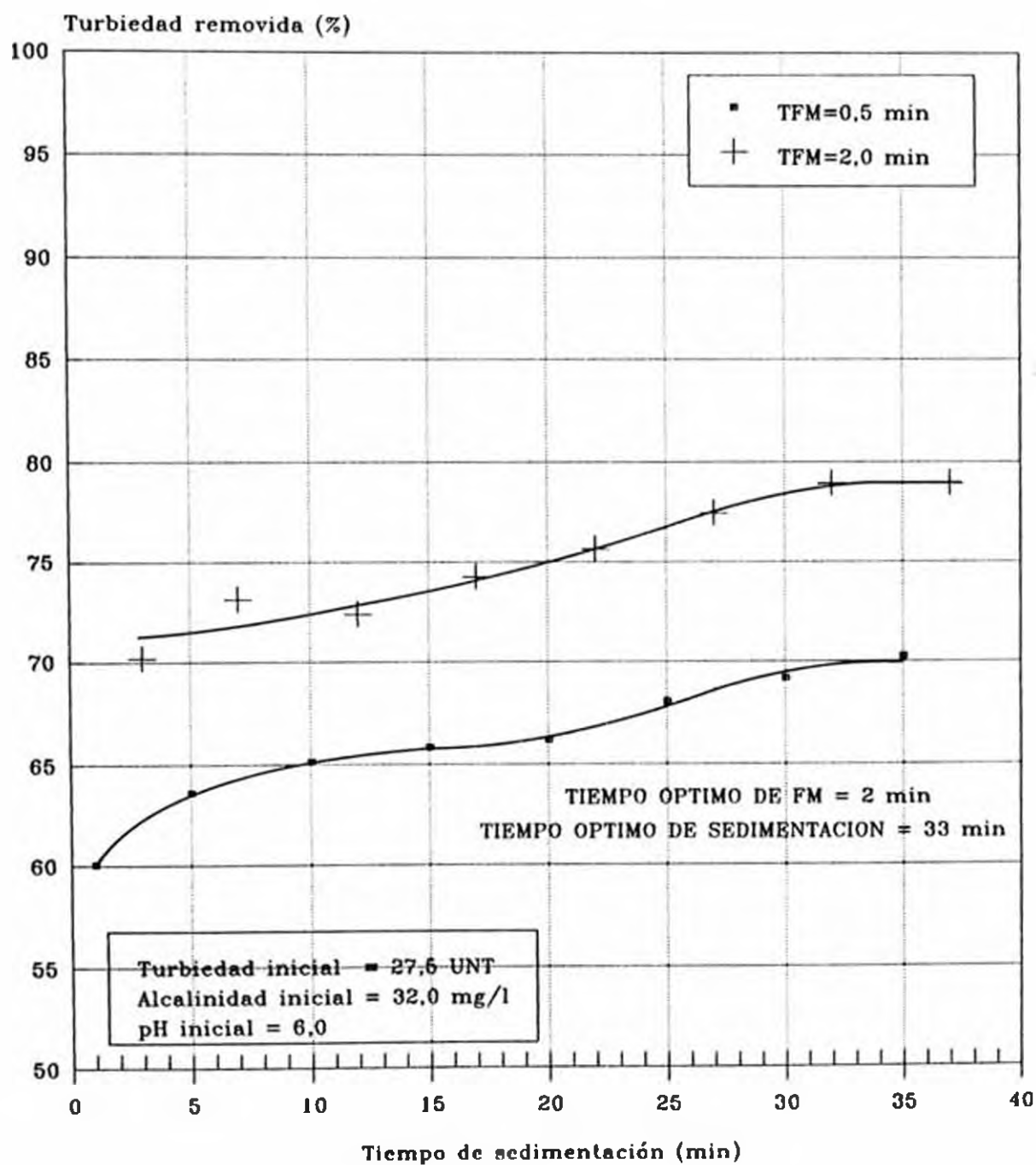
Agua tipo: III  
Proceso Magnetita

Figura N 7-51  
GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO  
DE MEZCLA RAPIDA



Agua tipo: III  
Proceso Magnetita

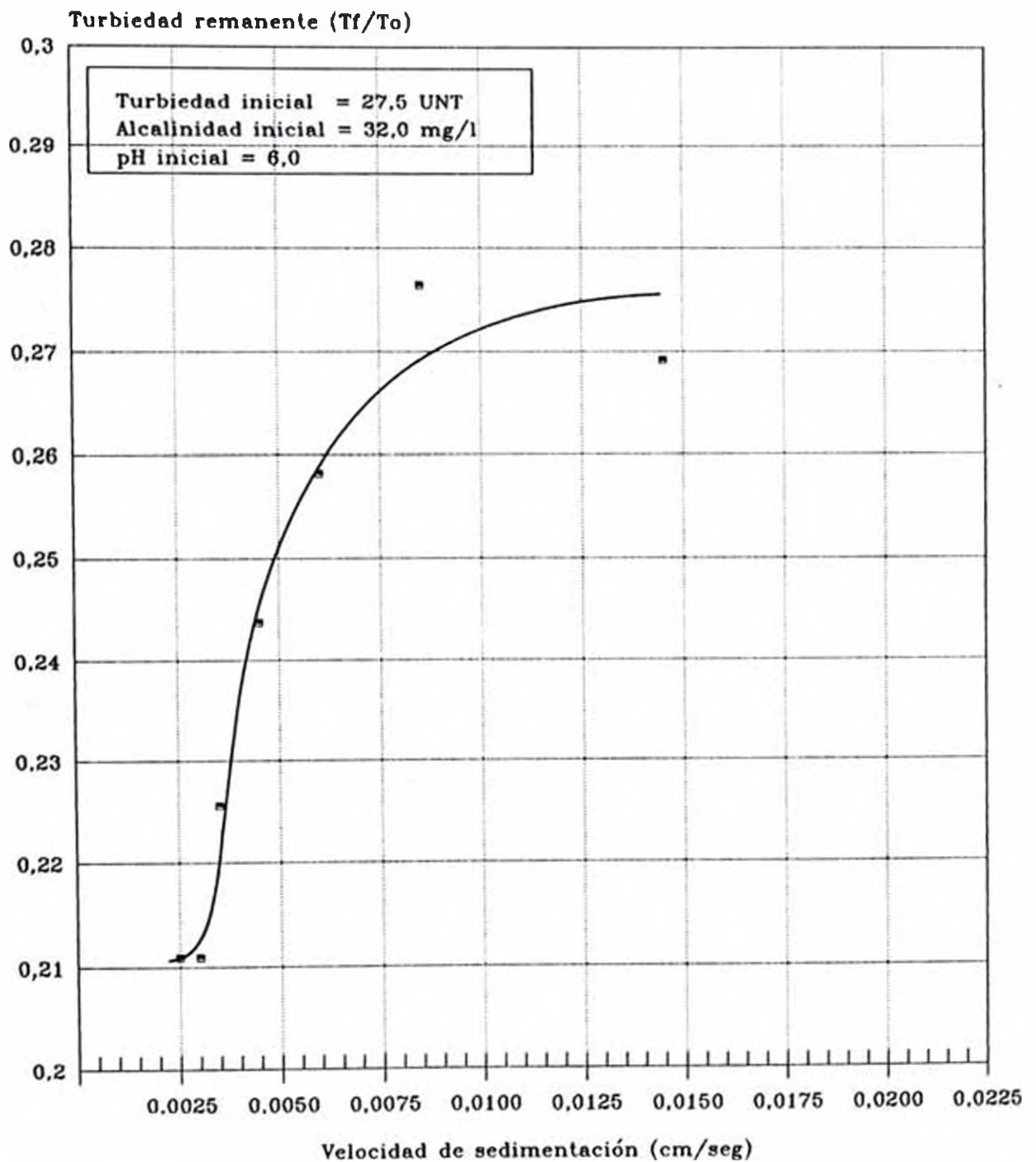
Figura N 7-52  
**TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION MAGNETICA  
 Y SEDIMENTACION**



Agua tipo: III  
 Proceso Magnetita

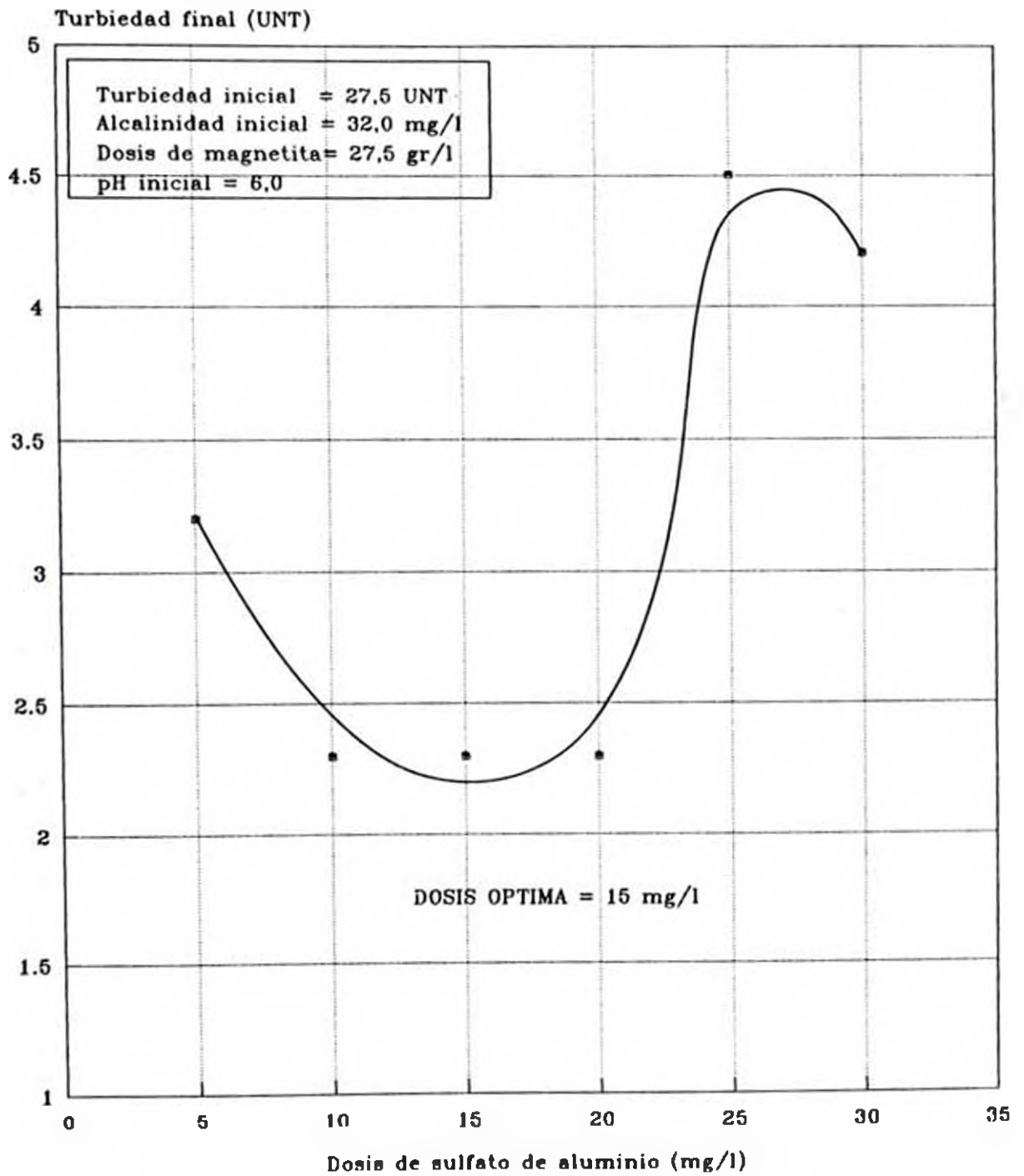


Figura N 7-63  
**EFICIENCIA DE SEDIMENTABILIDAD**



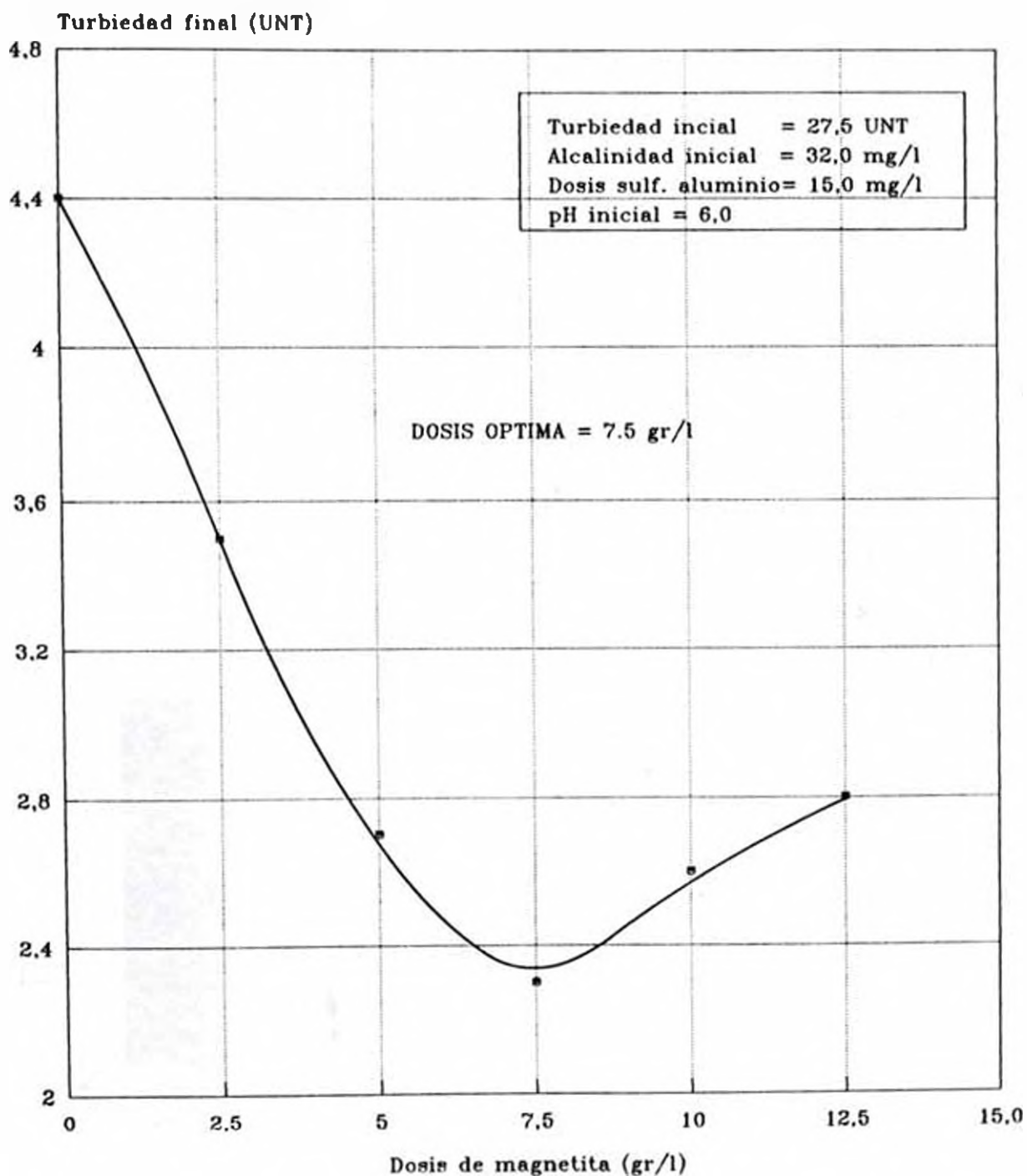
Agua tipo: III  
 Proceso Magnetita

Figura N 7-64  
**DOSIS OPTIMA DE SULFATO DE ALUMINIO**



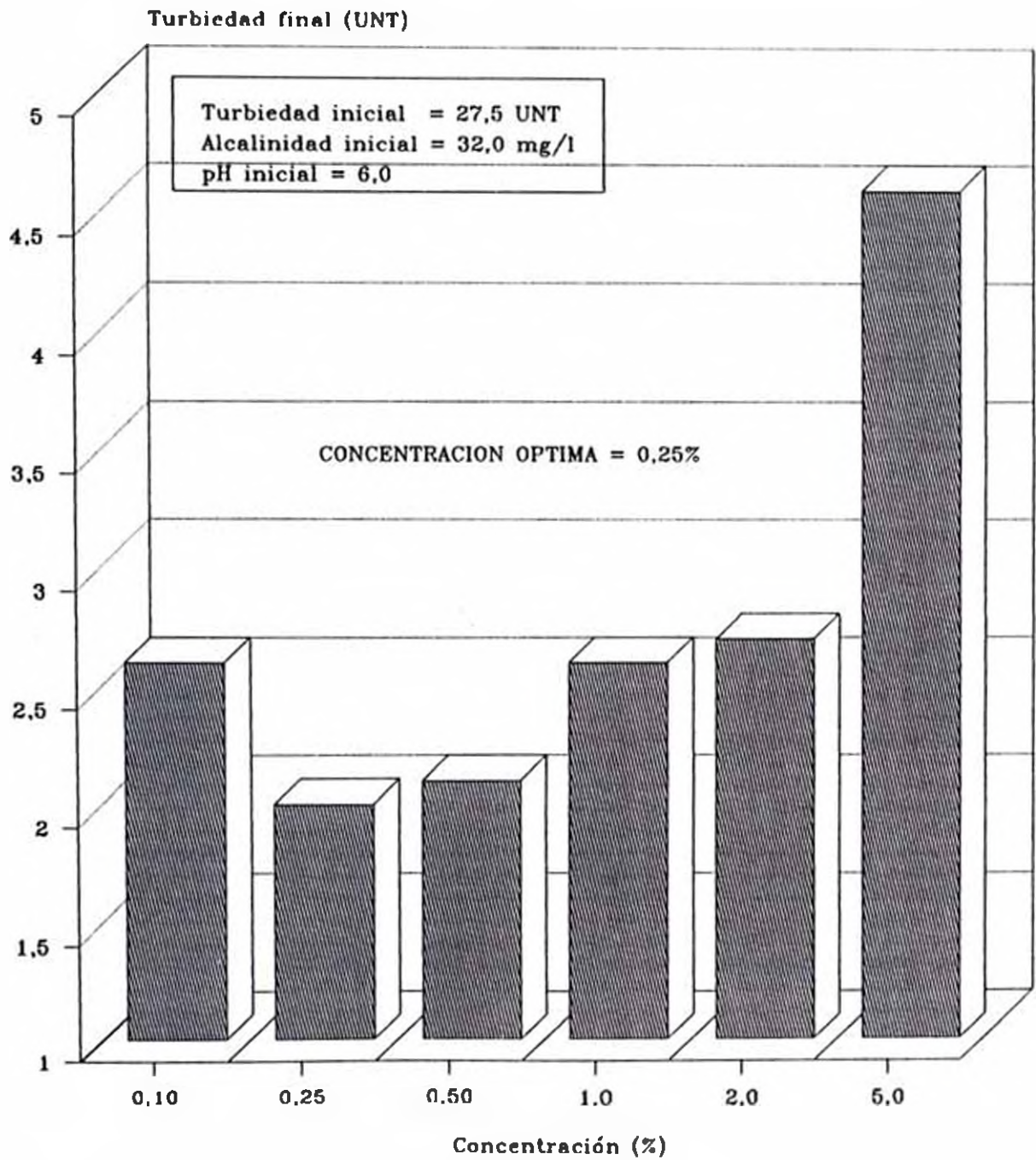
Agua tipo: III  
 Proceso Magnetita-Sulfato

