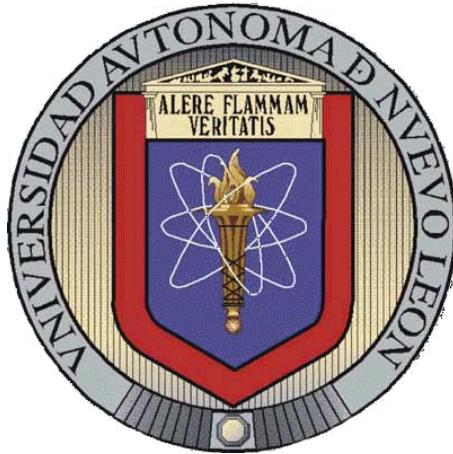


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS



**USO DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES (RNA) PARA LA
MODELACIÓN DE UNA UNIDAD DE ÓSMOSIS INVERSA EN UNA PLANTA
PILOTO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.**

POR

ALEJANDRO SALGADO REYNA

**Como requisito parcial para obtener el Grado de DOCTOR EN CIENCIAS con
Orientación en Procesos Sustentables.**

JULIO 2013

**USO DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES (RNA) PARA LA
MODELACIÓN DE UNA UNIDAD DE ÓSMOSIS INVERSA EN UNA PLANTA
PILOTO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.**

Revisión y aprobación de la Tesis:

Dr. Eduardo Soto Regalado
Asesor de la Tesis

Dra. María Teresa Garza González
Co – Asesor de Tesis

Dr. Felipe de Jesus Cerino Córdova
Revisor 1

Dr. Jose Ángel Loredo Medrano
Revisor 2

Dra. Mónica María Alcalá Rodríguez
Revisor 3

Dr. Ricardo Gomez González
Revisor 4

Dr. Refugio Bernardo Garcia Reyes
Revisor 5

Dr. Benjamin Limón Rodríguez
Revisor 6

RESUMEN

Alejandro Salgado Reyna
Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ciencias Químicas

Fecha de Graduación, Julio, 2013

Título del Estudio: **USO DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES (RNA) PARA LA MODELACION DE UNA UNIDAD DE ÓSMOSIS INVERSA EN UNA PLANTA PILOTO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.**

Número de Páginas: 206

Candidato para el grado de Doctorado en Ciencias con orientación en Procesos Sustentables.

Área de Estudio: Procesos Sustentables

Propósito y Método del Estudio: Como antecedentes en este trabajo se estudiaron las descargas de aguas residuales de una planta de productora de latas de aluminio, cuya planta de tratamiento no es capaz de recuperar más del 40% del agua que trata. El objetivo de este trabajo fue aplicar la metodología de RNA a una planta de tratamiento de aguas residuales de una industria de envasado, para encontrar sus condiciones óptimas de operación, las cuales permitieron incrementar la tasa de reúso del agua residual generada. Del mismo modo los objetivos particulares fueron estudiar el comportamiento de las principales unidades de proceso; reactor coagulador, sedimentador y MOI ante diferentes condiciones de operación. Para el proceso de coagulación, fueron efectuadas pruebas de jarras para seleccionar la mejor pareja de coagulante y floculante y al mismo tiempo se encontraron las óptimas condiciones de operación del reactor que maximizaron la calidad del agua a la salida de este equipo. Para el proceso de sedimentación fueron efectuadas pruebas de sedimentación en columna y el tiempo de detención fue calculado. Para MOI, fueron efectuadas corridas con diferentes condiciones de operación (pH y concentración de agente anti-incrustante) y la que maximizó el flujo permeado y su calidad, fue seleccionada. Para el manejo y modelación de los datos experimentales, el objetivo general de este trabajo fue el uso de RNA en el proceso de MOI, pero como objetivos particulares fue aplicar diseño factorial y ASR tanto a MOI como al reactor coagulador y sedimentador para poder encontrar puntos óptimos de operación y/o concentraciones de reactivos utilizados, así como verificar la eficacia de dichas metodologías y concordancia entre las mismas.