Figura N 7-55  
 NUEVA DOSIS OPTIMA DE MAGNETITA



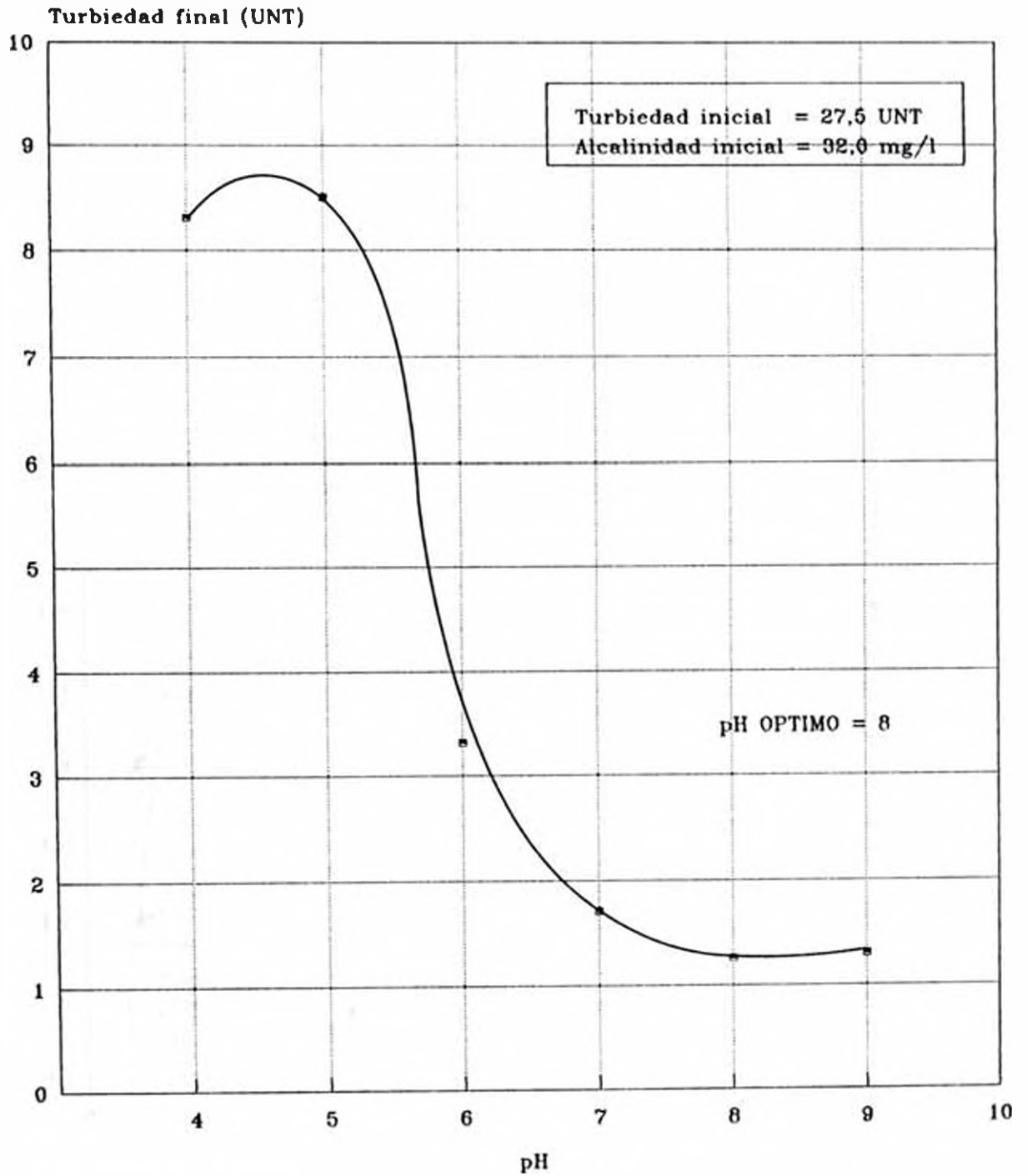
Agua tipo: III  
 Proceso Magnetita-Sulfato

Figura N 7-56  
**CONCENTRACION OPTIMA DE  
 SULFATO DE ALUMINIO**



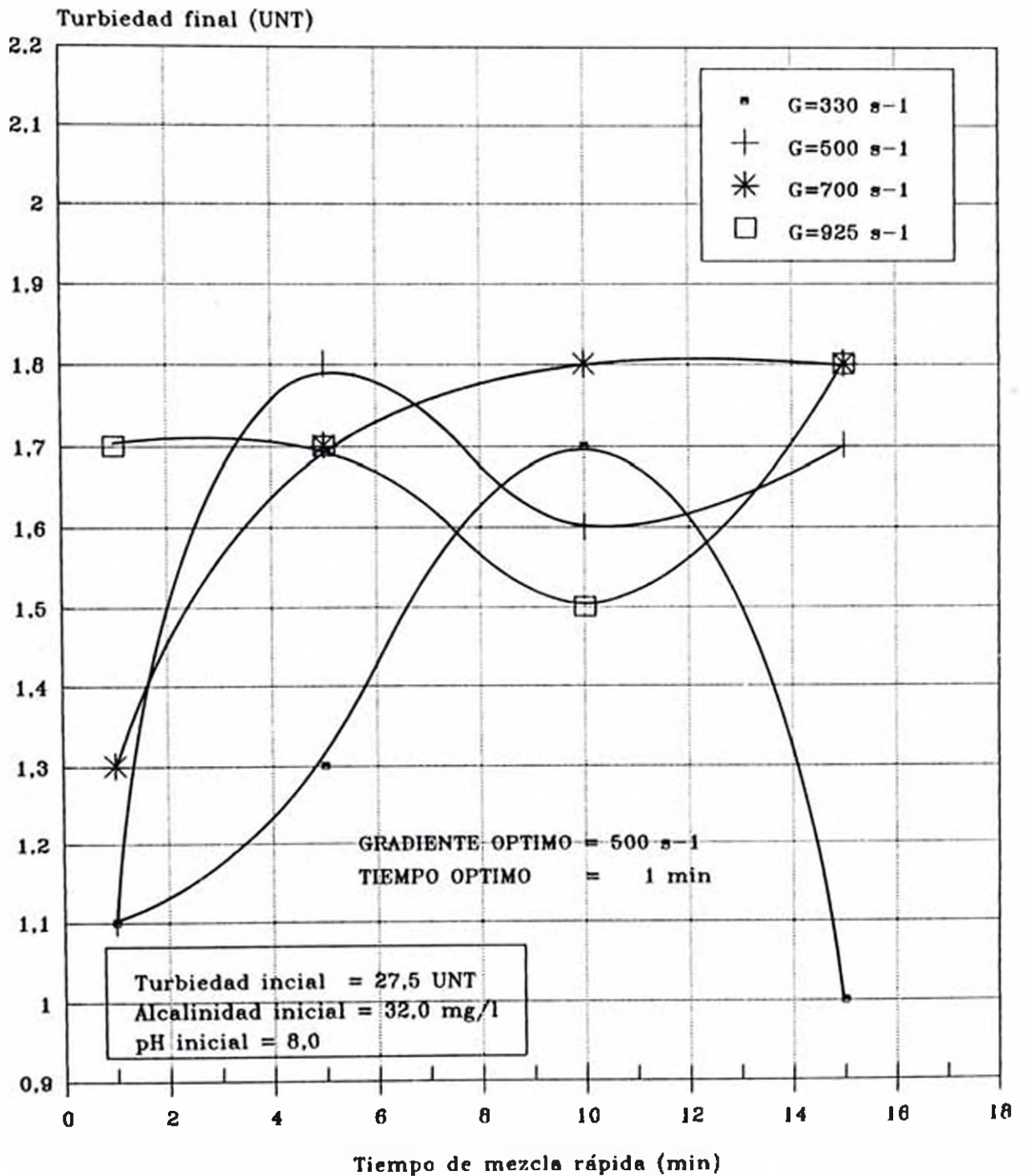
Agua tipo: III  
 Proceso Magnetita-Sulfato

Figura N 7-57  
pH OPTIMO



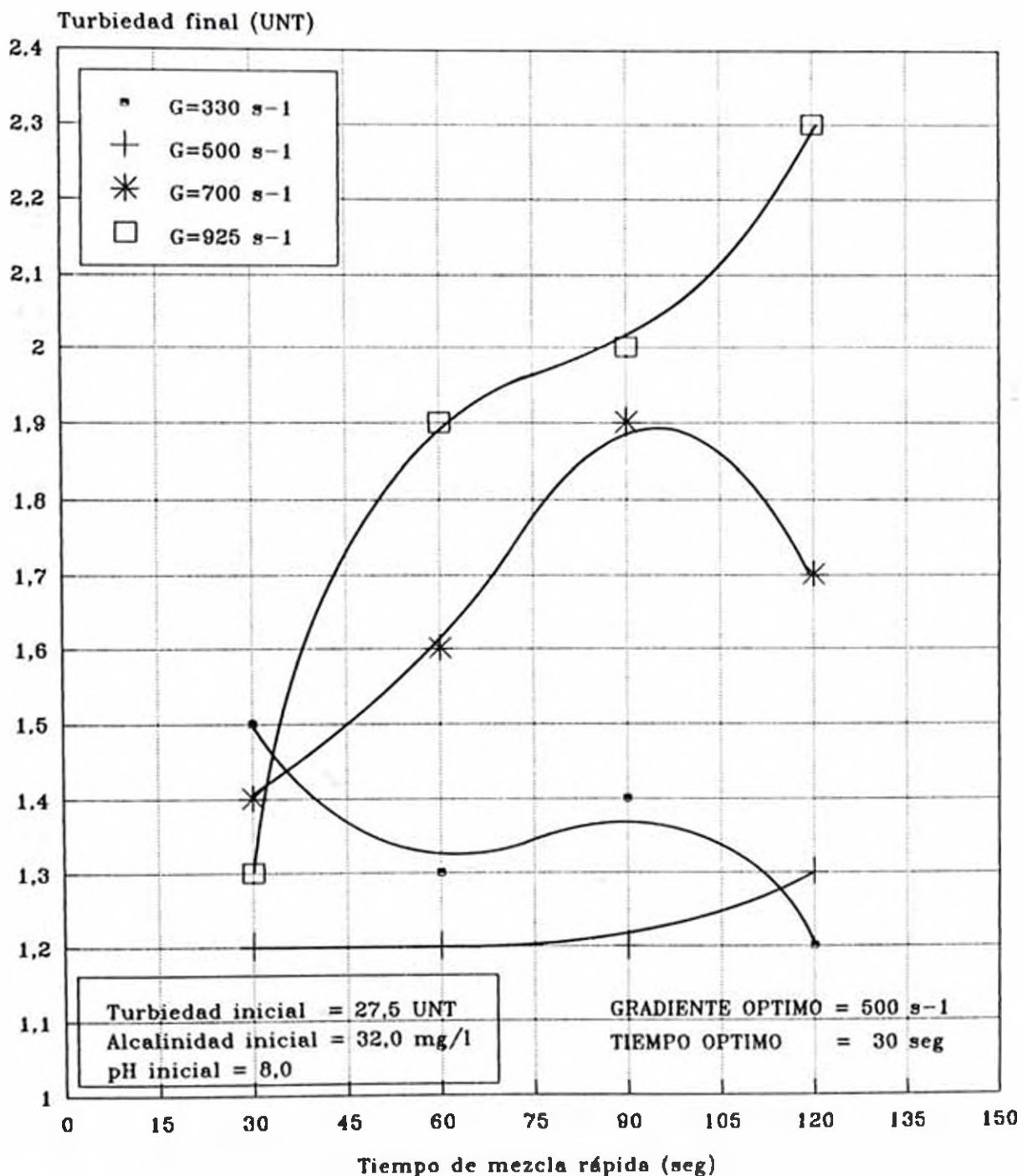
Agua tipo: III  
Proceso Magnetita-Sulfato

Figura N 7-58  
GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR1



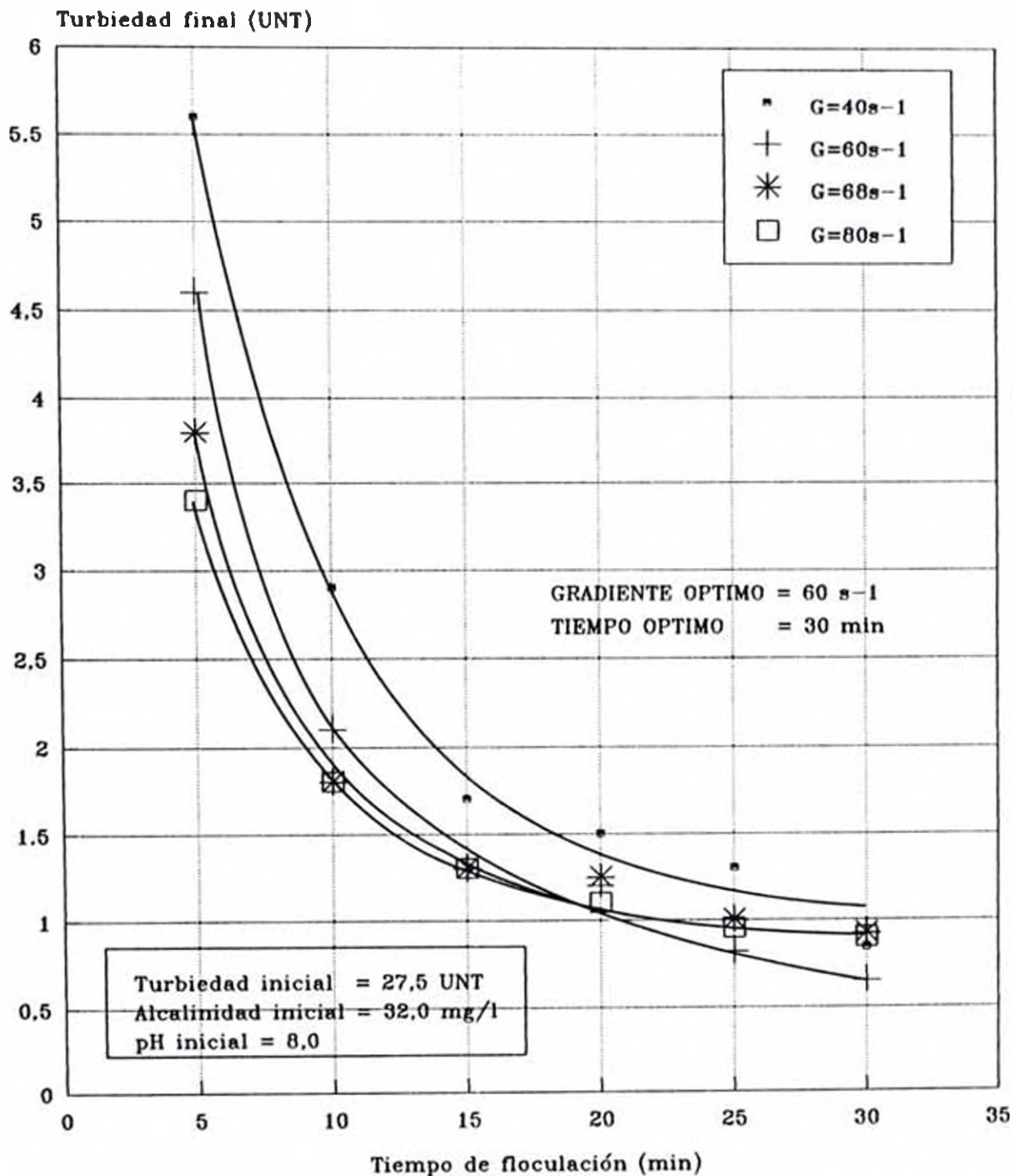
Agua tipo: III  
Proceso Magnetita-Sulfato

Figura N 7-59  
GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR2



Agua tipo: III  
Proceso Magnetita-Sulfato

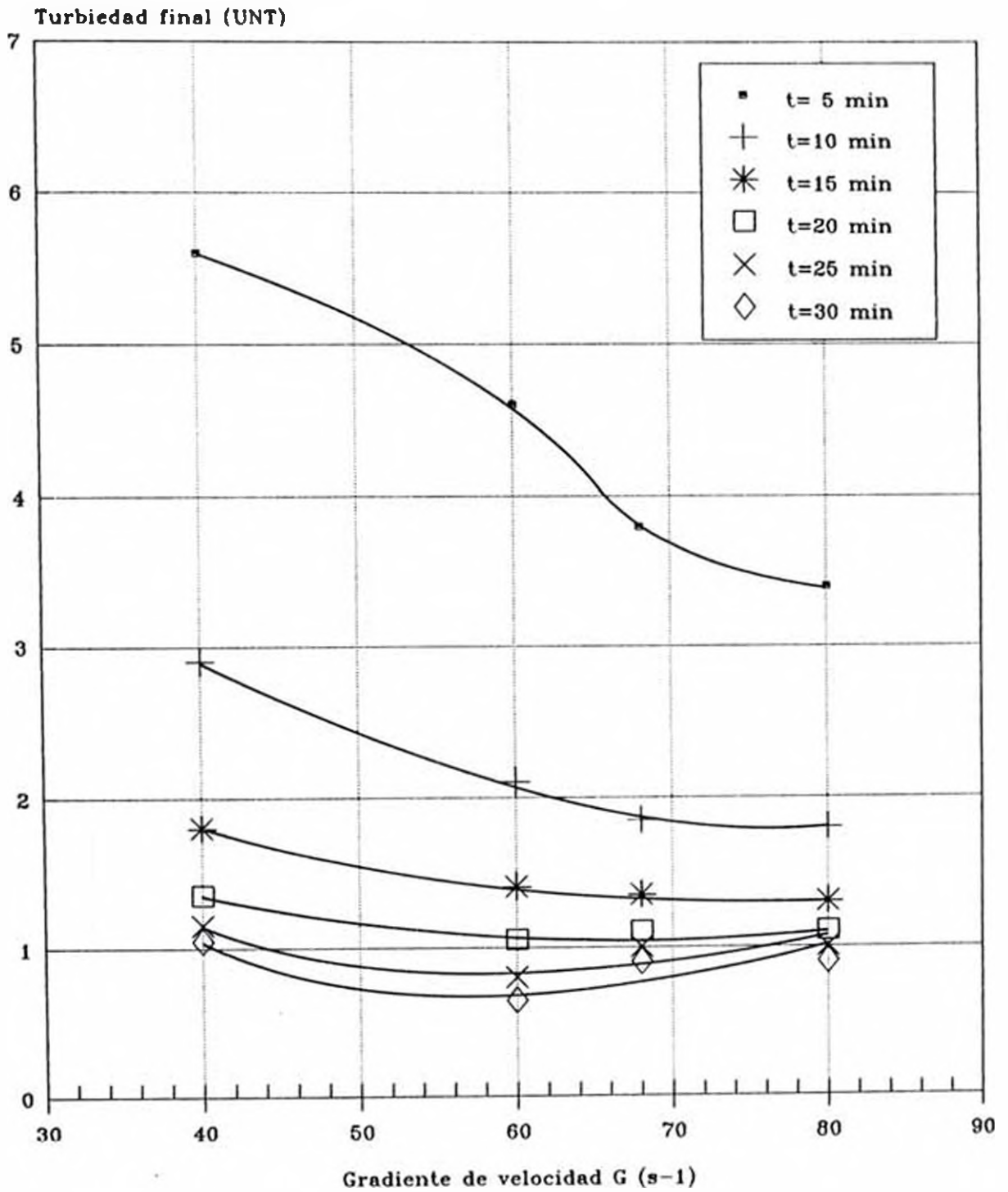
Figura N 7-60  
GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION



Agua tipo: III  
Proceso Magnetita-Sulfato



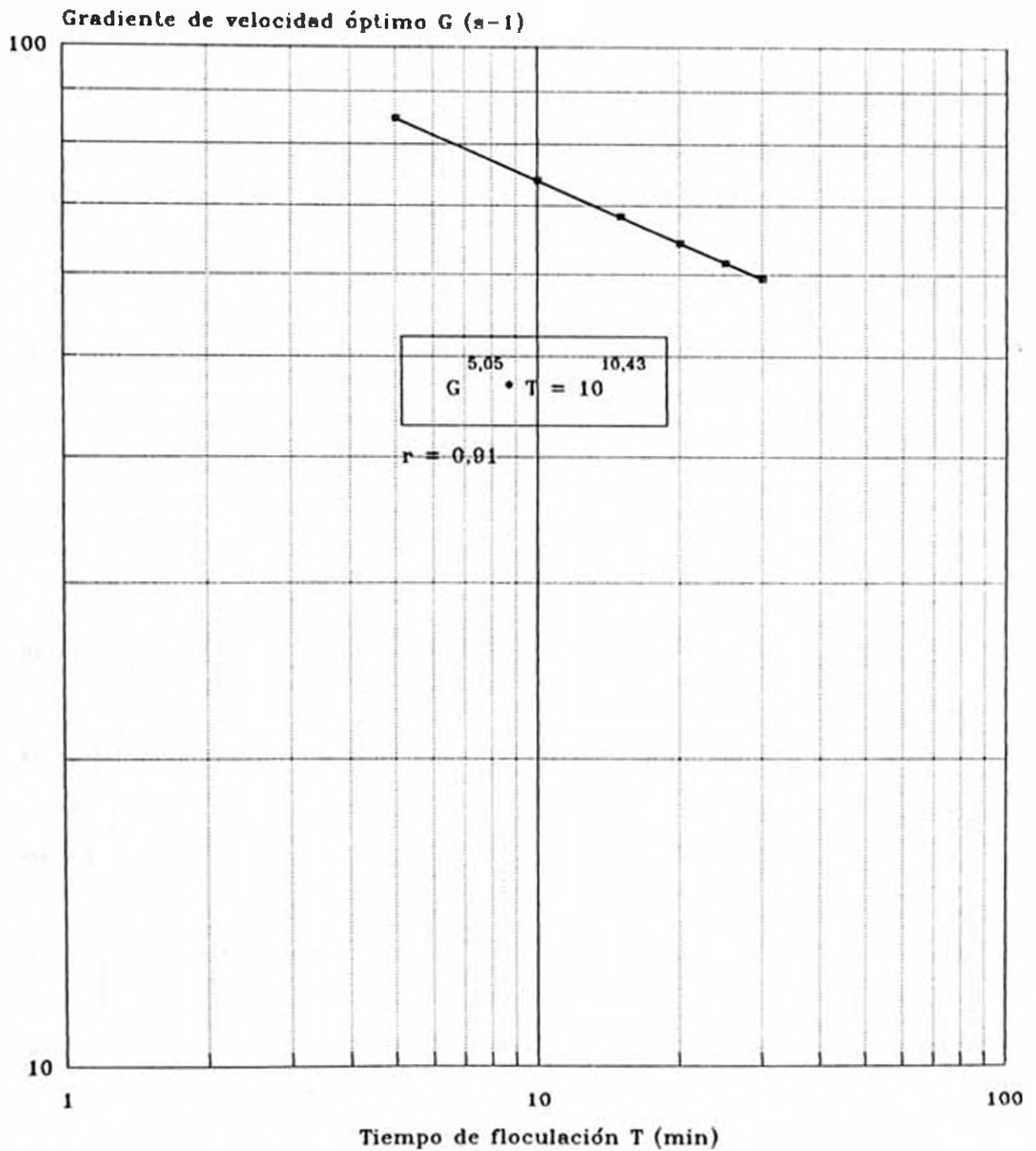
Figura N 7-61  
**TURBIEDAD FINAL vs GRADIENTE DE VELOCIDAD**