Contribuciones y Conclusiones: No fue encontrada literatura reciente que analizara/modelara el comportamiento de diferentes equipos de una planta de tratamiento a la vez. Los resultados obtenidos en este trabajo de investigación, demostraron la eficacia de los métodos de modelación utilizados, principalmente el uso de RNA para encontrar óptimas condiciones de operación en MOI. La tasa de recuperación del agua industrial siendo tratada, así como la calidad en la mayoría de sus parámetros fue incrementada entre el 30 y el 100% y los costos operativos de la planta disminuyeron de una manera radical en más del 50%.

FIRMA DEL ASESOR: _____

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Eduardo Soto Regalado, Asesor de mi tesis. Así como a la Dra. Maria Teresa Garza Gonzalez, Dr. Ricardo Gomez Gonzalez, Dr. Jose Angel Loredo Medrano, Dr. Felipe de Jesus Cerino Córdova, Dr. Refugio Bernardo Garcia Reyes, Dra. Monica María Alcalá Rodríguez y Dr. Benjamin Limón Rodríguez, por formar parte de mi Comité de Tesis, por sus valiosas sugerencias y apoyo continuo en la revisión del presente trabajo.

Al Dr. Sergio Fernandez Delgadillo, Director de la Facultad de Ciencias Químicas, cuyo apoyo fue fundamental para la realización de mis estudios.

Al Laboratorio de Ingeniería Química de nuestra facultad y muy especialmente al IQ Adrian Isaí Sanchez Guajardo por todo su valioso apoyo para el desarrollo de esta investigación.

A la empresa AQUAMEX y muy especialmente al Ingeniero Alejandro Montes Medina, Director Comercial y de Ingeniería de la misma, por su invaluable apoyo para poder tener acceso a este proyecto.

A mis alumnos, quienes siempre me han apoyado y muy especialmente durante esta etapa de mi vida.

Y en general quiero agradecer a todas aquellas personas que contribuyeron de una forma u otra en la realización de este trabajo.

DEDICATORIA

A ti Nidia, por ser un elemento fundamental en mi camino, esa fuente de amor, motivación y apoyo cotidianos y todo un ejemplo de trabajo y dedicación a tu familia.

A mis hijos Luis Alejandro, Carlos Alberto, Jose Alfonso y Nydia Elizabeth, por el apoyo moral y amor que siempre me han brindado.

Muy especialmente quiero agradecer a Don Alfonso, Doña Esther, Don Luis, Alfonso y Arturo, a quienes ya no puedo ver, pero siento muy cerca de mí en todo momento y me siguen alentando en mi camino.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO	PÁGINA
1. INTRODUCCIÓN	18
1.1 Tratamiento de Aguas Residuales Provenientes de un Proceso Industrial de Envasado (Caso de Estudio)	26
1.1.1 Situación Actual (Antecedentes)	27
1.1.2 Análisis Crítico de la Literatura	29
1.1.3 Justificación	35
1.1.4 Hipótesis	38
1.1.5 Objetivo General	38
1.1.6 Objetivos Particulares	38
2. MATERIALES Y MÉTODOS	39
2.1 Material, Equipo y Ubicación del Equipo	41
2.1.1 A Nivel Laboratorio	41
2.1.1.1 Coagulación y Floculación	42
2.1.1.2 Sedimentación en Columna	42
2.1.2 A Nivel Planta Piloto	43
2.1.2.1 Filtración Mediante Membrana	44
2.2 Procedimiento Experimental	45
2.2.1 Pretratamiento	45
2.2.1.1 Eliminación de Grasas	46
2.2.1.2 Coagulación y Floculación	46
2.2.1.2.1 Prueba de Jarras	47
2.2.1.2.2 Determinación de Condiciones de Operación del Reactor Coagulador	51
2.2.1.3 Sedimentación	52
2.2.1.4 Filtración mediante Arena y Carbón Activado	54
2.2.1.5 Filtro Prensa	55
2.2.1.6 Filtros Pulidores	55
2.2.2 Sistema de Filtración Mediante Membrana de Ósmosis Inversa (MOI)	55
2.3 Manejo y Disposición de los Residuos Generados	59
2.4 Información Técnica	59
2.4.1 Parámetros de Calidad del Agua	60
2.4.2 Información Técnica del Equipo	60
2.4.2.1 Filtros Coalescentes	60
2.4.2.2 Reactor Coagulador	62
2.4.2.3 Tanque Sedimentador	64
2.4.2.4 Filtros de Arena y Carbón Activado	66

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO	PÁGINA
2.4.2.5 Filtro Prensa	68
2.4.2.6 Filtros Pulidores	69
2.4.2.7 Membrana de Ósmosis Inversa	70
2.5 Modelación	73
2.5.1 Tipos de Modelación	73
2.5.1.1 Diseño Factorial	74
2.5.1.2 Análisis de Superficie de Respuesta (ASR)	74
2.5.1.3 Redes Neuronales Artificiales (RNA)	76
3. RESULTADOS Y DISCUSIONES	80
3.1 Caracterización del Agua Residual	80
3.2 Resultados Experimentales	81
3.2.1 Reactor Coagulador	81
3.2.2 Tanque Sedimentador	102
3.2.3 Membrana de Ósmosis Inversa (MOI)	105
3.2.3.1 Caso 1	106
3.2.3.2 Caso 2	108
3.2.3.3 Caso 3	111
3.2.3.4 Caso 4	114
3.2.3.5 Caso 5	116
3.2.3.6 Caso 6	119
3.2.3.7 Caso 7	122
3.2.3.8 Caso 8	124
3.2.3.9 Caso 9	127
3.2.3.10 Aplicación de Análisis de Superficie de Respuesta (ASR) en MOI	130
3.2.3.11 Aplicación de Redes Neuronales Artificiales (RNA) en MOI	136
3.3 Análisis Comparativo entre la Planta de tratamiento actual y la Propuesta	142
4 CONCLUSIONES	146
5 RECOMENDACIONES	152
BIBLIOGRAFÍA	153
APÉNDICES	160
APÉNDICE A	161
APÉNDICE B	197
APÉNDICE C	206

LISTA DE TABLAS

TABLA		PÁGINA
TABLA 1	Combinaciones coagulante-floculante usadas en pruebas de Jarras	47
TABLA 2	Valores asignados a cada variable en el diseño factorial	48
TABLA 3	Diseño factorial usado en equipo para prueba de jarras	49
TABLA 4	Análisis experimental del sistema MOI	57
TABLA 5	Información de diseño de filtros coalescentes	61
TABLA 6	Información de diseño del reactor coagulador	63
TABLA 7	Información de diseño del tanque sedimentador	65
TABLA 8	Información de diseño de los filtros de arena y grava	67
TABLA 9	Información de diseño de los filtros de carbón activado y antracita	67
TABLA 10	Información de diseño del filtro prensa	69
TABLA 11	Información de diseño de filtros pulidores	70
TABLA 12	Información de diseño de MOI	72
TABLA 13	Características de calidad del agua industrial residual alimentada a nuestra planta piloto de tratamiento de aguas residuales	80
TABLA 14	Prueba de jarras para CaO-NALCO 9907	83
TABLA 15	Prueba de jarras para Al ₂ (SO ₄) ₃ -NALCO 9907	84
TABLA 16	Prueba de jarras para FeCl ₃ -NALCO 9907	85
TABLA 17	Prueba de jarras para CaO-NALCO 3249	86
TABLA 18	Prueba de jarras para Al ₂ (SO ₄) ₃ -NALCO 3249	87
TABLA 19	Prueba de jarras para FeCl ₃ -NALCO 3249	88
TABLA 20	Condiciones de operación sugeridas para el reactor Coagulador	90
TABLA 21	Pruebas de sedimentación en columna	103
TABLA 22	Desempeño del proceso MOI bajo diferentes condiciones de operación	133
TABLA 23	Composición de sólidos contenidos en MOI	134