Agua tipo: III  
 Proceso Magnetita-Sulaflo

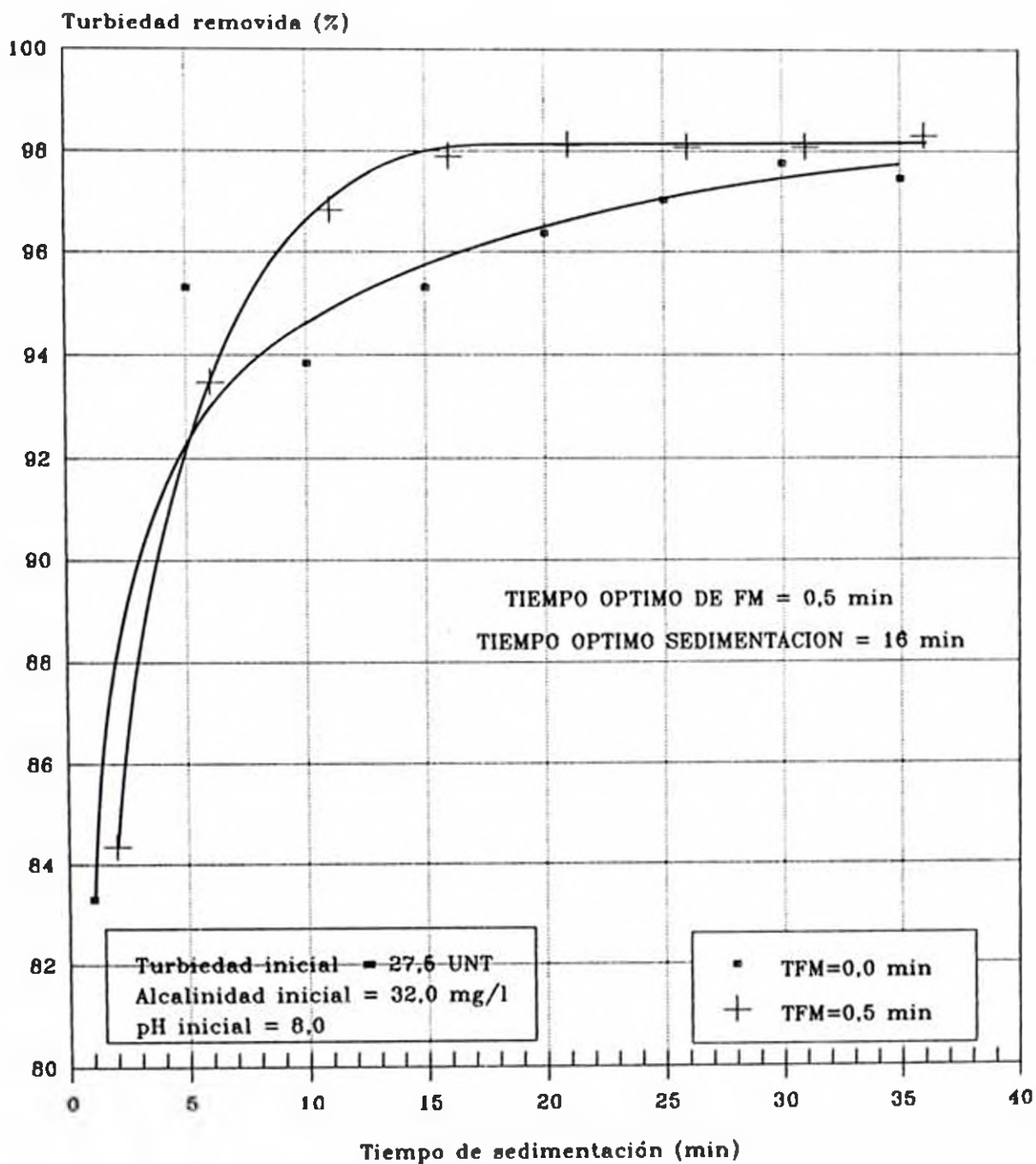
Figura N 7-62

VARIACION DEL GRADIENTE DE VELOCIDAD OPTIMO EN FUNCION DEL TIEMPO DE FLOCULACION



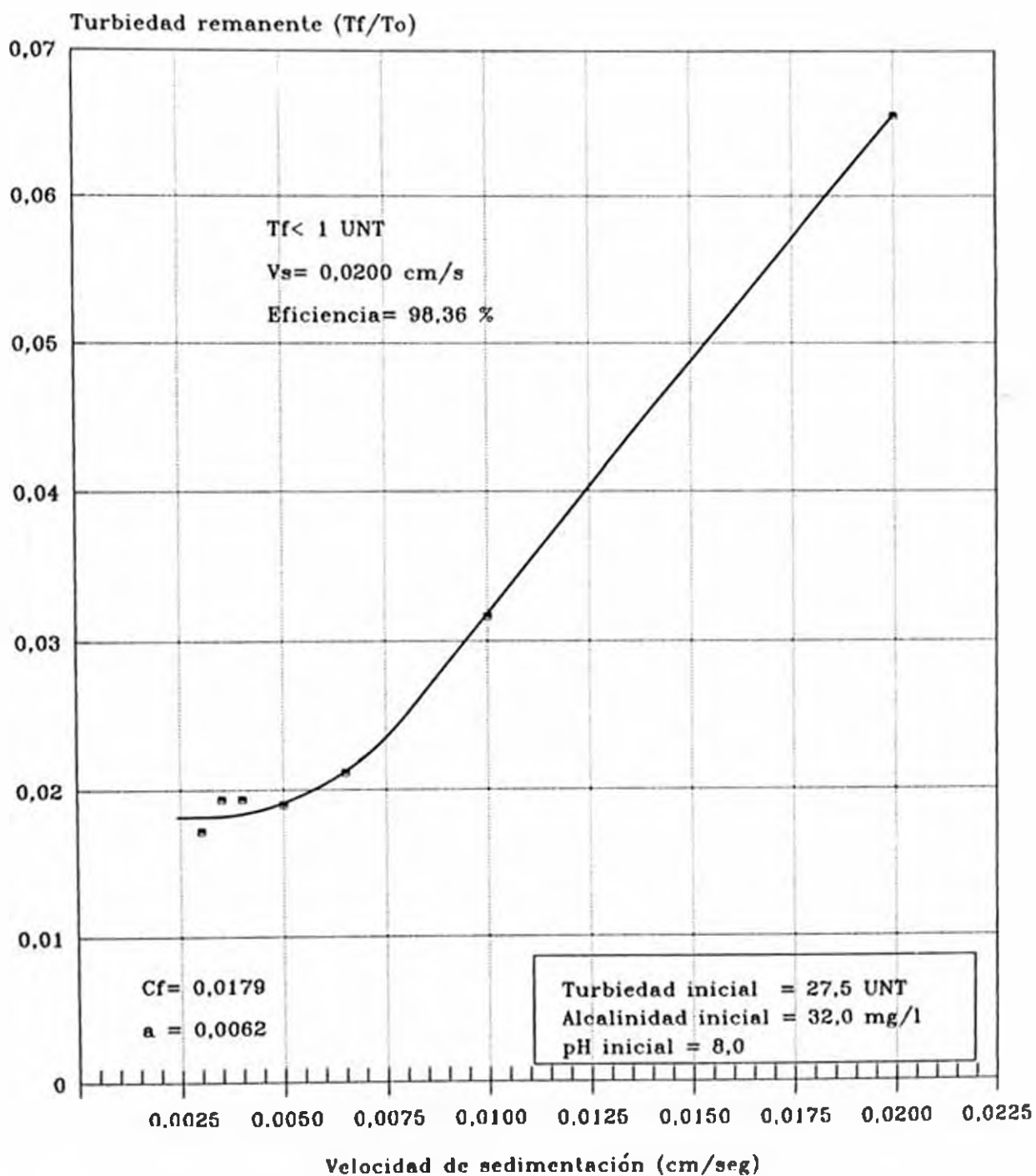
Agua tipo: III  
Proceso Magnetita-Sulfato

Figura N 7-83  
**TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION MAGNETICA  
 Y SEDIMENTACION**



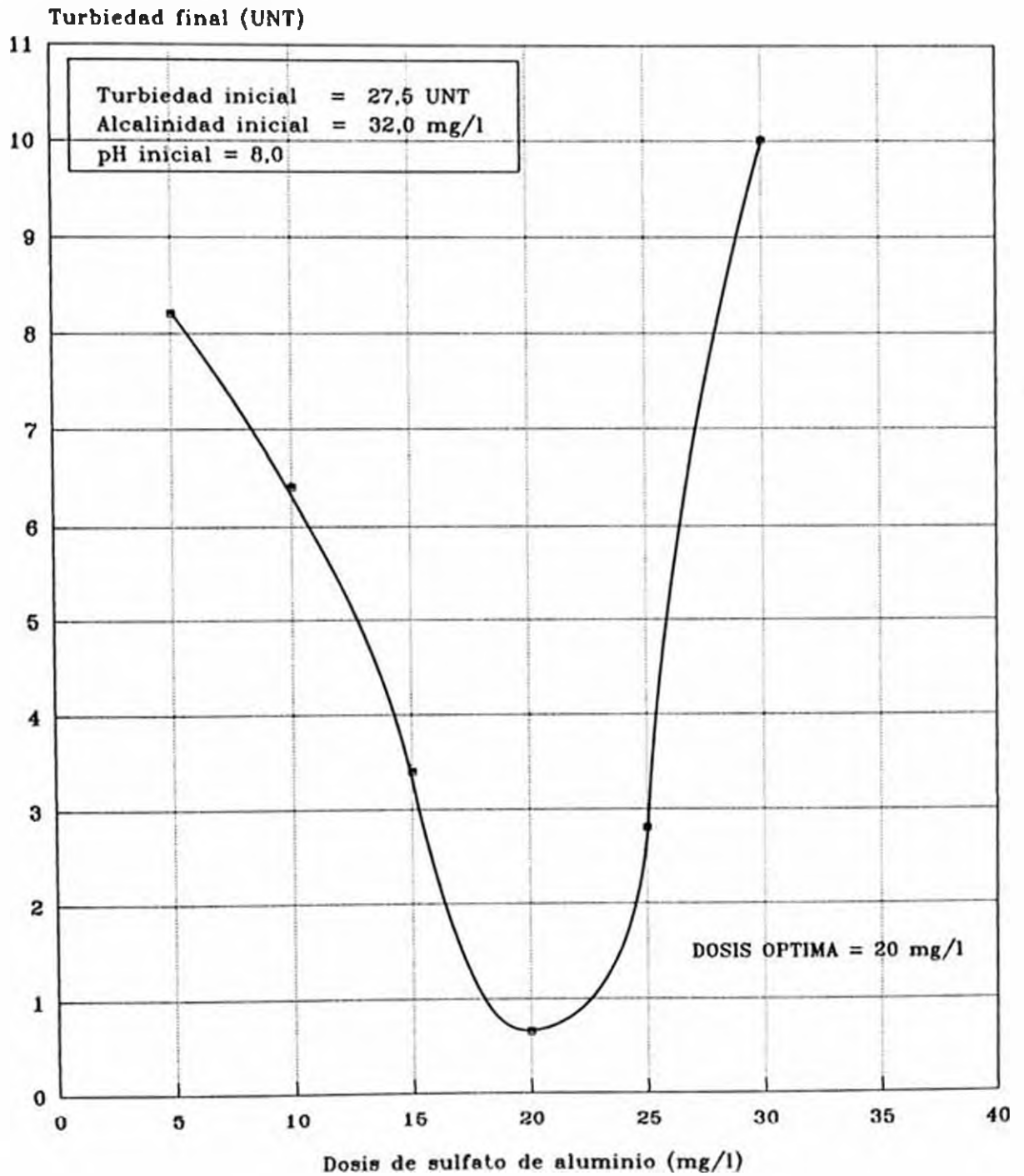
Agua tipo: III  
 Proceso Magnetita-Sulfato

Figura N 7-84  
**EFICIENCIA DE SEDIMENTABILIDAD**



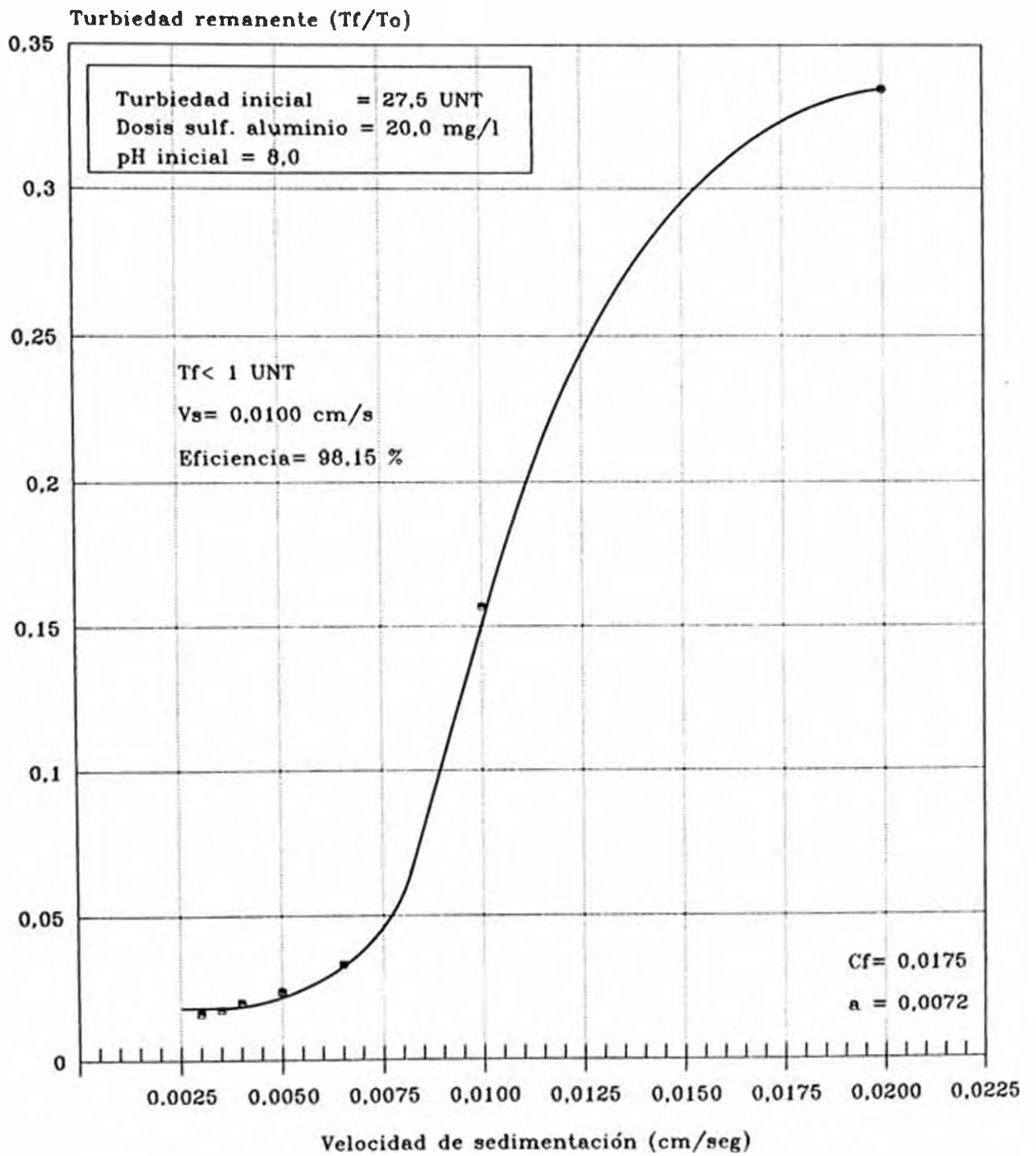
Agua tipo: III  
 Proceso Magnetita-Sulfato

Figura N 7-65  
**DOSIS OPTIMA DE SULFATO DE ALUMINIO**



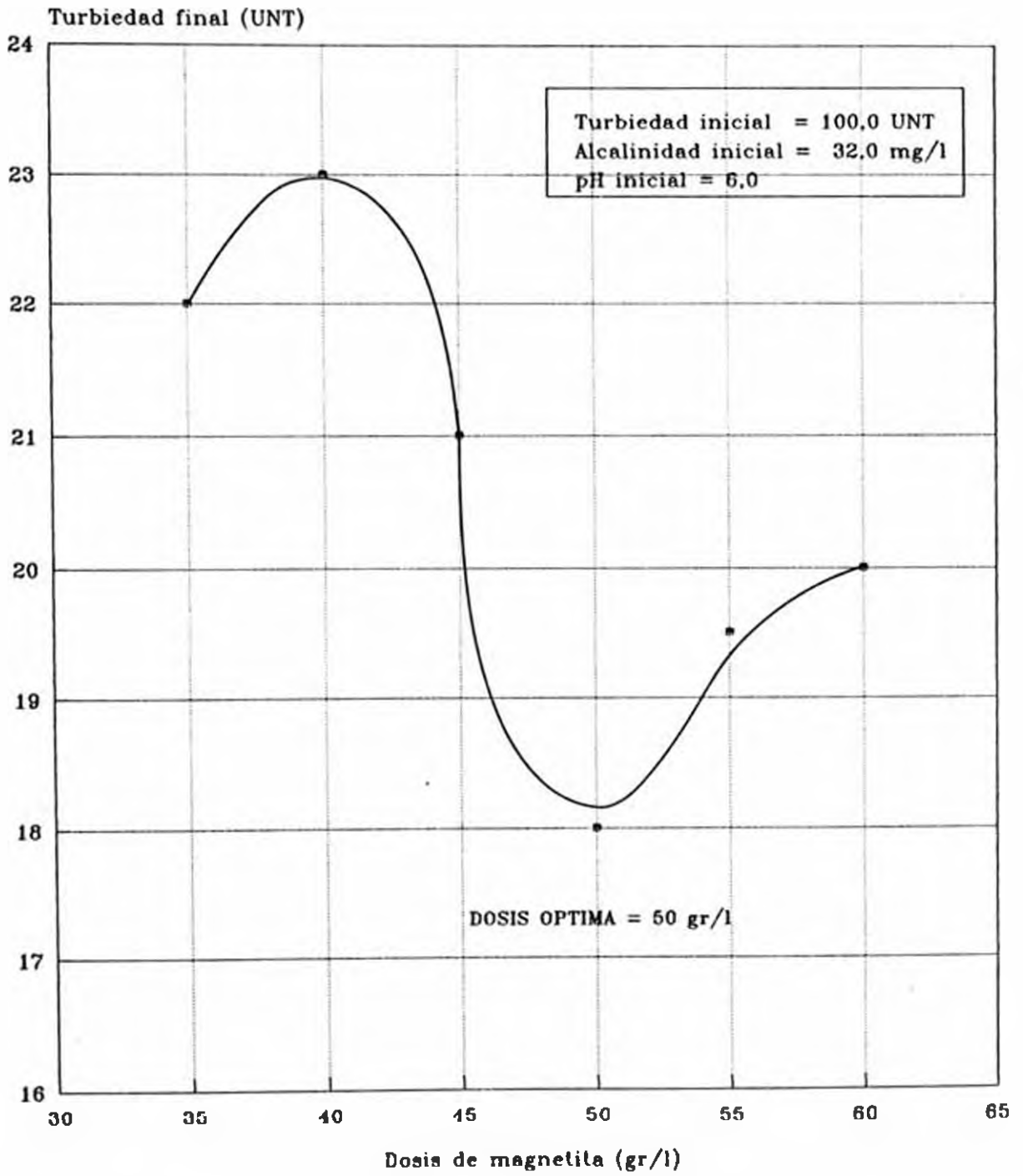
Agua tipo: III  
 Proceso Sulfato de Aluminio