LISTA DE TABLAS

TABLA		PÁGINA
TABLA 24	Resultados de RNA para los datos experimentales obtenidos de todos los casos usados para Estudiar el sistema MOI, con 3 neuronas en Cada capa oculta	137
TABLA 25	Resultados de RNA utilizando diferentes tipos de redes para evaluar los datos experimentales obtenidos en el caso 9, durante la prueba del sistema MOI	138
TABLA 26	Análisis comparativo entre las diferentes redes usadas	139
TABLA 27	Resultados de RNA utilizando diferentes configuraciones en la red, para la evaluación de los datos experimentales del caso 9, obtenidos durante la prueba del sistema MOI	140
TABLA 28	Comparación de resultados operacionales entre la planta de tratamiento actual (Reynolds & Richards) y la propuesta	143
TABLA 29	Análisis comparativo de costos operacionales entre la planta de tratamiento actual (Reynolds & Richards) y la propuesta	145
TABLA I	Datos experimentales caso 1 en MOI	161
TABLA II	Datos experimentales caso 2 en MOI	165
TABLA III	Datos experimentales caso 3 en MOI	169
TABLA IV	Datos experimentales caso 4 en MOI	173
TABLA V	Datos experimentales caso 5 en MOI	177
TABLA VI	Datos experimentales caso 6 en MOI	181
TABLA VII	Datos experimentales caso 7 en MOI	185
TABLA VIII	Datos experimentales caso 8 en MOI	188
TABLA IX	Datos experimentales caso 9 en MOI	193

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
Figura 1 Diagrama de flujo de una planta de filtración rápida de arena del Tipo de Reynolds y Richards	27
Figura 2 Planta de tratamiento de aguas residuales provenientes de una Industria de manufactura de latas de aluminio	28
Figura 3 Columna de sedimentación	52
Figura 4 Diagrama de especiación para el Silicio	56
Figura 5 Diagrama de especiación para el calcio	90
Figura 6 Diagrama de especiación para el Aluminio	91
Figura 7 Diagrama de especiación para el Fierro	92
Figura 8 Pareto de los efectos estandarizados de la pareja CaO-NALCO 9907	92
Figura 9 Pareto de los efectos estandarizados de la pareja $Al_2(SO_4)_3$ -NALCO 9907	93
Figura 10 Pareto de los efectos estandarizados de la pareja $FeCl_3$ -NALCO 9907	94
Figura 11 Pareto de los efectos estandarizados de la pareja CaO-NALCO 3249	95
Figura 12 Pareto de los efectos estandarizados de la pareja $Al_2(SO_4)_3$ -NALCO 3249	96
Figura 13 Pareto de los efectos estandarizados de la pareja $FeCl_3$ -NALCO 3249	97
Figura 14 ASR para la corrida 1 de la prueba de jarras $Al_2(SO_4)_3$ -NALCO 9907 (1.0 mL de coagulante y Una velocidad de agitación de 100 s^{-1} para una Transmitancia de 99.34%)	98

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
Figura 15 ASR para la corrida 5 de la prueba de jarras $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ -NALCO 9907 (1.0 mL de coagulante y Un pH de 10 para una transmitancia de 98.00%)	99
Figura 16 ASR para la corrida 6 de la prueba de jarras $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ -NALCO 9907 (4.0 mL de floculante y Un pH de 10 para una transmitancia de 99.00%)	100
Figura 17 ASR para la corrida 15 de la prueba de jarras $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ -NALCO 9907 (4.0 mL de coagulante y Una velocidad de agitación de 100 s^{-1} para una Transmitancia de 99.68%)	101
Figura 18 ASR para la corrida 16 de la prueba de jarras $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ -NALCO 9907 (1.0 mL de coagulante y Una velocidad de agitación de 100 s^{-1} para una Transmitancia de 100.00%)	102
Figura 19 Curvas de isoporcentaje de sedimentación	105
Figura 20 Variación de la concentración de SiO_2 a la entrada de MOI, caso 1	106
Figura 21 Variación de la concentración de SiO_2 a la salida de MOI, caso 1	106
Figura 22 Variación de la concentración de SDT a la entrada de MOI, caso 1	106
Figura 23 Variación de la concentración de SDT a la salida de MOI, caso 1	107
Figura 24 Flujo de agua permeada en MOI, caso 1	107
Figura 25 Variación de la concentración de SiO_2 a la entrada de MOI, caso 2	108
Figura 26 Variación de la concentración de SiO_2 a la salida de MOI, caso 2	109
Figura 27 Variación de la concentración de SDT a la entrada de MOI, caso 2	109
Figura 28 Variación de la concentración de SDT a la salida de MOI, caso 2	109

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
Figura 29 Flujo de agua permeada en MOI, caso 2	110
Figura 30 Variación de la concentración de SiO ₂ a la entrada de MOI, caso 3	111
Figura 31 Variación de la concentración de SiO ₂ a la salida de MOI, caso 3	111
Figura 32 Variación de la concentración de SDT a la entrada de MOI, caso 3	112
Figura 33 Variación de la concentración de SDT a la salida de MOI, caso 3	112
Figura 34 Flujo de agua permeada en MOI, caso 3	112
Figura 35 Variación de la concentración de SiO ₂ a la entrada de MOI, caso 4	114
Figura 36 Variación de la concentración de SiO ₂ a la salida de MOI, caso 4	114
Figura 37 Variación de la concentración de SDT a la entrada de MOI, caso 4	114
Figura 38 Variación de la concentración de SDT a la salida de MOI, caso 4	115
Figura 39 Flujo de agua permeada en MOI, caso 4	115
Figura 40 Variación de la concentración de SiO ₂ a la entrada de MOI, caso 5	116
Figura 41 Variación de la concentración de SiO ₂ a la salida de MOI, caso 5	117
Figura 42 Variación de la concentración de SDT a la entrada de MOI, caso 5	117
Figura 43 Variación de la concentración de SDT a la salida de MOI, caso 5	117
Figura 44 Flujo de agua permeada en MOI, caso 5	118
Figura 45 Variación de la concentración de SiO ₂ a la entrada de MOI, caso 6	119
Figura 46 Variación de la concentración de SiO ₂ a la salida de MOI, caso 6	119
Figura 47 Variación de la concentración de SDT a la entrada de MOI, caso 6	120
Figura 48 Variación de la concentración de SDT a la salida de MOI, caso 6	120
Figura 49 Flujo de agua permeada en MOI, caso 6	120
Figura 50 Variación de la concentración de SiO ₂ a la entrada de MOI, caso 7	122
Figura 51 Variación de la concentración de SiO ₂ a la salida de MOI, caso 7	122

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
Figura 52 Variación de la concentración de SDT a la entrada de MOI, caso 7	122
Figura 53 Variación de la concentración de SDT a la salida de MOI, caso 7	123
Figura 54 Flujo de agua permeada en MOI, caso 7	123
Figura 55 Variación de la concentración de SiO ₂ a la entrada de MOI, caso 8	124
Figura 56 Variación de la concentración de SiO ₂ a la salida de MOI, caso 8	125
Figura 57 Variación de la concentración de SDT a la entrada de MOI, caso 8	125
Figura 58 Variación de la concentración de SDT a la salida de MOI, caso 8	125
Figura 59 Flujo de agua permeada en MOI, caso 8	126
Figura 60 Variación de la concentración de SiO ₂ a la entrada de MOI, caso 9	127
Figura 61 Variación de la concentración de SiO ₂ a la salida de MOI, caso 9	127
Figura 62 Variación de la concentración de SDT a la entrada de MOI, caso 9	128
Figura 63 Variación de la concentración de SDT a la salida de MOI, caso 9	128
Figura 64 Flujo de agua permeada en MOI, caso 9	128
Figura 65 Variación de la concentración de SiO ₂ a la salida de MOI como una función de la concentración de agente anti-incrustante y del pH	130
Figura 66 Variación de la concentración de SDT a la salida de MOI como una función de la concentración de agente anti-incrustante y del pH	131
Figura 67 Variación del flujo permeado a la salida de MOI como una función de la concentración de agente anti-incrustante y del pH	132
Figura 68 Diseño de la arquitectura de la red usada para obtener los mejores resultados para el caso 9 en MOI	137
Figura 69 Modelo estructural de una RNA Newff	141