Figura N 7-06  
**EFICIENCIA DE SEDIMENTABILIDAD**



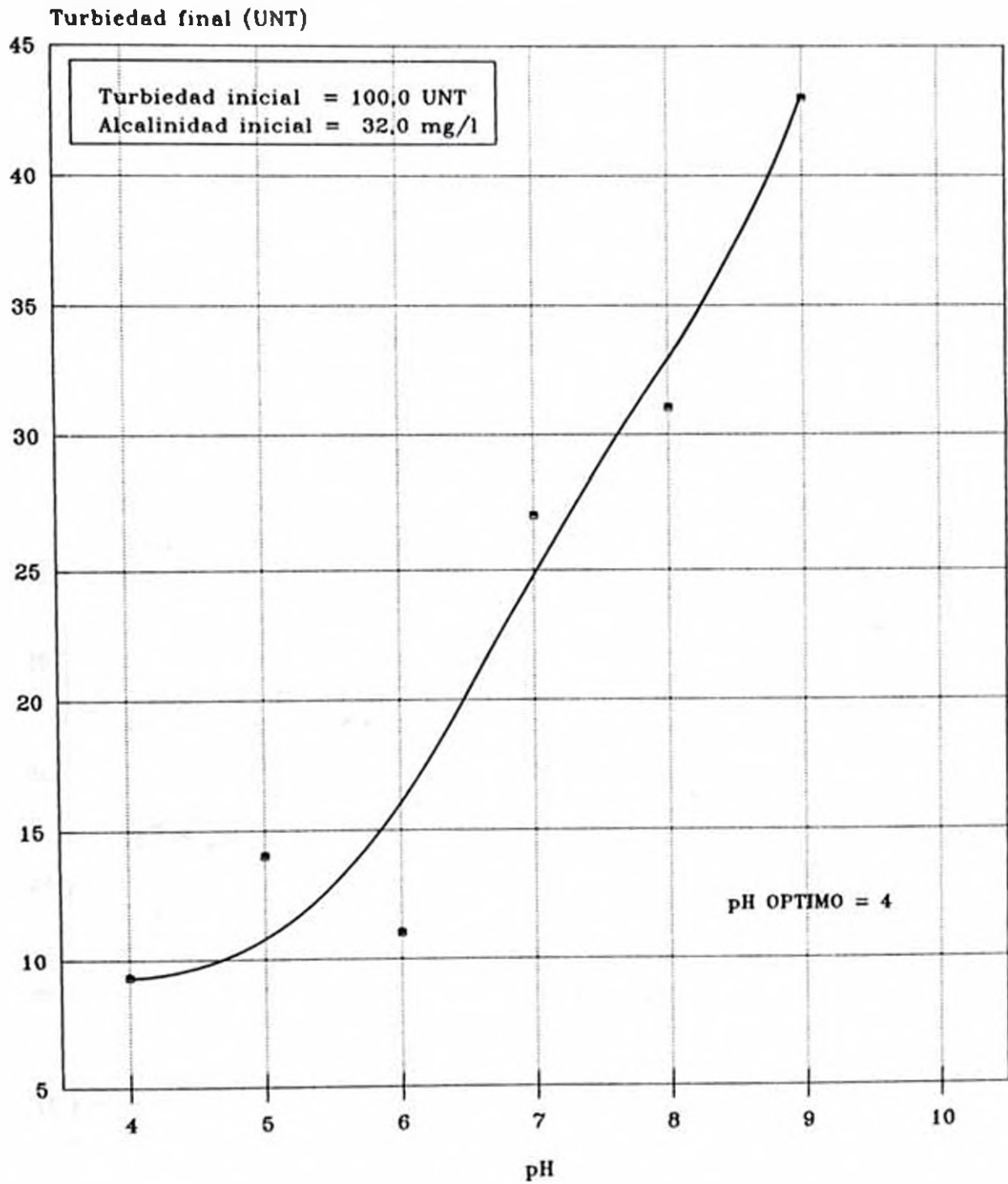
Agua tipo: III  
 Proceso Sulfato de Aluminio

Figura N 7-67  
**DOSIS OPTIMA DE MAGNETITA**



Agua tipo: IV  
 Proceso Magnetita

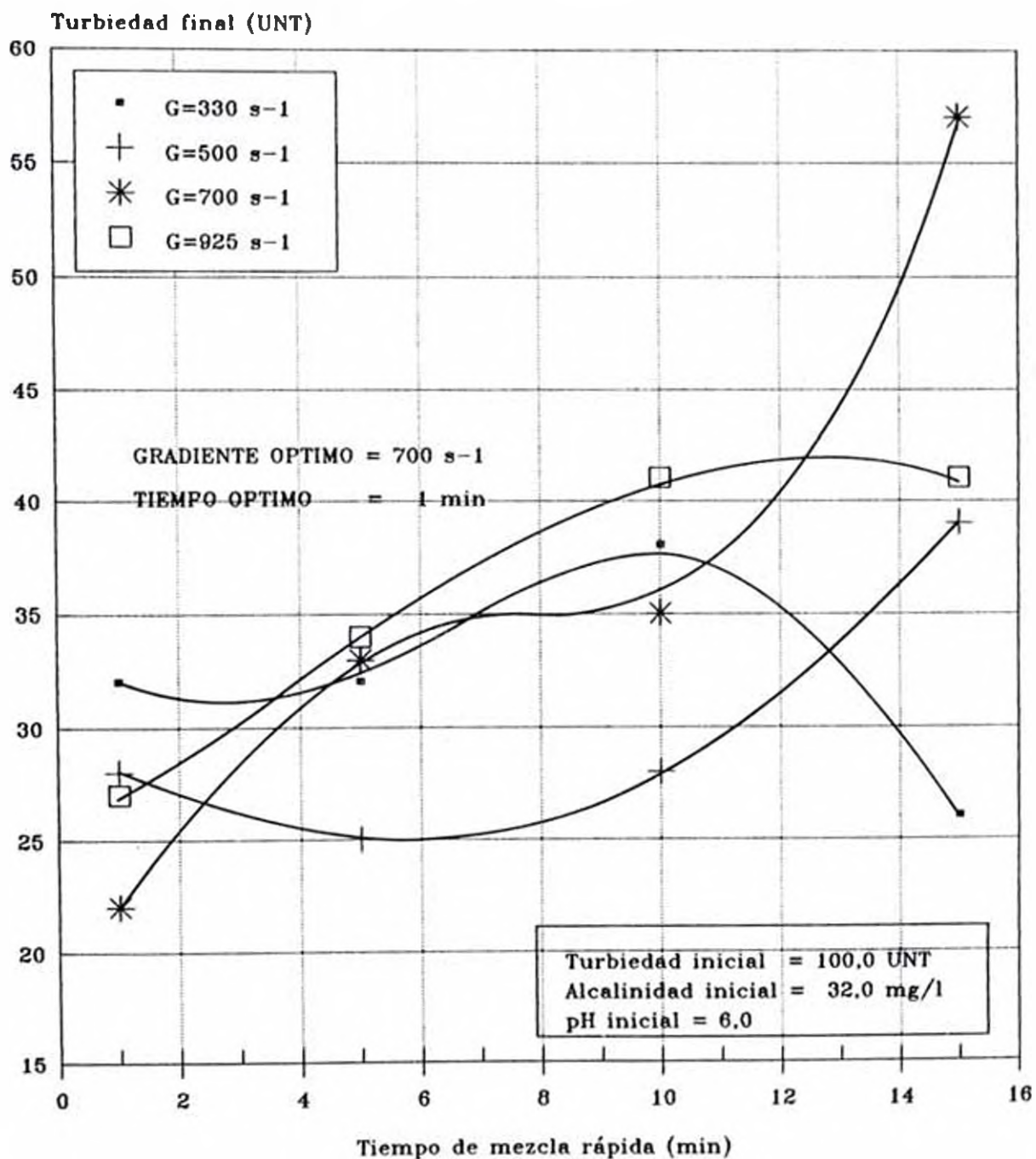
Figura N 7-68  
pH OPTIMO



Agua tipo: IV  
Proceso Magnetita

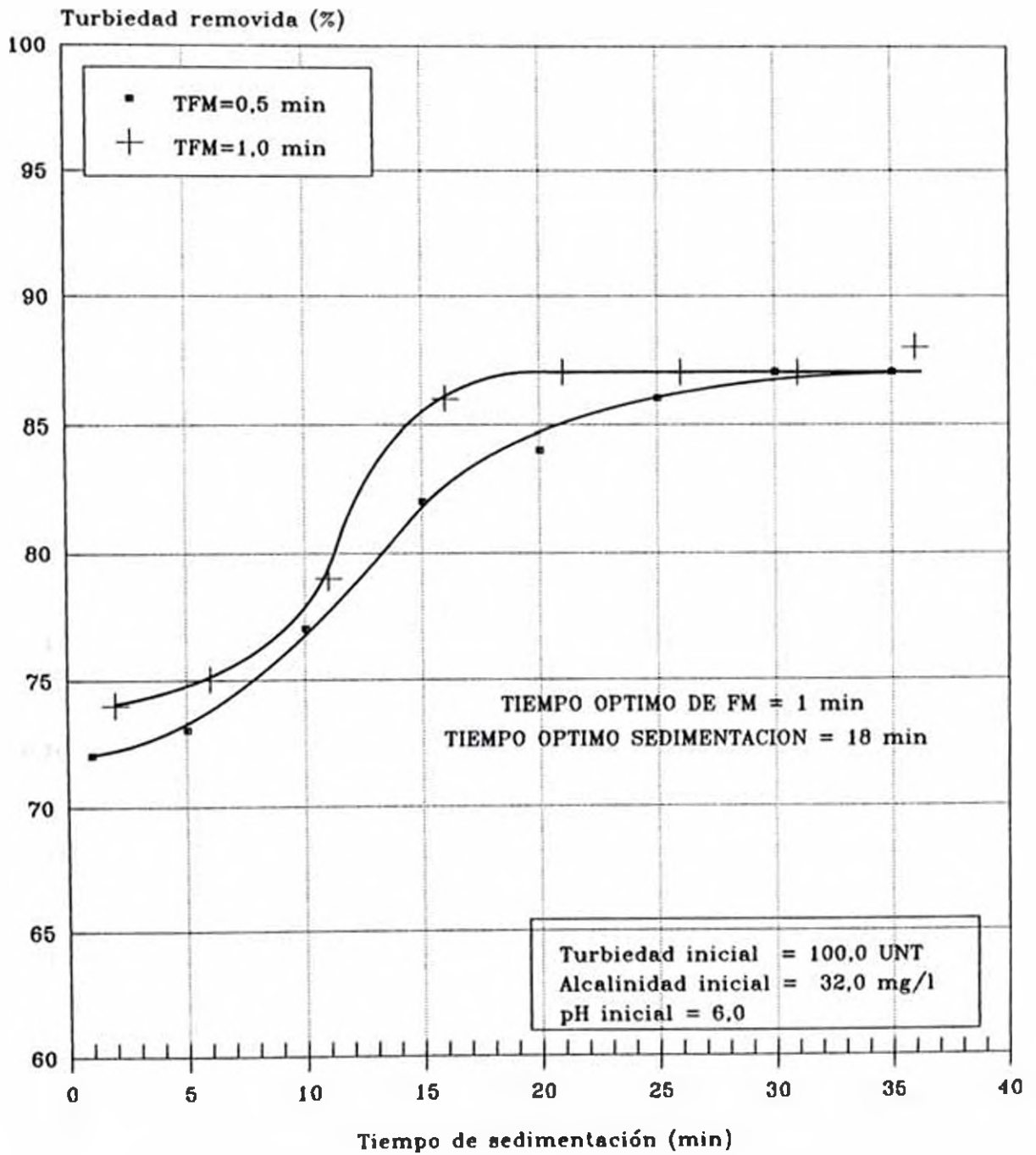


Figura N 7-09  
GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE  
MEZCLA RAPIDA



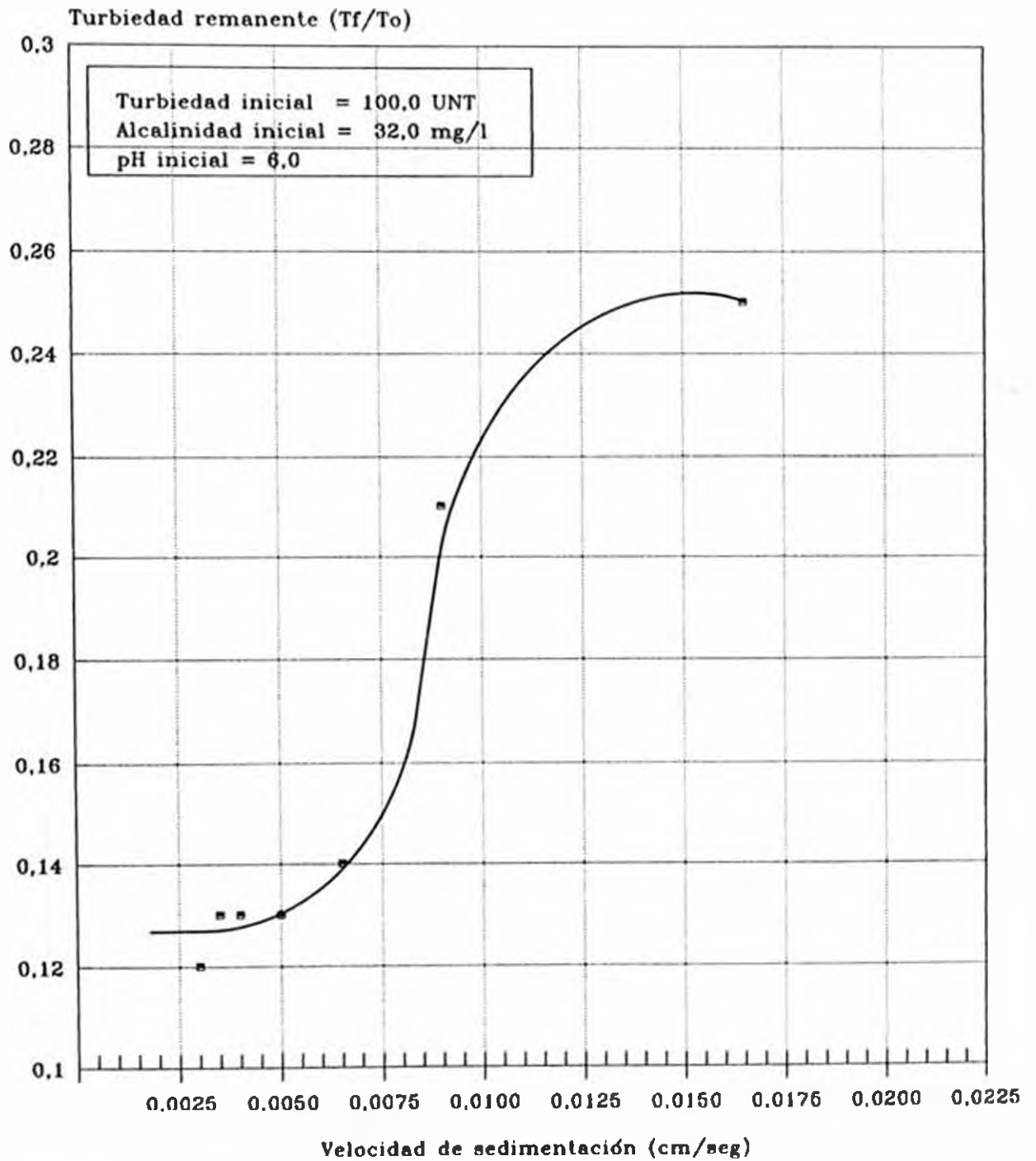
Agua tipo: IV  
Proceso Magnetita

Figura N 7-70  
**TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION MAGNETICA  
 Y SEDIMENTACION**