LISTA DE FIGURAS

FIGURA		PÁGINA
Figura 70	Valores experimentales y esperados (predicción) en función del tiempo para el flujo de agua permeada contra el tiempo en el caso 9 de MOI	141
Figura 71	Valores experimentales y esperados para el flujo de agua permeada en el caso 9 de MOI	142
Figura I	Desempeño de red neuronal Newff para caso 1	197
Figura II	Desempeño de red neuronal Newff para caso 2	198
Figura III	Desempeño de red neuronal Newff para caso 3	199
Figura IV	Desempeño de red neuronal Newff para caso 4	200
Figura V	Desempeño de red neuronal Newff para caso 5	201
Figura VI	Desempeño de red neuronal Newff para caso 6	202
Figura VII	Desempeño de red neuronal Newff para caso 7	203
Figura VIII	Desempeño de red neuronal Newff para caso 8	204
Figura IX	Desempeño de red neuronal Newff para caso 9	205
FIGURA X	Desempeño de red neuronal Newff para caso 9 con 4 neuronas en la capa oculta	206
FIGURA XI	Desempeño de red neuronal Newff para caso 9 con 6 neuronas en la capa oculta	207
FIGURA XII	Desempeño de red neuronal Newff para caso 9 con 10 neuronas en la capa oculta	207

ABREVIATURAS

MOI	Membrana de ósmosis inversa
ASR	Análisis de superficie de respuesta
PTAR	Planta de tratamiento de aguas residuales
TAR	Tratamiento de aguas residuales
RNA	Redes neuronales artificiales
RG	Redes grises
SCD	Simulación de cero descargas
DQO	Demanda química de oxígeno
DBO	Demanda biológica de oxígeno
SS	Sólidos suspendidos
SST	Sólidos suspendidos totales
OI	Ósmosis inversa
SDT	Sólidos disueltos totales
ST	Sólidos totales
RD	Ruta de diseño
ECM	Error cuadrático medio
T	Transmitancia
ABS	Absorbancia
RPM	Revoluciones por minuto
UNT	Unidades nefelométricas de turbidez
ES	Sistema de electrometalizado (recubrimiento con metales)
SIE	Sistema integral de electrometalizado
SEM	Sistema de electrometalizado
SRS	Sistema de recuperación de solución

NOMENCLATURA

G (1/s)	Gradiente medio de velocidad
P (KW)	Potencia necesaria
μ (N s/m ²)	Viscosidad dinámica
V (m ³)	Volumen del reactor
t_d (h)	Tiempo de detención
Q (m ³ /s)	Caudal
P_a (KN/m ²)	Presión atmosférica
V_a (m ³ /s.)	Volumen de aire introducido a la presión atmosférica
P_c (KN/m ²)	Presión del aire en el punto de descarga
v_c (m/h)	Carga superficial o velocidad de sedimentación
H (m)	Altura de la columna de sedimentación
t_c (h)	Tiempo necesario para alcanzar un tiempo de remoción x
R (%)	Remoción de SST
n	Número de curva con igual porcentaje de remoción
Δh_1 (m)	Distancia entre curvas de igual porcentaje de remoción
H (m)	Altura total de la columna de sedimentación
R_n (%)	Porcentaje de igual remoción de la curva número “n”
R_{n+1} (%)	Porcentaje de igual remoción de la curva número “n+1”
$(-\Delta P)$ (Kg _f /m ²)	Caída de presión a través del lecho empacado
L (m)	Longitud del lecho
D_p (m)	Diámetro de partícula
ρ (Kg/m ³)	Densidad del fluido
V_{sm} (m/s)	Velocidad superficial a una densidad promedio entre las condiciones de entrada y salida
ε (adimensional)	Porosidad del lecho
N_{Re} (adimensional)	Número de Reynolds promedio basado en V_{sm}
$\Delta V / \Delta \Theta$ (L/h)	Velocidad de filtración (Volumen de filtrado / tiempo)
V_f (L)	Volumen del filtrado