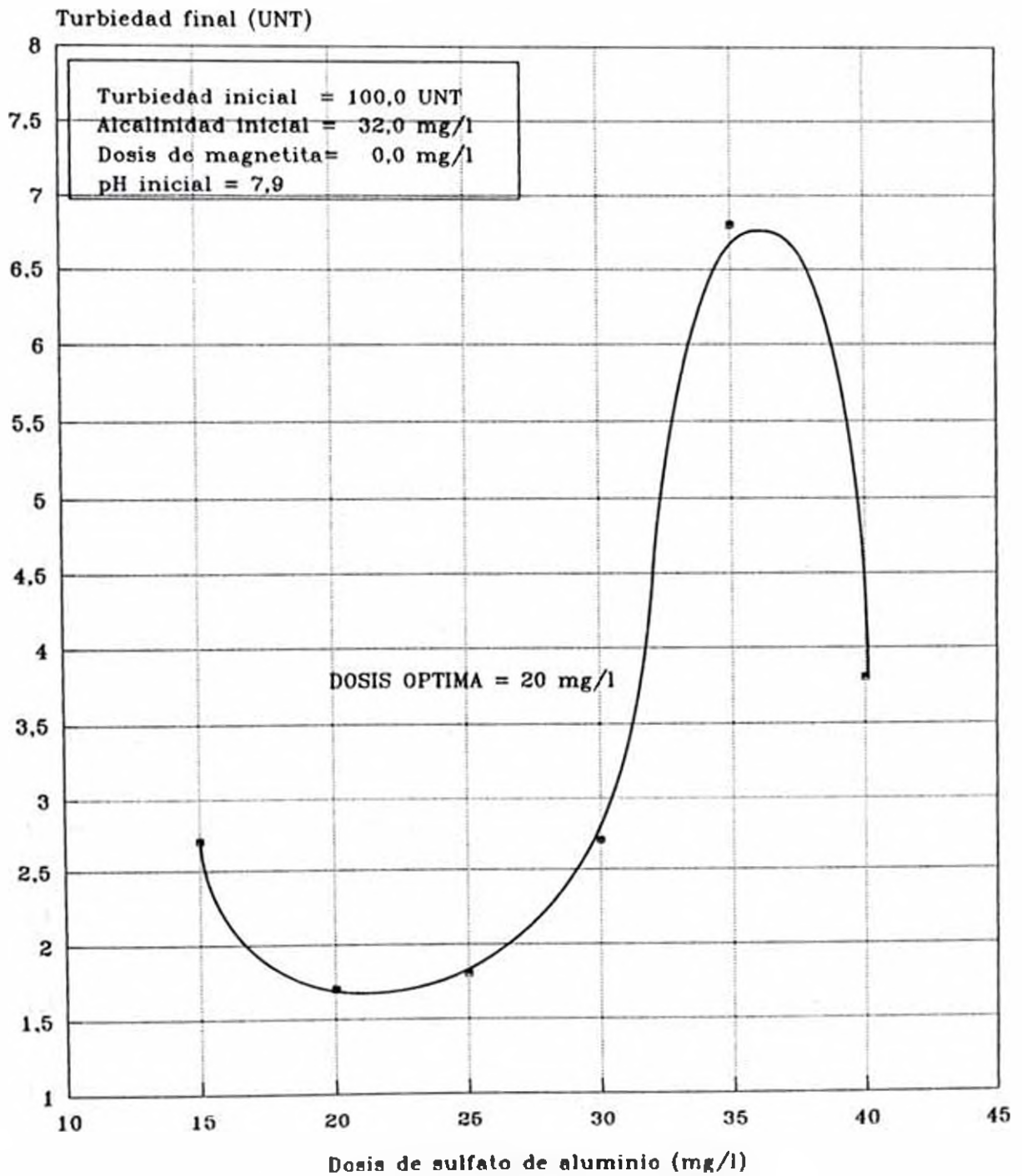
Agua tipo: IV  
 Proceso Magnetita

Figura N 7-71  
 EFICIENCIA DE SEDIMENTABILIDAD



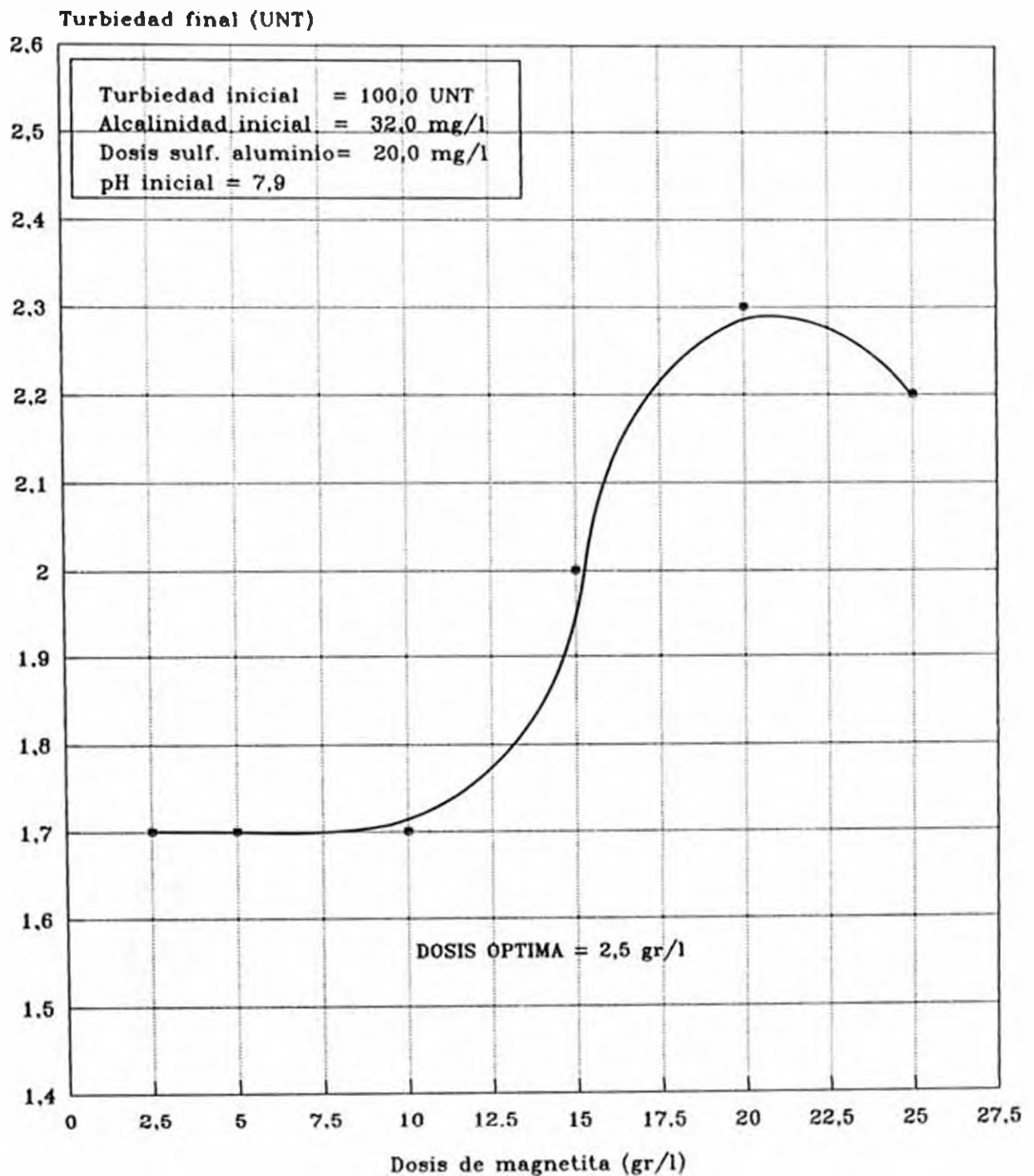
Agua tipo: IV  
 Proceso Magnetita

Figura N 7-72  
**DOSIS OPTIMA DE SULFATO DE ALUMINIO**



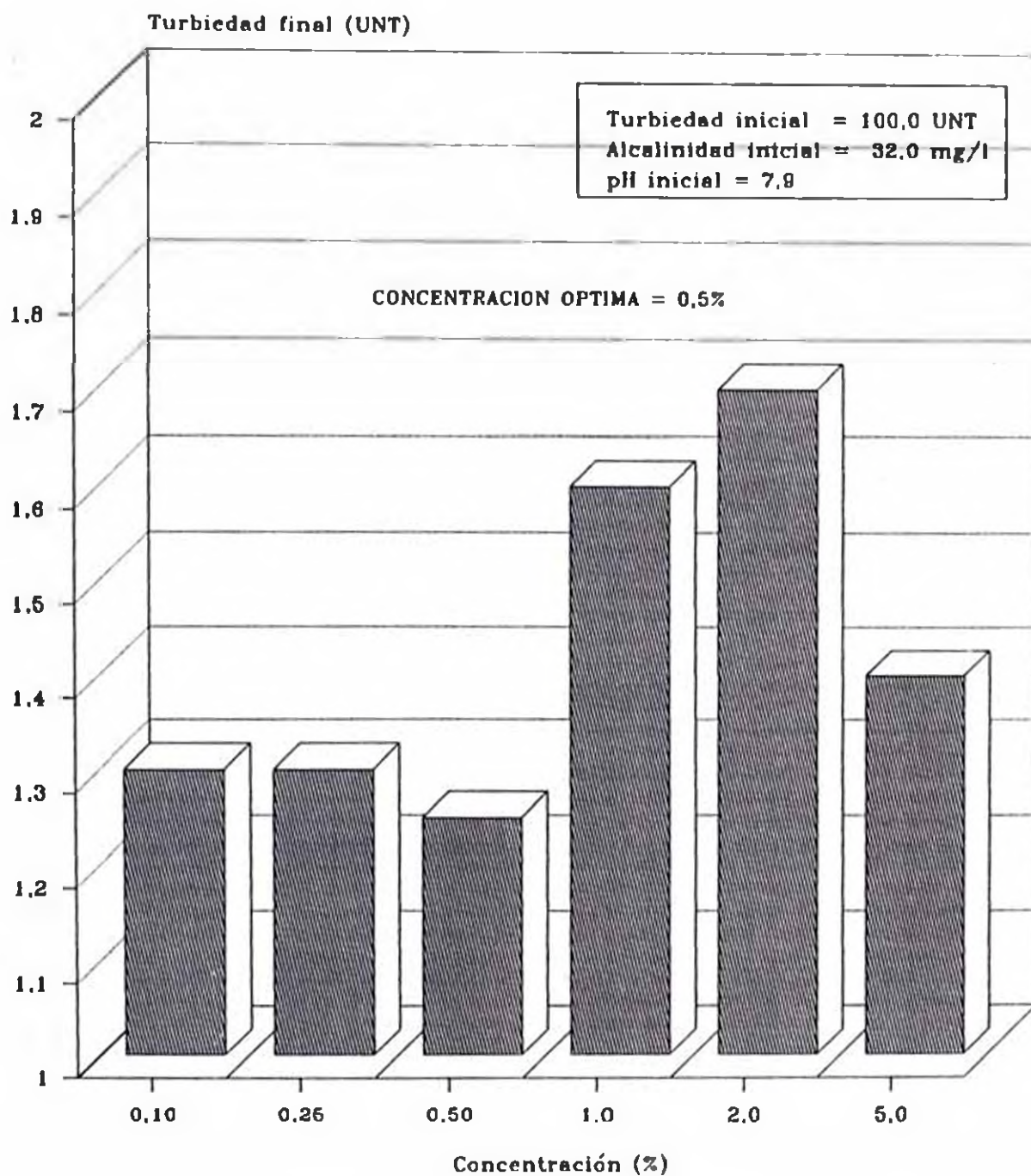
Agua tipo: IV  
 Proceso Magnetita-Sulfato

Figura N 7-73  
**NUEVA DOSIS OPTIMA DE MAGNETITA**



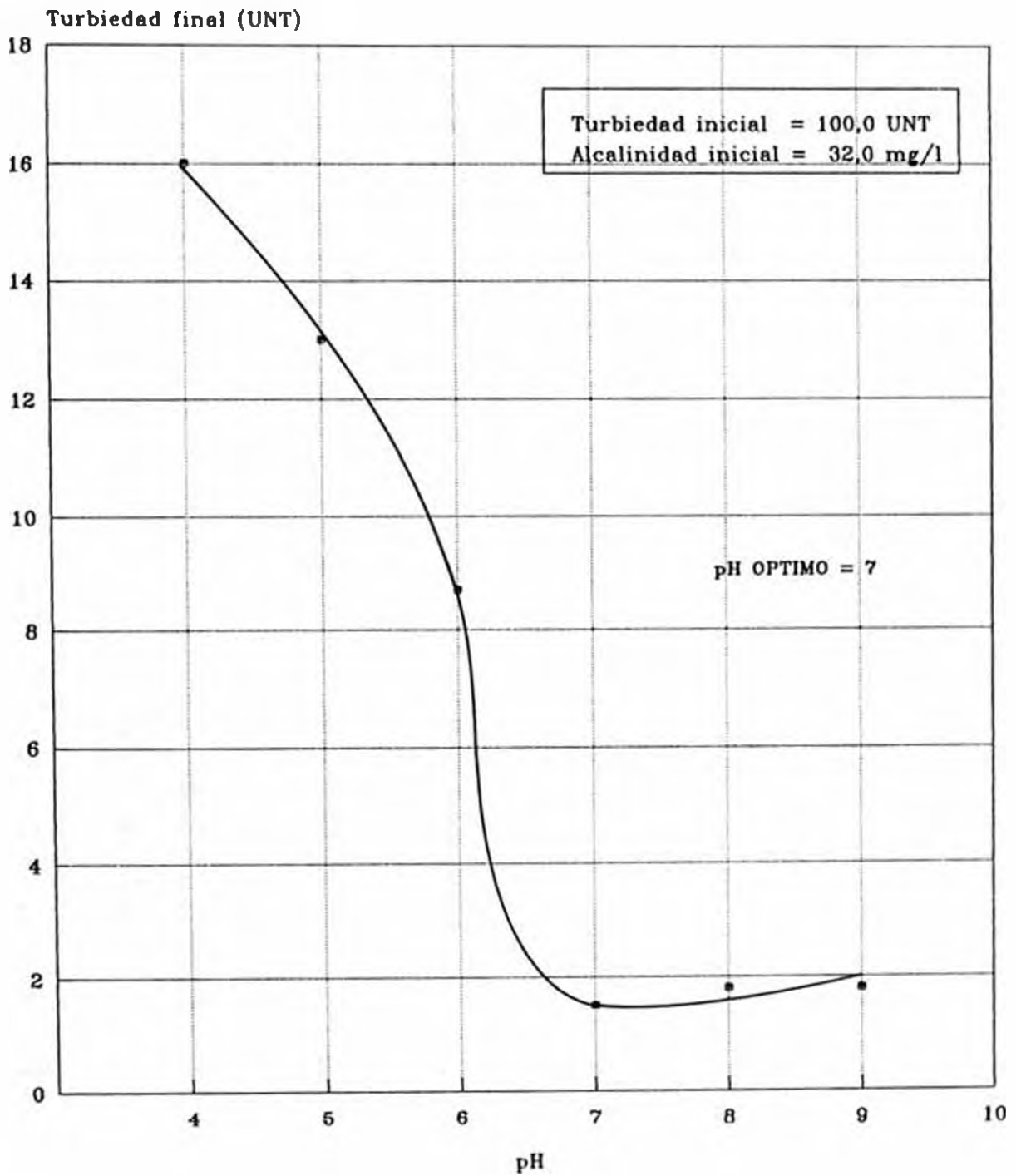
Agua tipo: IV  
 Proceso Magnetita-Sulfato

Figura N 7-74  
**CONCENTRACION OPTIMA DE  
 SULFATO DE ALUMINIO**



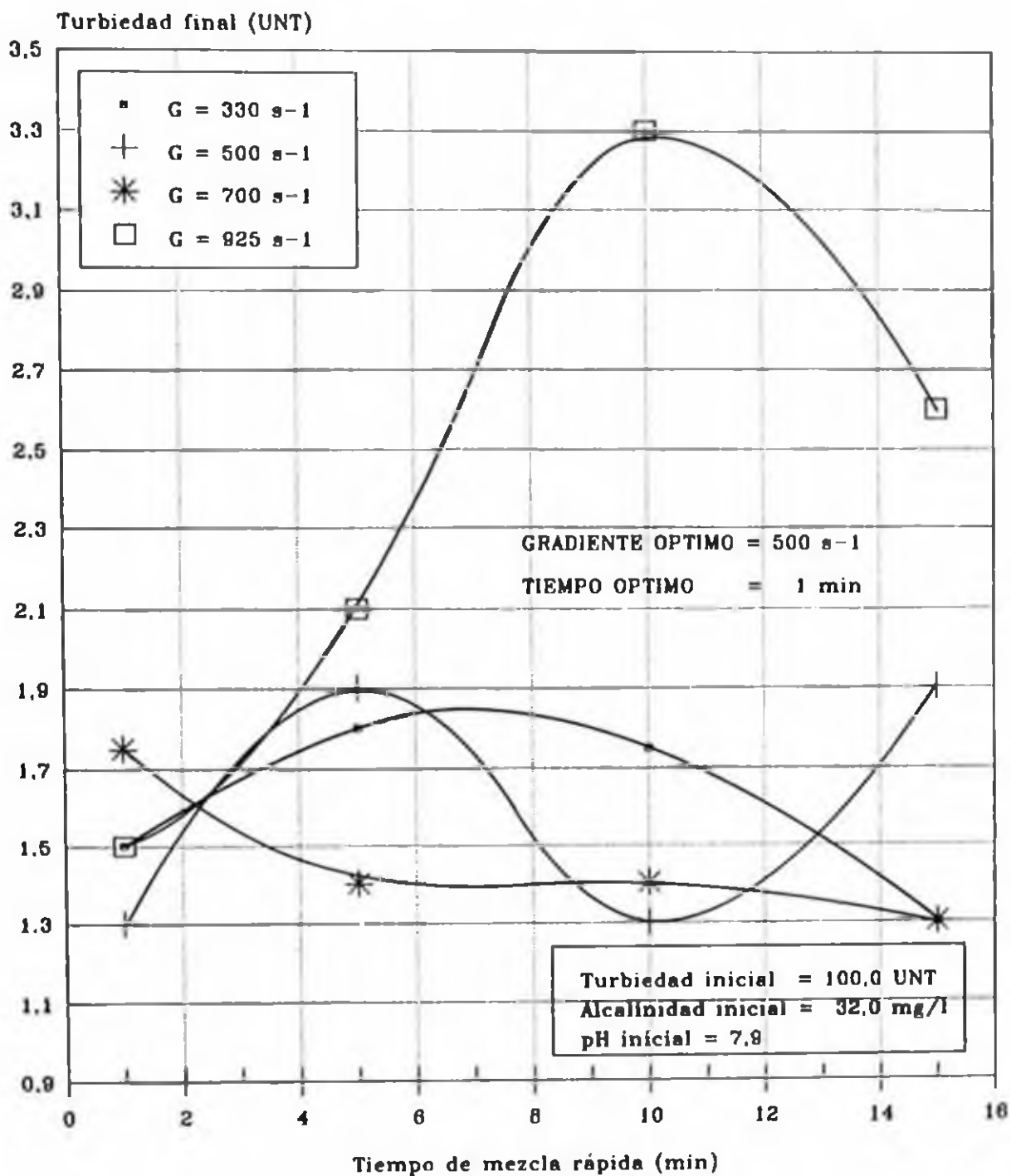
Agua tipo: IV  
 Proceso Magnetita-Sulfato

Figura N 7-75  
pH OPTIMO



Agua tipo: IV  
Proceso Magnetita-Sulfato

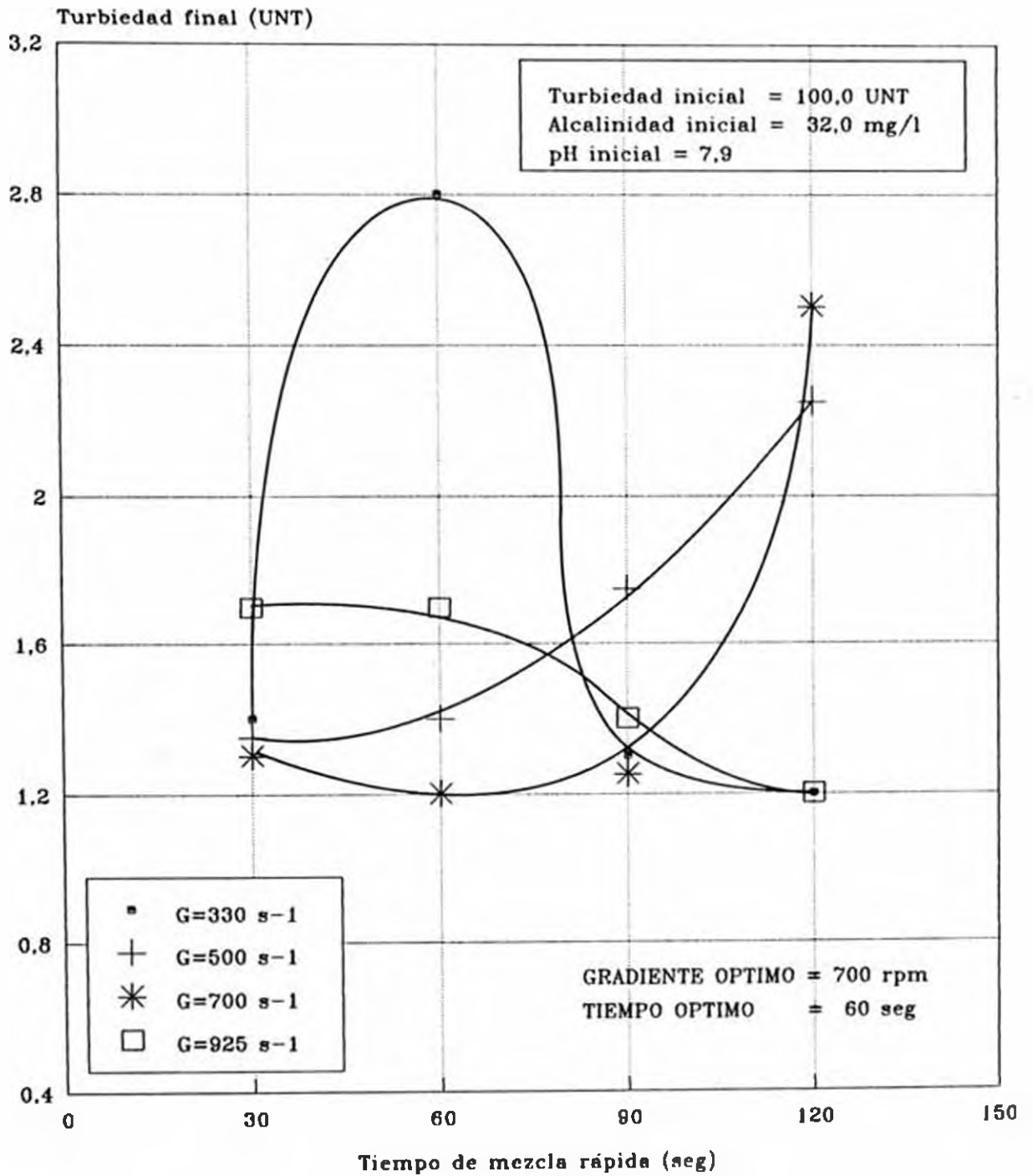
Figura N 7-76  
GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO EN MR1



Agua tipo: IV  
Proceso Magnetita-Sulfato

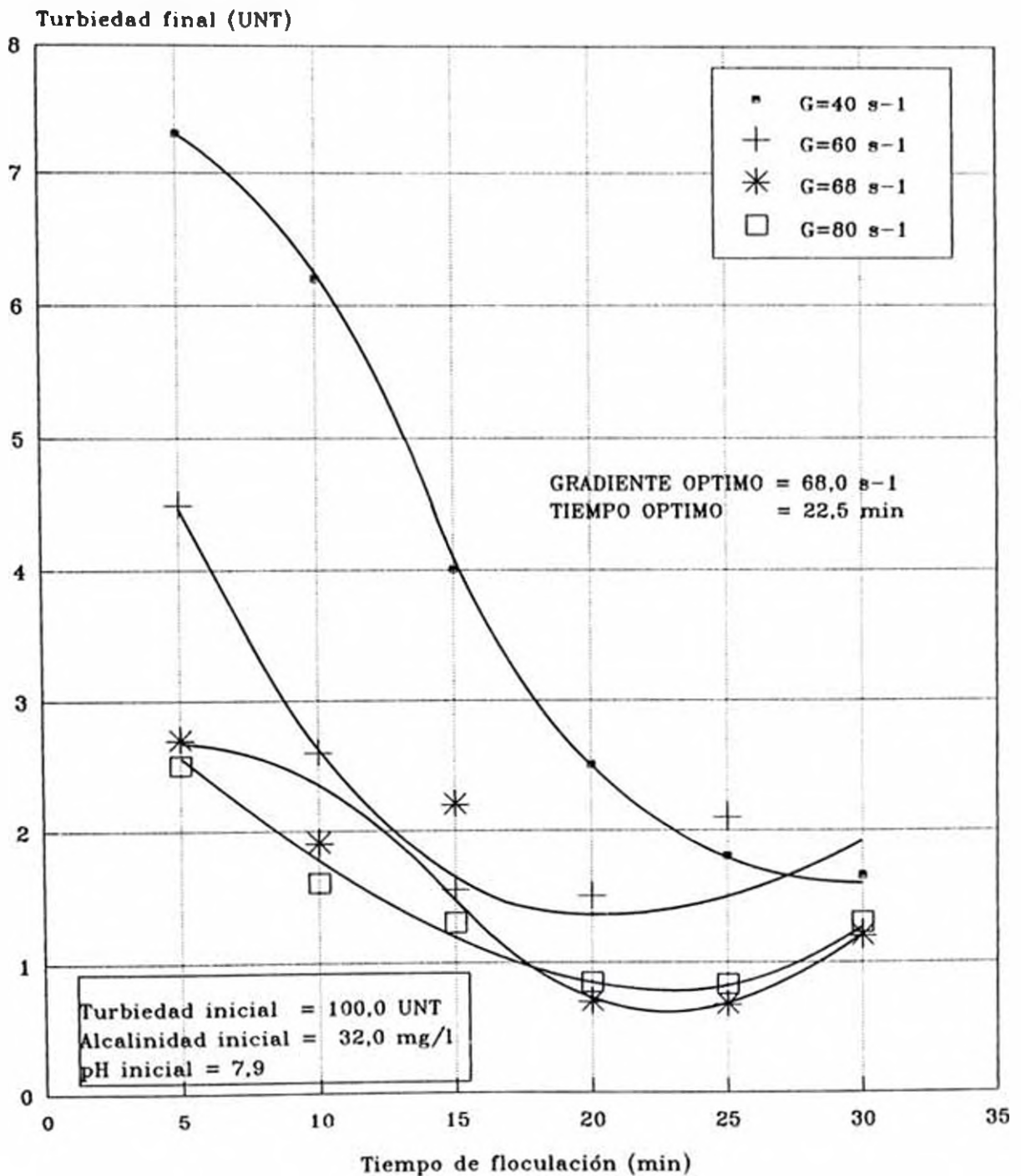


Figura N 7-77  
GRADIENTE Y TIEMPO EN MR2



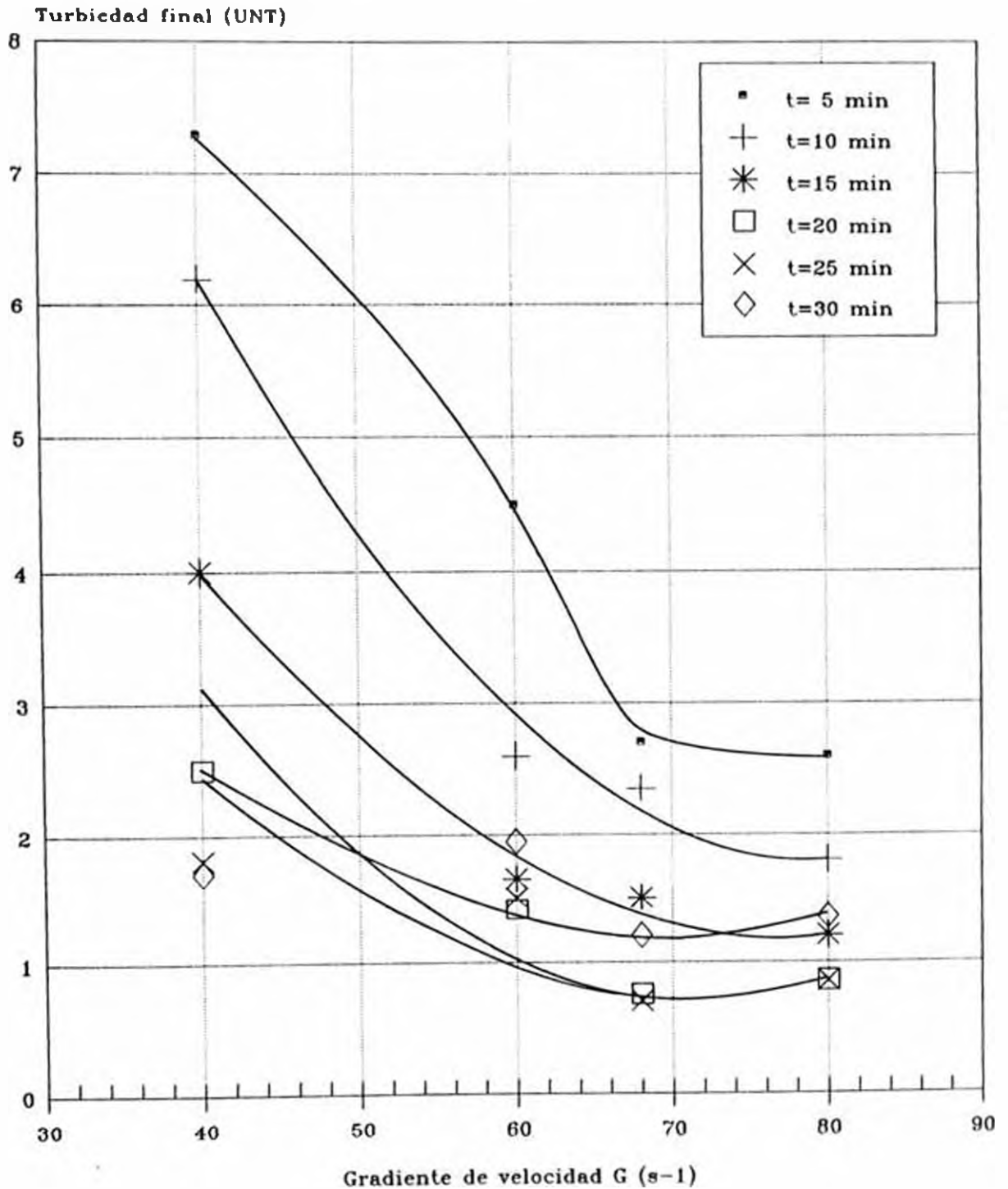
Agua tipo: IV  
Proceso Magnetita-Sulfato

Figura N 7-78  
GRADIENTE Y TIEMPO ÓPTIMO DE FLOCULACION



Agua tipo: IV  
Proceso Magnetita-Sulfato

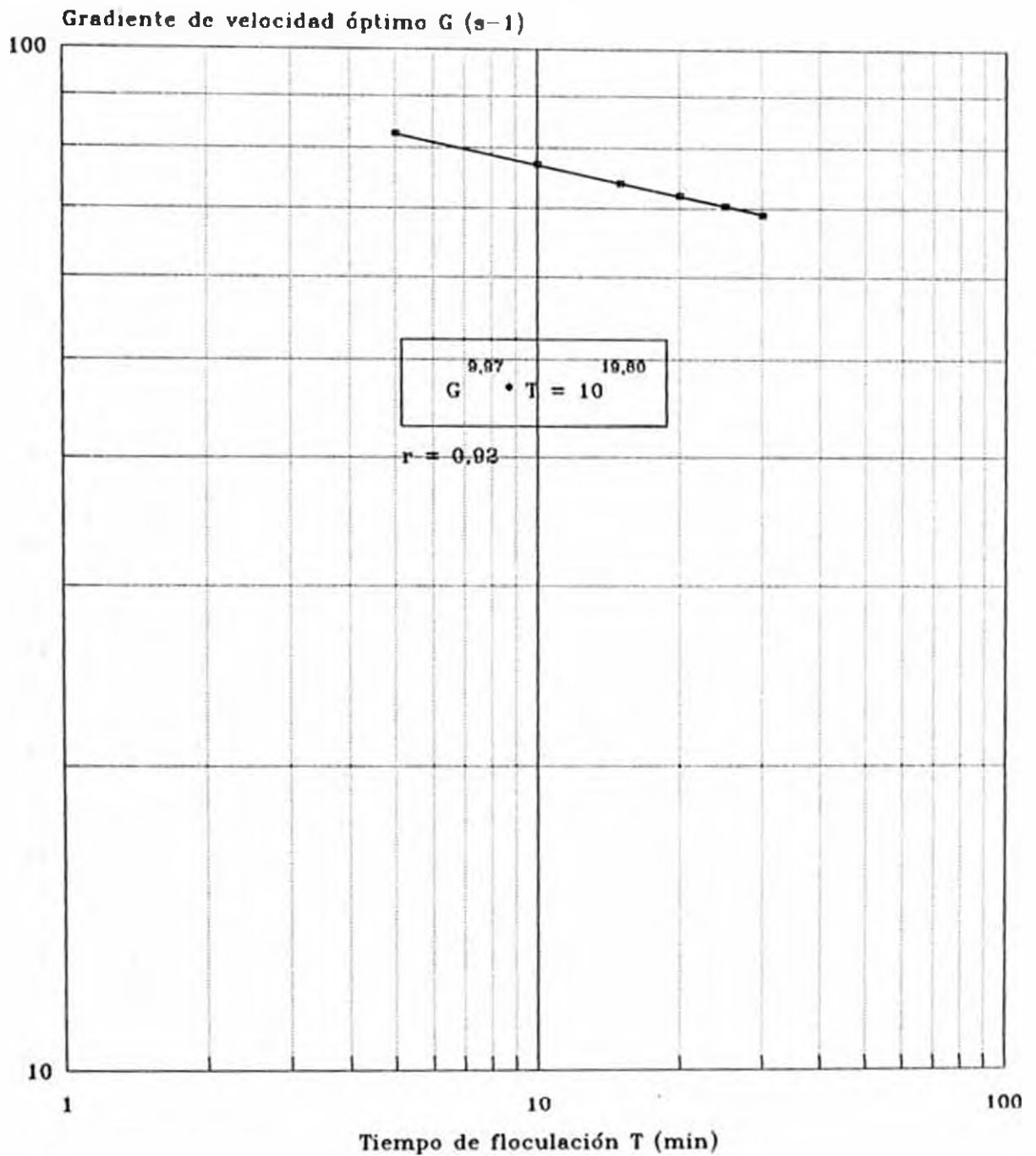
Figura N 7-79  
**TURBIEDAD FINAL vs GRADIENTE DE VELOCIDAD**



Agua tipo: IV  
 Proceso Magnetita-Sulfato

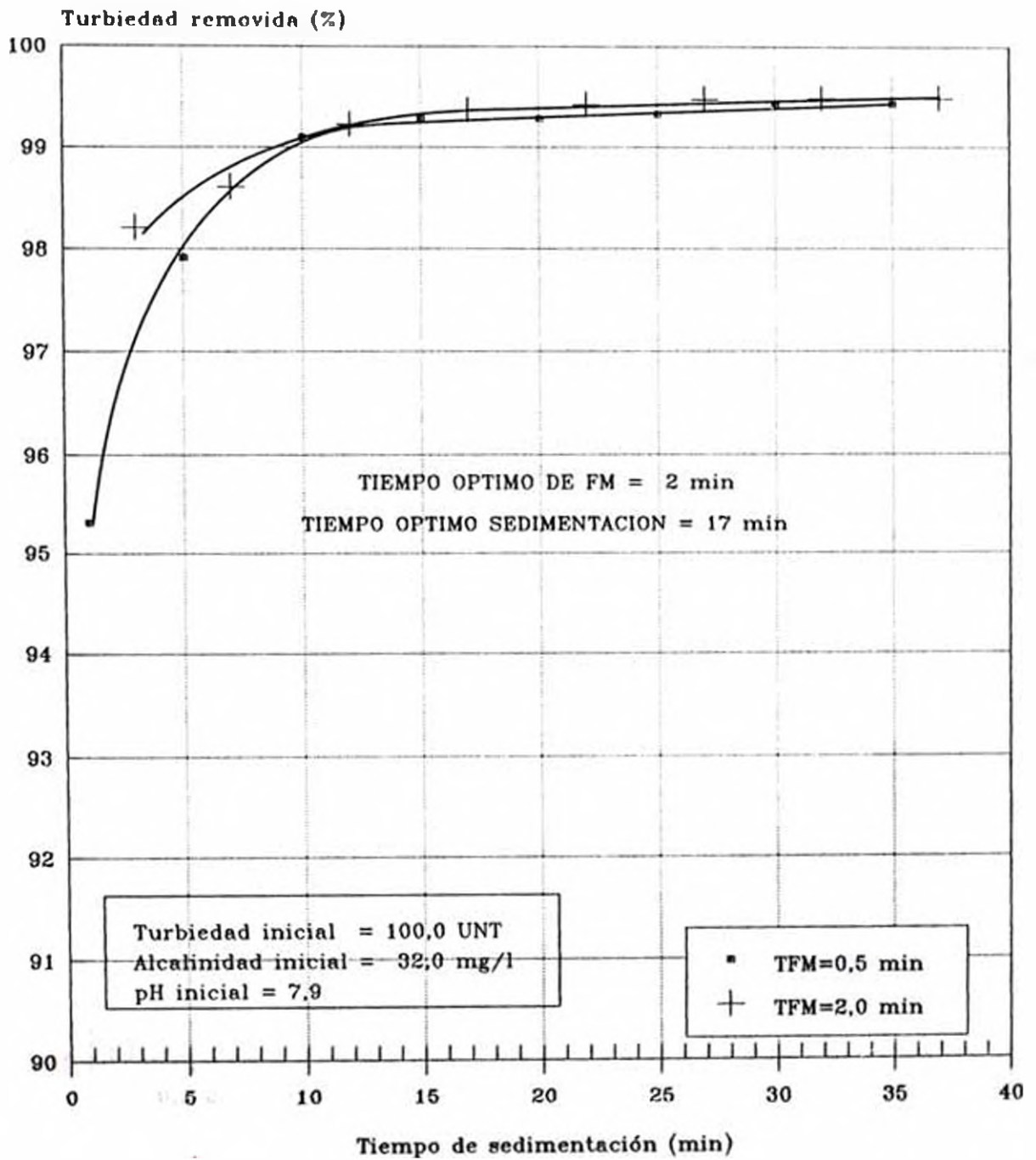
Figura N 7-80

VARIACION DEL GRADIENTE DE VELOCIDAD OPTIMO EN FUNCION DEL TIEMPO DE FLOCULACION



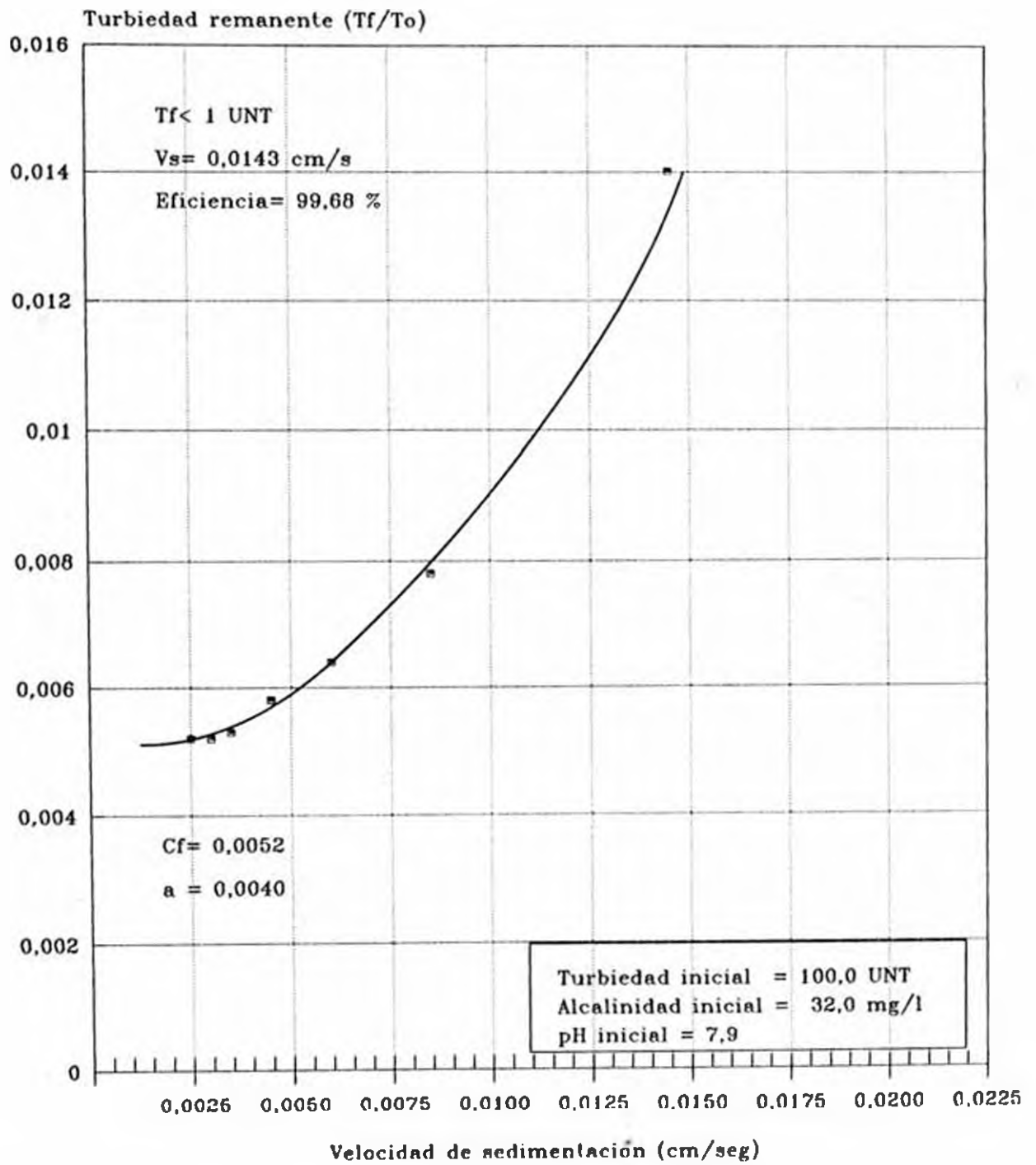
Agua tipo: IV  
 Proceso Magnetita-Sulfato

Figura N 7-01  
**TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION MAGNETICA  
 Y SEDIMENTACION**



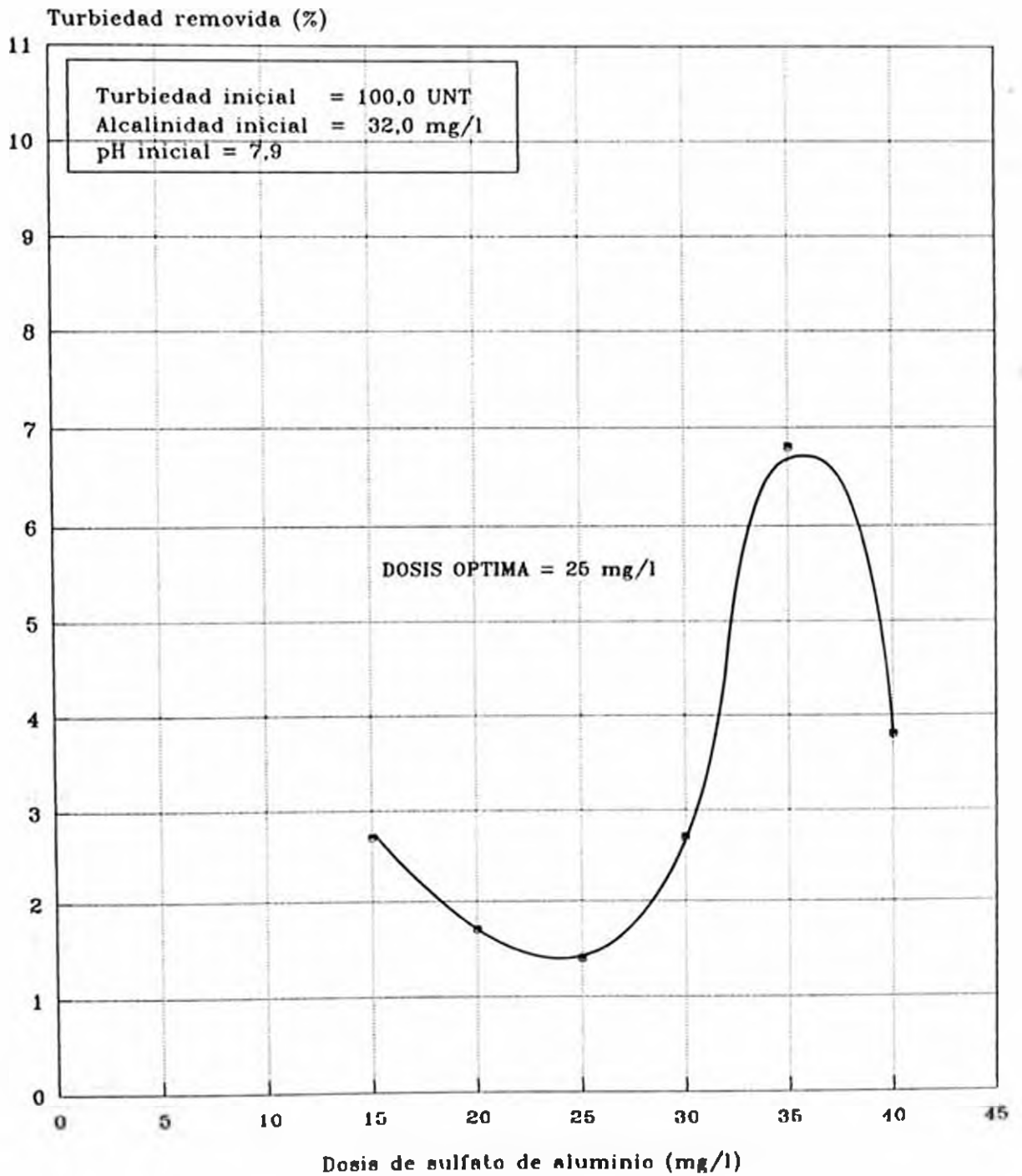
Agua tipo: IV  
 Proceso Magnetita-Sulfato

Figura N 7-82  
**EFICIENCIA DE SEDIMENTABILIDAD**



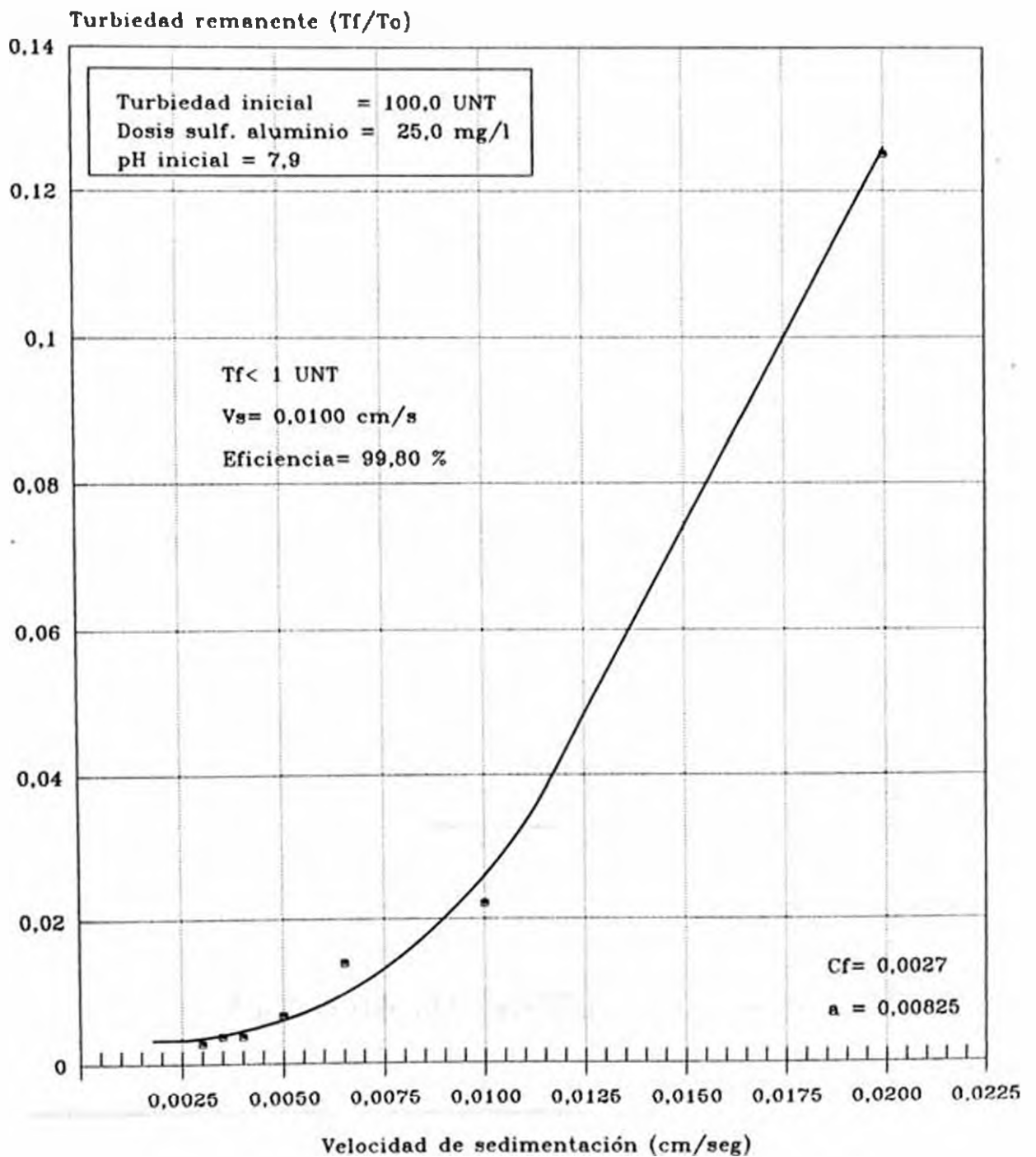
Agua tipo: IV  
 Proceso Magnetita-Sulfato

Figura N 7-83  
**DOSIS OPTIMA DE SULFATO DE ALUMINIO**



Agua tipo: IV  
 Proceso Sulfato de Aluminio

Figura N 7-84  
**EFICIENCIA DE SEDIMENTABILIDAD**



Agua tipo: IV  
 Proceso Sulfato de Aluminio



Capítulo 8

DESCRIPCION DEL PROCESO DE CLARIFICACION

Los diferentes ensayos realizados han evidenciado la propiedad de adsorción de las partículas de magnetita en la remoción de la turbiedad y el color. Así mismo, ellos permiten describir en forma detallada, las dos técnicas de tratamiento investigadas.

### 8.1 PROCESO DE TRATAMIENTO MAGNETITA

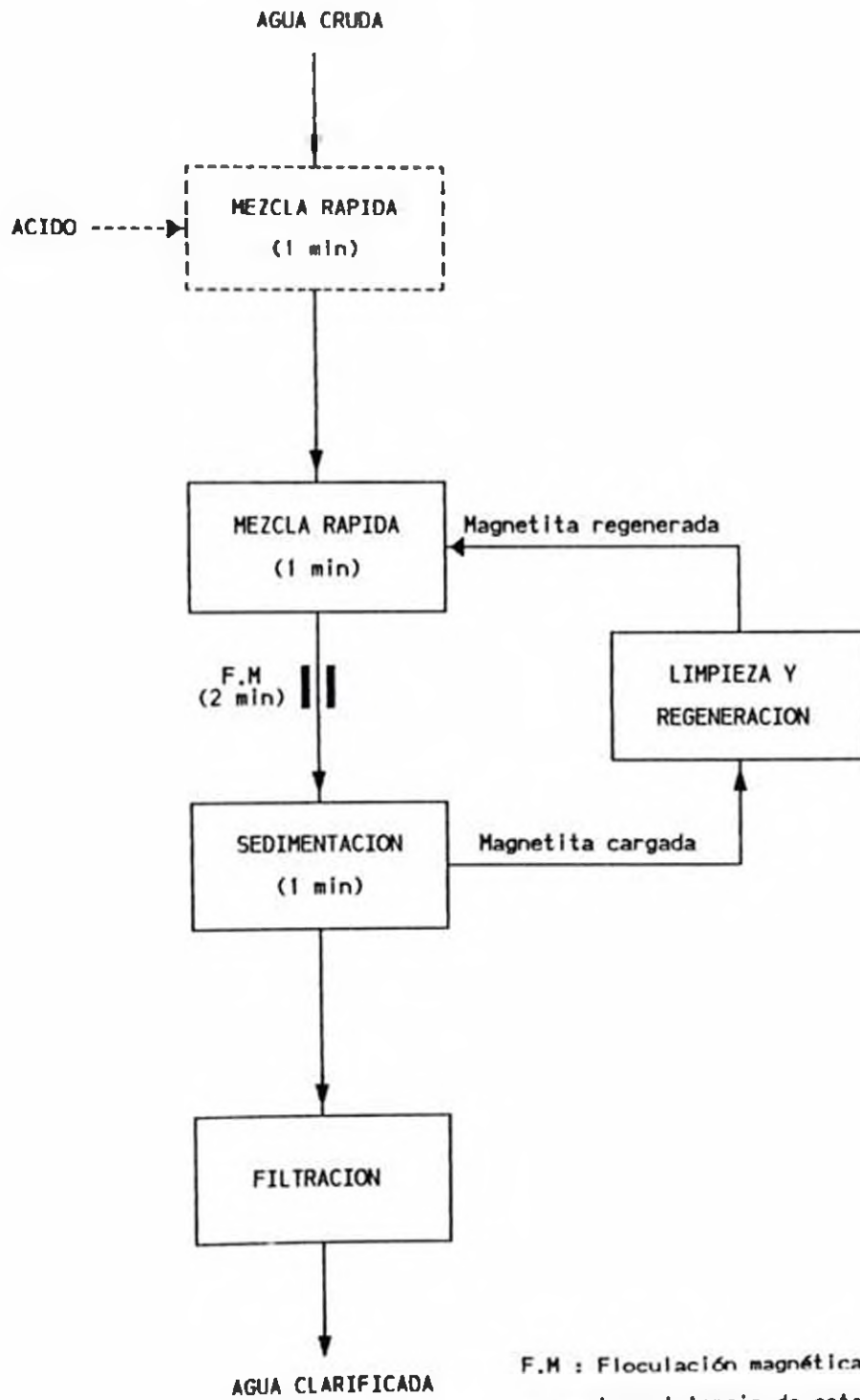
Las pruebas realizadas durante este estudio, han demostrado que este tratamiento tal como se planteó en un inicio, no es eficiente (turbiedad final aproximadamente 5 UNT) por lo que es necesario incorporar en este proceso una unidad de filtración, la cual no solo permitirá la remoción de la turbiedad que no logró ser retenida en el proceso anterior, sino que también eliminará las partículas de hierro que ingresan al agua debido a la dosificación de magnetita.

El proceso que se plantea es adecuado para aguas que presentan turbiedades bajas, menores o iguales a 30 UNT, con valores de alcalinidad y dureza relativamente altos.

Tal como se muestra en la figura N° 8-1, este proceso está basado en la adición de partículas de magnetita finamente divididas, con un rango de tamaño que va desde 38 a 45  $\mu$ . Estas partículas bajo condiciones ácidas su superficie se carga positivamente y cualquier coloide cargado negativamente puede ser atrapado en ella. Cuando los niveles de pH están por encima de 7 la superficie de ellas se transforma rápidamente con carga negativa dando lugar, entonces, a repeler los coloides. Consecuentemente, la magnetita actúa como un coagulante adsorbente a pH bajos y puede ser capaz de regenerarse a pH altos.

Por lo indicado en el párrafo anterior el tratamiento magnetita, se recomienda cuando el pH del agua es ligeramente ácido, si esto no es así, es necesario como etapa inicial del proceso, ajustar el pH del

Figura N 8-1  
 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE TRATAMIENTO  
 MAGNETITA



F.M : Floculación magnética  
 [ ] : La existencia de esta  
 [ ] : etapa depende del pH

agua cruda al valor óptimo, el cual por lo general corresponde para pH 4, sin embargo, valores mayores tal como pH 6 proporcionan similares resultados, requiriendo sólo un adicionamiento mayor en la cantidad de magnetita.

Posteriormente, a la acidificación, se dosifica al agua magnetita regenerada a tasas las cuales pueden variar de 0,5 a 2% w/w, dependiendo principalmente de los niveles de turbiedad y alcalinidad que presente el agua cruda.

El contacto entre el agua y la magnetita debe realizarse a una velocidad tal, que se permita la homogenización de la magnetita en toda la masa del agua y no provoque la sedimentación de ella, por lo general un gradiente de velocidad de  $500 \text{ s}^{-1}$  proporciona los mejores resultados, manteniéndose la misma durante 1 minuto.

La etapa de contacto es seguida por la separación de la magnetita del agua, para lo cual sólo se requiere en promedio un tiempo de 1 minuto. Previo a esto, el agua es sometida a la acción de un campo magnético el cual permitirá la aglutinación de las partículas de magnetita provocando de esta manera que la sedimentación se realice en forma rápida.

Las etapas descritas, por lo general, demanda en promedio un tiempo total de tratamiento de 5 minutos.

Como se dijo en un inicio, este proceso no remueve la totalidad de turbiedad y aun más, permite el incremento de la cantidad de hierro, esto último debido a la dosificación de la magnetita en cantidades apreciablemente altas, por lo que es necesario como última fase del proceso incorporar un sistema de filtración el cual permitirá la remoción de estos dos parámetros a límites permisibles de potabilidad.

## 8.2 PROCESO DE TRATAMIENTO MAGNETITA-COAGULANTE

Esta alternativa requiere por lo general un tiempo total de tratamiento que varía de 33 a 48 minutos aproximadamente. La aplicabilidad de esta nueva técnica se demuestra para cualquier tipo de agua, sin embargo, las aguas que presentaron valores bajos de alcalinidad y dureza aparte de requerir menores tiempos de tratamiento, presentaron una reducción en la dosis del sulfato de aluminio, en comparación a la técnica convencional cuando se emplea sólo sulfato de aluminio.

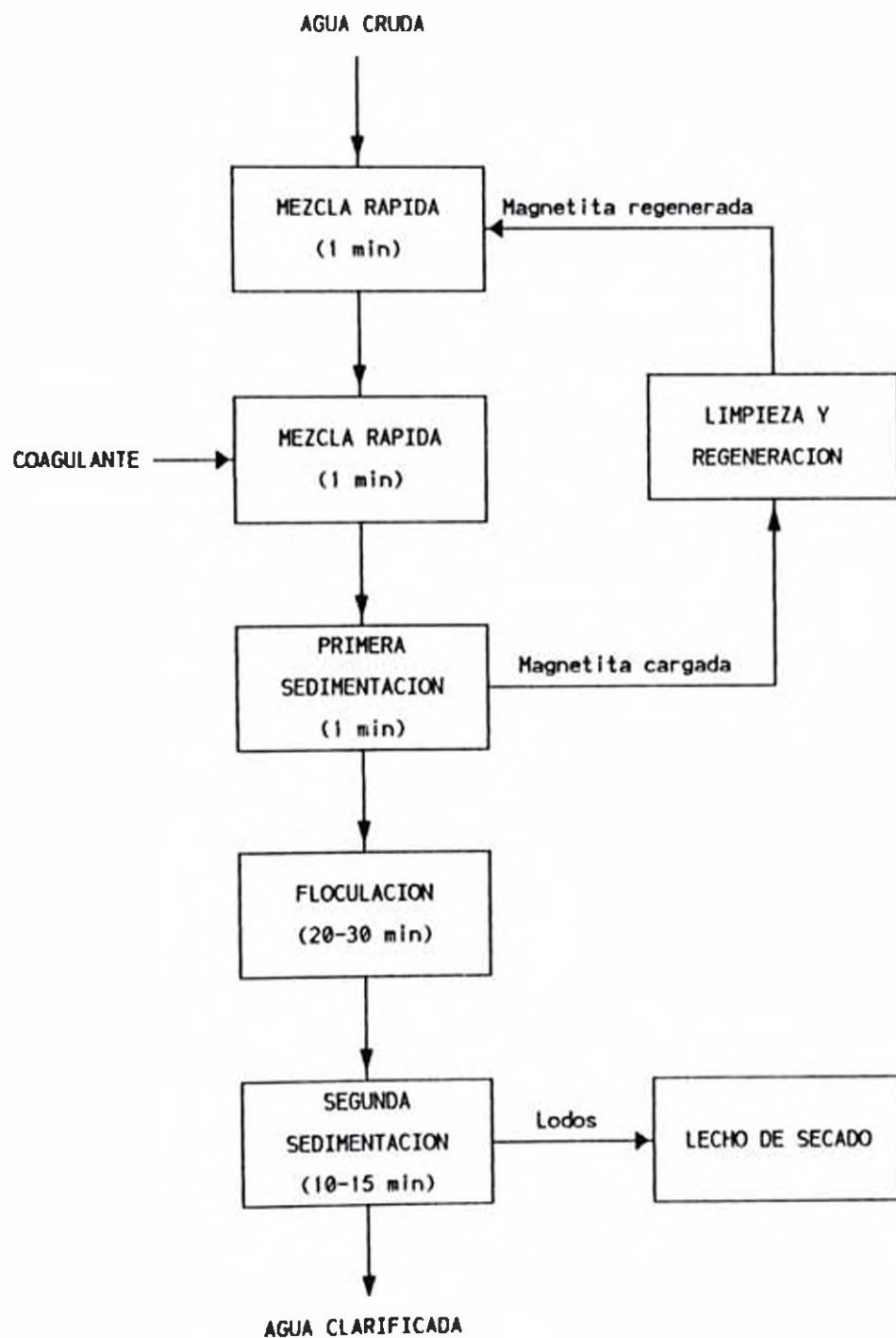
El proceso de tratamiento planteado, se muestra esquemáticamente en la figura N° 8-2. La magnetita muy fina, es agregada al agua cruda, la cual no necesita modificación alguna en el pH. La dosis de magnetita que se requiere depende de la turbiedad del agua cruda y por lo general varía de 0,25 a 1,5% w/w.

La distribución homogénea de la magnetita en toda la masa del agua, al igual que en la técnica anterior, se realiza eficientemente a un gradiente de velocidad de  $500 \text{ s}^{-1}$  y para un tiempo de contacto de 1 minuto.

Seguidamente ocurre la etapa de contacto entre el agua y el coagulante (sulfato de aluminio) esto se consigue también con un gradiente de velocidad de aproximadamente  $500 \text{ s}^{-1}$  y tiempo de contacto de 1 minuto. Previa a la fase de formación de los flóculos, la magnetita tiene que ser retirada de la masa de agua, ya que si ello no ocurre sedimentarían en los floculadores debido a la baja gradiente existente en estas unidades. Dicha separación se logra con la ayuda de un primer sedimentador, en donde el agua permanecerá por lo menos durante 1 minuto.

Transcurrido el primer proceso de sedimentación el agua es

Figura N 8-2  
DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE TRATAMIENTO  
MAGNETITA-COAGULANTE



sometida a una etapa de formación de partículas lo cual se consigue con movimientos regulares lentos. Estos movimientos permiten que las micropartículas se aglomeren en macropartículas y produzcan un flóculo de asentamiento rápido. Generalmente estos movimientos requieren un gradiente de velocidad de  $68 \text{ s}^{-1}$  y un tiempo de contacto que va de 20 a 30 minutos.

Después de esta etapa de contacto, el agua es pasada a un segundo sedimentador en donde se permitirá la separación de los flóculos del agua clarificada, la cual tiene generalmente una turbiedad menor a 1 UNT y color menor a 5 UC. Esta separación se consigue con tiempos que van de 10 a 15 minutos.

Capítulo 9

DESCRIPCION DEL PROCESO DE RECUPERACION Y  
REGENERACION DE LA MAGNETITA



Una de las características principales de los dos procesos en estudio es la viabilidad para reutilizar la magnetita elevando el pH.

Como ya se dijo anteriormente, en condiciones ácidas la superficie de la magnetita, adquiere carga positiva y en consecuencia de ello cualquier coloide es adherido. En cambio cuando los niveles de pH están por encima de 7 la superficie se transforma con carga negativa dando lugar a repeler los coloides adheridos en su superficie. Consecuentemente, el material adsorbido en la superficie de la magnetita puede ser separado mediante un lavado alcalino el cual también ayuda a reactivar la magnetita y preparar la superficie del óxido de hierro para otro ciclo de adsorción.

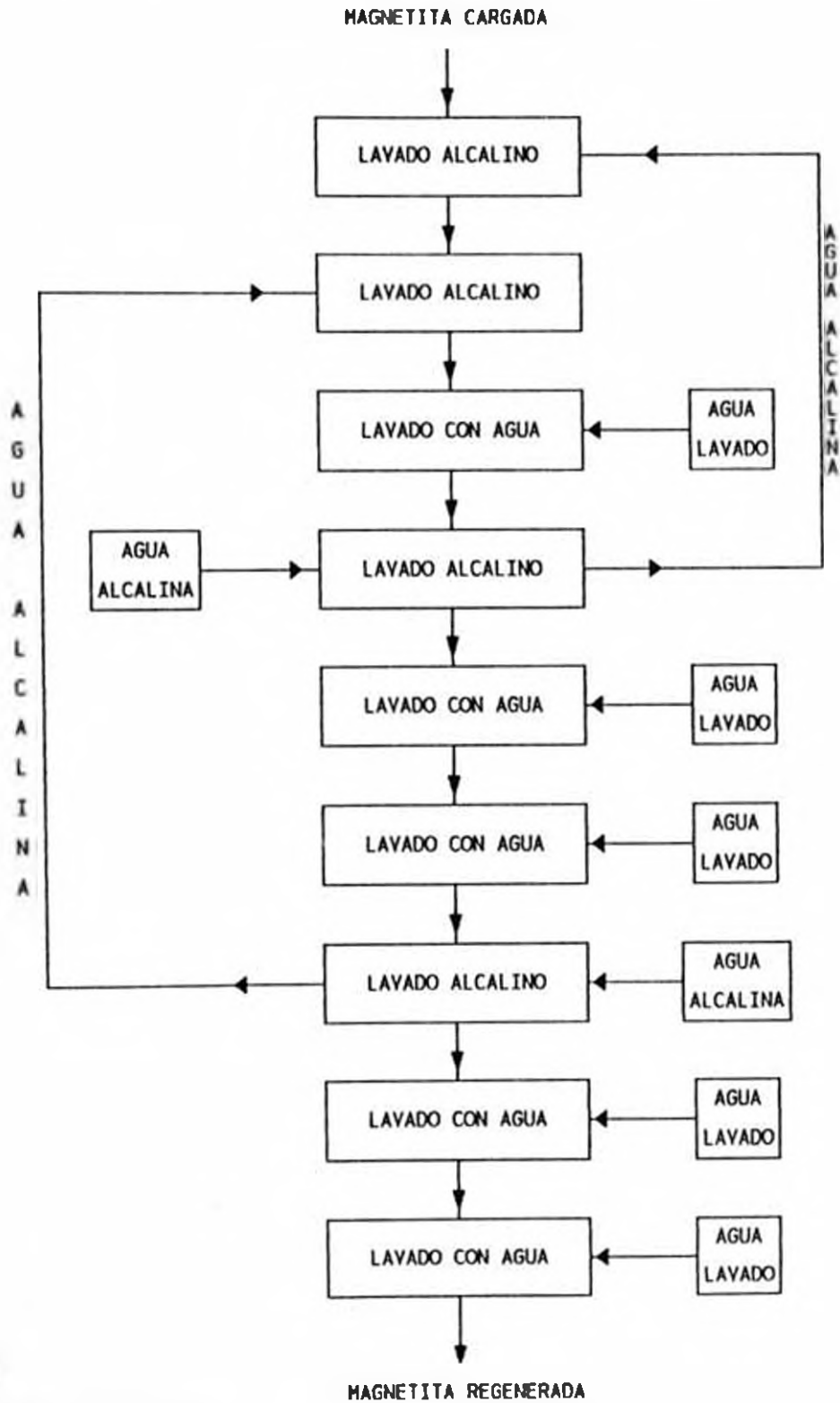
Las pruebas realizadas, indican que la separación del material adsorbido es más eficiente al elevar el pH, así a pH 12 el porcentaje de desadsorción es mayor que a pH 10. Además, las diferentes literaturas indican que el proceso no sólo se ve influenciado por el valor del pH, sino que también depende de la dureza que presente el agua, la presencia de los iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  no favorecen la desadsorción, en cambio, la ausencia de estos dos cationes favorece el lavado.

En este capítulo, lo que se pretende es dar una descripción del tratamiento del lavado de la magnetita. La selección y el diseño de las unidades en cada una de las fases o etapas del tratamiento, no es materia de esta investigación, por que ello demandaría la realización de un estudio más detallado al respecto.

## 9.1 DESCRIPCION DEL PROCESO

El proceso del lavado propuesto se esquematiza en la figura N° 9-1, como se puede apreciar la regeneración de la magnetita involucran una disposición completa de unidades las cuales aparentemente

Figura N 9-1  
 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE  
 REGENERACION DE LA MAGNETITA



**Nota:**

Cada etapa de lavado es seguida por una de separación sólido-líquido.

hacen, que el tratamiento propuesto se complique.

El tratamiento del lavado fue propuesto en base al estudio realizado a pequeña escala en el laboratorio, desafortunadamente el planteamiento inicial, hacía del proceso una alternativa de costo muy elevado, en lo que a insumos químicos se refiere, al requerir gran cantidad de agua alcalina lo que trajo como consecuencia una elevada demanda del hidróxido de sodio.

Con la finalidad de disminuir los requerimientos de lavado tanto del agua alcalina como el de la soda cáustica a un mínimo, se plantea la reutilización de ésta, tal como se indica en la figura N° 9-1.

El proceso consiste en lavados sucesivos ya sea con agua alcalina o con agua de lavado. Con la finalidad de despojar rápidamente los polutantes de color y turbiedad adheridos en la superficie de la magnetita, es necesario como fases iniciales, someter la magnetita cargada a dos lavados sucesivos con agua alcalina.

Cada etapa de lavado tiene una duración de aproximadamente dos minutos, además estas etapas de contacto deben realizarse a una gradiente tal, que se permita el friccionamiento de las partículas, lo cual se consigue con gradientes de velocidades de  $925 \text{ s}^{-1}$ . Cada fase de lavado es seguida por una de decantación, en donde se separa la parte sólida de la líquida, en esta unidades se recomienda un tiempo de sedimentación de un minuto, tiempo suficiente para sedimentar aproximadamente el 80% de las partículas de magnetita.

En promedio, el tratamiento de lavado y regeneración propuesto, demanda un tiempo aproximado de 30 minutos.

Durante el lavado de la magnetita la reutilización del agua

alcalina, como se dijo en un inicio, permite la reducción de los insumos que demanda este proceso. Así los nuevos valores obtenidos para cada alternativa, según el procedimiento de la figura N° 9-1, se muestran en el cuadro N° 9-1.

Cuadro N° 9-1  
 NUEVOS REQUERIMIENTOS DE LAVADO CUANDO SE REUTILIZA EL AGUA ALCALINA

PROCESO	CANTIDAD REGENERADA (gr)	REQUERIMIENTOS DE AGUA (lt)	
		ALCALINA	DE LA RED
Magnetita	242,50	2,80	7,00
Magnetita-Sulfato	215,00	2,00	5,00

Capítulo 10

EVALUACION TECNICO-ECONOMICA

## 10.1 EVALUACION TECNICA

Los ensayos de laboratorio han permitido establecer que tanto la turbiedad como el color, presentes en una muestra de agua, pueden ser eliminados utilizando partículas de magnetita.

La selección del tratamiento a utilizar, dependerá de las características que presente el agua. La turbiedad, alcalinidad y el pH son entre otros, los factores que influyen de manera preponderante en la selección del tratamiento.

El proceso magnetita es una alternativa de tratamiento que se plantea para aguas claras, altamente alcalinas, y ligeramente ácidas (pH no mayor a 6,5).

Las eficiencias de remoción de turbiedad y color alcanzadas por este tratamiento son de 84,4 y 38,4 % respectivamente. Sin embargo, la gran cantidad de magnetita aplicada permite la incorporación de partículas de fierro, las cuales desmejoran nuevamente la calidad del agua, esto se logra superar con una unidad de filtración la que no solo permitirá la eliminación de las partículas de fierro que ingresaron al agua, sino que también, incrementará el porcentaje de remoción de turbiedad y color. Una de las grandes ventajas de esta técnica está en la rapidez del tratamiento, por lo general se requiere un tiempo aproximado de 5 minutos, antes de que el agua ingrese a la unidad de filtración.

El proceso magnetita-sulfato de aluminio, es un tratamiento que se recomienda para aguas que presentan un pH ligeramente alcalino (pH 7-8) así como para cualquier valor de turbiedad y alcalinidad. Las remociones alcanzadas por este tratamiento en lo que a turbiedad y color respecta son del 99,7 y 40 % respectivamente.

La utilización combinada de magnetita y sulfato de aluminio, permite una reducción en el consumo de este último, en aproximadamente un 20%, sin embargo alcalinidades bajas provocan un mayor ahorro de coagulante. Así mismo, los flocs formados durante este tratamiento presentan velocidades de asentamiento mayores que los flocs formados con sulfato de aluminio solo, requiriendo por lo tanto menores tiempos de sedimentación.

## 10.2 EVALUACION ECONOMICA

Los datos obtenidos no permiten una evaluación económica en lo que a construcción y operación se refiere. La evaluación económica, de estos dos procesos de tratamiento en estudio, será realizado en base a los requerimientos de insumos químicos que demanden cada uno de ellos.

Con la finalidad de efectuar un estudio comparativo es necesario no sólo mostrar los costos de las dos alternativas propuestas, sino también el costo que demanda la clarificación del agua mediante el tratamiento convencional con sulfato de aluminio.

Los costos de los diferentes insumos químicos utilizados fueron establecidos según los precios pagados en el mercado, a diciembre de 1994.

Cuadro N° 10-1  
COSTO DE LOS INSUMOS QUIMICOS

INSUMO	UNIDAD	COSTO (\$)
Magnetita	Kg	0.018
Sulfato de aluminio	Kg	0.280
Hidróxido de sodio	Kg	1.060

El costo de la magnetita no será considerado por ser un producto reutilizable siendo además, su costo de adquisición sumamente bajo comparado con los otros productos.

Los costos que a continuación se determinan, para cada alternativa de tratamiento, corresponden para la clarificación de 1 m<sup>3</sup> de agua.

#### 10.2.1 COSTO DE INSUMOS QUIMICOS DEL TRATAMIENTO MAGNETITA

El único material utilizado en la eliminación de los coloides de turbiedad, durante este proceso, fue la magnetita. La regeneración de la magnetita a valores de pH altos hace de este tratamiento, una alternativa en donde el costo químico de regeneración es el valor principal frente al costo de adquisición de dicho mineral, por lo que este último no será considerado.

##### Requerimiento de tratamiento:

Magnetita: 10 gr/l x 1000 lt = 10 kg

##### Requerimiento de lavado:

Los datos del cuadro N° 9-1, permiten calcular el volumen del agua alcalina:

<u>Cantidad de magnetita</u>	<u>Cantidad de Agua Alcalina</u>
<u>lavada y regenerada</u>	<u>utilizada</u>
242,5 gr .....	2.8 lt
10 000,00 gr.....	V



Realizando los cálculos se tiene que el volumen de agua alcalina necesario para lavar 10 kg de magnetita es :

$$V = 115,46 \text{ lt}$$

Según los datos obtenidos durante el lavado, la preparación del agua alcalina demanda un consumo de 0,24 gr NaOH por cada litro, por lo que los 115,46 litros de agua consumen 27,71 gr de NaOH.

Los requerimientos totales de lavado en este proceso están dados por:

$$\text{NaOH} = 27,71 \text{ gr}$$

$$\text{Agua} = 404,12 \text{ lt (40,41\%)}$$

Cuadro N°10-2

COSTO DE LOS INSUMOS QUÍMICOS UTILIZADOS EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA CON MAGNETITA

INSUMO	CANTIDAD	P. UNITARIO	P. PARCIAL
Magnetita	10,0000 kg	0,0000	0,0000
NaOH	0,0277 kg	1,0600	0,0294
<b>COSTO TOTAL:</b>			<b>\$ 0,0294</b>

#### 10.2.2 COSTO DE INSUMOS QUÍMICOS DEL TRATAMIENTO MAGNETITA-SULFATO

Esta alternativa es un tratamiento combinado de magnetita con sulfato de aluminio. La aplicación del primero acelera el proceso de sedimentación así como permite, bajo ciertas condiciones, una reducción del consumo de sulfato de aluminio.

Requerimiento de tratamiento:

Magnetita : 2,5 gr/lit x 1000 lit = 2,50 kg

Sulfato : 20,0 mg/lit x 1000 lit = 0,02 kg

Requerimiento de lavado:

Al igual que en el proceso anterior la utilización de partículas de magnetita generan como consecuencia, el lavado de las mismas, siendo el costo de estas, el que se requiere para la limpieza y regeneración de ellas.

La cantidad de los insumos que intervienen en la regeneración de la magnetita serán, determinados con la ayuda de los datos que se indican en el cuadro N° 9-1. Así, para lavar 215 gr de magnetita se requirieron 2,0 litros de agua alcalina, entonces tenemos que:

<u>Cantidad de magnetita</u>	<u>Cantidad de Agua Alcalina</u>
<u>lavada y regenerada</u>	<u>utilizada</u>
215,00 gr .....	2,0 lit
2500,00 gr.....	V

$$V = 23,26 \text{ lit}$$

La cantidad de NaOH necesaria para preparar 23,26 litros de agua alcalina es:

$$0,24 \text{ gr NaOH/lit} \times 23,26 \text{ lit} = 5,58 \text{ gr NaOH}$$

En conclusión los requerimientos para lavar 2,5 kg de

magnetita son:

NaOH = 5,58 gr

Agua = 81,40 lt (8,14 %)

Cuadro N° 10-3

COSTO DE LOS INSUMOS QUÍMICOS UTILIZADOS EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA CUANDO SE EMPLEA EL PROCESO SULFATO-MAGNETITA

INSUMO	CANTIDAD	P. UNITARIO	P. PARCIAL
Magnetita	2,5000 kg	0,0000	0,0000
Sulfato	0,0200 kg	0,2800	0,0056
NaOH	0,0056 kg	1,0600	0,0059
<b>COSTO TOTAL:</b>			<b>\$ 0,0115</b>

### 10.2.3 COSTO DE INSUMOS QUIMICOS DEL TRATAMIENTO CONVENCIONAL.

Con la finalidad de poder determinar la viabilidad económica de los dos procesos en estudio, es necesario determinar el costo, que implica la clarificación del agua mediante el empleo del sulfato de aluminio.

#### Requerimiento de tratamiento:

La clarificación del agua mediante este proceso demanda como único gasto, la adquisición del sulfato de aluminio.

Sulfato : 25 mg/lt x 1000 lt = 0,025 kg

**Cuadro N°10-4**  
**COSTO DE LOS INSUMOS QUÍMICOS UTILIZADOS EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA**  
**CON SULFATO DE ALUMINIO**

INSUMO	CANTIDAD	P. UNITARIO	P. PARCIAL
Sulfato	0,0250 kg	0,2800	0,0070
<b>COSTO TOTAL: \$ 0,0070</b>			

#### 10.2.4 ANALISIS COMPARATIVO

Como se puede apreciar en el cuadro N° 10-5, el costo químico del proceso de tratamiento magnetita, es sumamente elevado en comparación a las otras dos técnicas, por lo que su aplicabilidad desde este punto de vista se descarta. El costo químico del tratamiento magnetita coagulante resulta ser mayor en un 64% al obtenido cuando se emplea sulfato de aluminio, pero las ventajas técnicas obtenidas hasta el momento no descartan la posibilidad del empleo de este proceso, mas bien aún, invitan a profundizar dicho estudio con la finalidad de obtener una reducción en los requerimientos de lavado.

**Cuadro N°10-5**  
**COSTOS COMPARATIVOS DE LOS TRATAMIENTOS ESTUDIADOS**

TIPO DE TRATAMIENTO	COSTO (\$/m <sup>3</sup> )
Magnetita	0,0294
Magnetita-Sulfato	0,0115
Sulfato	0,0070

Un análisis comparativo de mayor exactitud, podrá ser obtenido cuando se establezcan los tipos de unidades que conformarán cada proceso, lo cual sólo se logrará con la continuación de esta investigación.

Capítulo 11

**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## CONCLUSIONES

- Los resultados de los experimentos, bajo las condiciones empleadas, muestran que la magnetita es eficiente en la remoción de los coloides en suspensión. La alternativa de tratamiento Magnetita presenta una remoción del 85 %, mientras que la alternativa Magnetita-Sulfato presenta una remoción del 99.7 % .
- La adsorción de los coloides en la superficie de la magnetita es bastante rápida, generalmente se requieren tiempos de contacto entre 1 y 5 minutos.
- Cuando la magnetita es agregada, siempre aumenta la turbiedad en su fase inicial al mezclarlas con el agua. De ahí en adelante, dependerá de las propiedades del agua cruda y de la cantidad de magnetita aplicada el que la mayor turbiedad desaparezca.
- El factor principal en la adsorción de la magnetita de un material cargado negativamente es la carga positiva de la superficie de las partículas de magnetita a valores de pH bajos ( $\text{pH} < 7$ ).
- El incremento existente de la cantidad de magnetita a medida que aumenta la turbiedad del agua se debe principalmente al fenómeno de adsorción superficial. Al incrementarse la turbiedad es necesario que se incremente el área adsorbente lo cual se consigue incrementando la dosis, siempre y cuando se mantengan constante las otras variables.
- La sedimentabilidad de las partículas cuando se emplea magnetita como único material adsorbente se ve influenciada por la aplicación de un campo magnético. Cuando las partículas son expuestas a la acción de las fuerzas magnéticas, los sentidos de los campos de los dominios de cada uno de ellos, se orientan en la dirección de dicho campo, produciéndose

un alineamiento parcial o total según la intensidad aplicada. Cuando la intensidad es lo suficientemente fuerte, el alineamiento será total transformándose así cada partícula en un pequeño imán, provocando de esta manera el aglutinamiento de las mismas, generando como consecuencia de ello una sedimentación más rápida.

- El material adsorbido en la magnetita puede ser separado mediante un lavado alcalino a pH 11,5 lo cual también ayuda a reactivar la magnetita y preparar de este modo la superficie del óxido de hierro para otro ciclo de adsorción.
- La utilización de la magnetita como material adsorbente requiere de un tratamiento previo. Este resulta ser, similar al tratamiento del lavado y regeneración.
- La magnetita es un mineral que actúa no sólo como un material adsorbente, sino también como un material neutralizador. Este efecto depende básicamente de la cantidad de magnetita añadida. Es decir, mayores dosis generan mayor efecto de neutralización.
- Durante el proceso de tratamiento con magnetita sola, la presencia de una alcalinidad elevada, favorece la adsorción de los coloides en la superficie de la magnetita. Una alcalinidad alta trae como consecuencia el requerimiento de una dosis baja, así como el de presentar mayores eficiencias remocionales de turbiedad.
- No sólo, los mejores efectos de clarificación en la alternativa Magnetita se lograron al tratar aguas con valores de pH ácidos y con alcalinidades elevadas, sino también cuando la turbiedad de las mismas era baja (27,5 UNT).
- La acción clarificadora que produce el sulfato de aluminio puede ser

aumentada agregando dosis de magnetita. Los flóculos obtenidos de esta combinación, resultan ser mucho más densos que los obtenidos cuando se emplea únicamente sulfato de aluminio, provocando velocidades de asentamiento mayores durante los primeros 20 a 25 minutos, para luego presentar valores similares.

- Las velocidades de sedimentación alcanzadas por el proceso magnetita-sulfato suelen ser desde 35 % hasta 100 % mayores, que las velocidades de sedimentación cuando el sulfato actúa solo.
- El empleo de la magnetita conjuntamente con el sulfato de aluminio para turbiedades elevadas (100 UNT), no solo ofrece mejores resultados en lo que a remoción de turbiedad se refiere, sino que también favorece la reducción del contenido de hierro total presente. Así mismo, permite una reducción del 20% en el consumo del sulfato de aluminio, provocando de esta manera una mejora substancial en la calidad del agua decantada, al ser menos corrosiva.
- En el proceso del tratamiento con magnetita, la fase inicial de agitación es la más importante respecto al resultado final. Los diferentes resultados han comprobado que los movimientos rápidos facilitan la clarificación. Una agitación lenta ( $<330 \text{ s}^{-1}$ ) durante esta fase, produce una clarificación muy pobre, sobre todo si la turbiedad es alta.
- Hasta el momento, los ensayos realizados para mejorar la calidad del agua en muestras con baja turbiedad mediante el tratamiento con magnetita, no han sido muy convincentes (turbiedad final aproximadamente igual a 5 UNT) frente a la clarificación alcanzada por el alumbre.
- El incremento del hierro total en las aguas decantadas cuando se emplea el Proceso Magnetita, corresponde al hierro III insoluble, que



conforman los flóculos que no lograron sedimentar. La eliminación de estas partículas puede ser llevada a cabo mediante el proceso convencional de filtración, manteniendo de esta manera niveles mínimos en relación con los máximos recomendados por las normas.

- La utilización de la magnetita, ya sea sola o combinada, económicamente resulta ser menos ventajosa que el empleo del sulfato de aluminio. Una de las formas de reducir este costo es mediante la disminución del tamaño de tales partículas. Para una cantidad cualquiera de magnetita se tendrá mayor área superficial cuando el diámetro de las mismas sea lo más reducido posible, que cuando ésta resulta ser mucho mayor. Por lo tanto, se requieren menores dosis cuando las partículas son más finas, lo cual genera una reducción notable en los requerimiento de lavados al ser menor la cantidad de magnetita a limpiar y regenerar.

#### RECOMENDACIONES

- La utilización de la magnetita como coagulante primario no ofrece resultados satisfactorios, por lo que su utilización como tal, se descarta desde todo punto de vista.

- Si bien, las diferentes pruebas realizadas han demostrado que la utilización de la magnetita como ayudante de coagulación ofrece mejores resultados que el procedimiento convencional con sulfato de aluminio, económicamente no sucede lo mismo por lo que se invita a profundizar el trabajo experimental a fin de reducir los costos que demanda la regeneración de la magnetita.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. PRIESTLEY, A. J. y NADEBAUM, P. R. : SIROFLOX a new water clarification technique.
2. RAPER, W.G.C.; ANDERSON, N.J.; IKI,TO, B.A. ; DIXON, D.R.; KOLARIK, L.O.; PRIESTLEY, A.J. y WEISS, D.E. : Water Clarification and Decoloratization with the use of regenerable Magnetic particles, Australia, 1978.
3. MACRAE, I.C. y EVANS, S.K. : Factors influencing the adsorption of bacteria to magnetite in water and wastewater, Australia, 1981.
4. Aspects of Water and sewage Treatment in Australia.
5. ORGANIZACION PANAMERICANA DE LA SALUD : Guías para la Calidad del Agua Potable, volumen 1, 1985.
6. GALAI GORCHIEV, II. y OZOLINS, G. : Pautas de la OMS sobre la Calidad del Agua Potable, 1982.
7. ORGANIZACION MUNDIAL DE LA SALUD : Normas Internacionales para el Agua Potable, Ginebra, 1972.
8. JIMENO, BLASCO, Enrique : Análisis de Agua y Desagüe, Perú.
9. REPETTO, Giuseppe y MORAN, Ana Coralia : Apuntes sobre calidad de las Aguas de uso Potable, El Salvador.
10. BRIONES CAPELLAS, R. : Programa de tecnificación de supervisores de operación de Plantas de Tratamiento de Agua en el Perú, Perú, 1982.
11. UNIVERSIDAD DE CHILE : Calidad química, control microbiológico y desinfección del Agua Potable, Chile, 1977.
12. CASAS REYES, José V.; MUÑOZ QUEVEDO, Josué y QUIROGA CHIAPARRO, Jorge :

Física, México, 1977.

13. CANTU, Luis L. : Electricidad y Magnetismo para estudiantes de Ciencias e Ingeniería, México, 1986.
14. PERALTA TUPPIA, Salvador : Electricidad, Perú, 1974.
15. VAN VALKENBURGH, Nooger y NEVILLE, Inc. : Electricidad Básica, volumen 1, Argentina, 1971.
16. KIRCIMER, Cliff J. : Aspectos Físicos y Químicos de la Coagulación del Agua, CEPIS-Perú, 1977.
17. ARBOLEDA VALENCIA, Jorge : Teoría, Diseño y Control de los Procesos de Clarificación del Agua, CEPIS-Perú, 1981.
18. CAMPOS, José Roberto : Principios Fundamentais de Coagulação e Floculação, Universidad de São Paulo, 1973.
19. O'MELIA, Charles R. : The Coagulation Process Theoretical Concepts Useful in Desing, University of North Carolina, 1969.
20. AWWA : Control de Calidad y Tratamiento del Agua, España, 1975.
21. RICH, LINVIL G. : Unit Processes of Sanitary Engineering, United States of America, 1971.
22. GOMELIA, C. y GUERREE, H. : Tratamiento de agua para abastecimiento público, España, 1977.
23. ARBOLEDA VALENCIA, Jorge; VARGAS CABALLERO, Fernando y CORREAL CORREAL, Hernando : Manual de tratamiento de aguas potables, Venezuela, 1969.
24. CENTRO PANAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y CIENCIAS DEL AMBIENTE. (CEPIS) : Hoja de Divulgación Técnica (Tecnología CEPIS para el Tratamiento de agua: Estado Actual), Perú, Diciembre de 1992.

25. ANUARIO MINERO : Perú, 1991.
26. MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS : Dirección General de Planificación y Estadísticas, Perú 1993.
27. MARIO SAMAME BOGGIO : El Perú Minero.
28. INSTITUTO DE INGENIERIA DE SAN ANDRES, ORGANIZACION PANAMERICANA DE LA SALUD : Manual del Curso sobre, Métodos Modernos en el Diseño de plantas de tratamiento, Bolivia, 1977.
29. CENTRO PANAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y CIENCIAS DEL AMBIENTE (CEPIS) : Evaluación de Plantas de Tratamiento de Agua, Perú.
30. J.E. SINGLEY Ph. D. : Universidad de Florida EE.UU., Revisión de la Teoría de la Coagulación del Agua.
31. BANCO CENTRAL DE RESERVA DEL PERU : Revista Nota Semanal, Lima, diciembre de 1994.
32. APIA, AWWA, WPCF : Métodos Normalizados para el análisis de Aguas Potables y Residuales, 17 edición, 1989.