NOMENCLATURA

V_e (L)	Volumen de filtrado equivalente
$\mu \alpha W / g_c A^2 (-\Delta P_t)$ (h/m ²)	Pendiente del equipo (velocidad reciproca del filtro / Volumen del filtrado)
A (m ²)	Área de los marcos del filtro prensa
$(-\Delta P_t)$ (Kg/cm ²)	Diferencial de presión en el filtro prensa
g_c (9.80 m/s ²)	Aceleración gravitacional
J (L/h)	Flujo permeado en la membrana
A (m ²)	Área de filtración en la membrana
$\sum R_{TOT. MEM.}$ (Kg _f m / h)	Resistencia total en la membrana
ΔP (Kg _f /cm ²)	Diferencial de presión en flujos alimentado y permeado
$\Delta \Pi$ (Kg _f /cm ²)	Diferencial de presión osmótica de flujos alimentado y Permeado
Y	Función respuesta en un modelo de ASR
x_k	Nivel k de los factores en un ASR
E_k	Factor k en un ASR (condición de operación)
B_k	Coefficiente de regresión en un ASR
b_k	Coefficiente de estimación k para calcular B_k en un ASR
a_i	Valor de entrada a la neurona i de capa1 en una RNA
f	Función umbral en una RNA
f'	Derivada de la función umbral en una RNA
S_j	Valor de entrada promedio a capa 1 en una RNA
W_{ij}	Factor de pesos usado en valores de entrada a una RNA
$f(S_j)$	Salida o función de activación de neurona j en capa 1
δ_j	Cálculo del error en cada iteración en una RNA
t_j	Valor de salida deseado en cada iteración en una RNA
η	Coefficiente de aprendizaje en una RNA
E^P	Función error
d_k^P	Salida esperada (predicción) en la neurona k
y_k^P	Salida real en la neurona k

1. INTRODUCCIÓN

Cada año empresas en México y en el mundo drenan miles de metros cúbicos de aguas procedentes de sus procesos ante la imposibilidad de tratarlas, recuperarlas y reusarlas. Esto es debido principalmente a problemas operacionales relativos a la falta de aplicación de técnicas de ahorro de agua en descargas y falta de nuevas metodologías de tratamiento biológico, químico o fisicoquímico, combinadas con la operación de nuevas, más eficientes y menos costosas tecnologías [1-12].

El modelado de la operación de plantas de tratamiento de aguas residuales (TAR) usando la metodología de Análisis de Superficie de Respuesta (ASR), Simulaciones con Cero Descargas (SCD), Redes Grises (RG) y Redes Neuronales Artificiales (RNA) ha sido aplicado para el tratamiento de efluentes industriales generados por diversas industrias [13-17]. Las RNA han sido exitosamente utilizadas para modelar procesos de TAR con una variedad de propósitos como por ejemplo, para predecir parámetros de efluentes industriales, el tratamiento de aguas residuales provenientes de procesos que utilizan colorantes en la industria textil, filtración y nanofiltración y remoción de metales pesados [18-29].

Las técnicas de modelado han sido aplicadas para predecir la calidad del efluente en función de los parámetros del agua residual, para estimar el comportamiento de un sistema a diferentes condiciones y para predecir las mejores condiciones operacionales como una función de los parámetros de calidad del influente, tales como la demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO), sólidos suspendidos totales (SST), pH, conductividad y dureza total [30,31].

La propuesta de modelos matemáticos para la predicción de procesos de separación mediante el uso de membranas, es una herramienta muy valiosa en el campo de ciencia y tecnología de membranas. Los modelos para la simulación y optimización de sistemas juegan un importante papel en el desarrollo de procesos de separación económicos y eficientes [32,33].

La modelación matemática de cualquier proceso puede desarrollarse por cualquiera de las dos aproximaciones básicas:

(a) modelos teóricos o paramétricos basados en el conocimiento fundamental (mecanismo) de los procesos (esta aproximación también es conocida como la aproximación basada en el conocimiento) y (b) modelos empíricos (o no paramétricos), los cuales no requieren del conocimiento de los principios fundamentales que describen los procesos [34].

Así mismo han sido desarrollados métodos alternativos de modelación tales como el de RNA, los cuales pueden ofrecer ventajas significativas en cuanto a facilidad de uso y exactitud de resultados. Una red neuronal puede ser usada para simular las dinámicas no lineales de entrada y salida (modelo no paramétrico) basada en la información de datos de procesos en función del tiempo [35].

Una RNA está compuesta de un gran número de elementos simples (neuronas). Estas neuronas están conectadas entre ellas en diferentes maneras y por consiguiente formando diferentes tipos de redes neuronales. La RNA más popular es la red neuronal multi-capa alimentada hacia adelante, en la cual las neuronas están arregladas en tres capas: capa de entrada, capa oculta y capa de salida [36].

Una red neuronal alimentada hacia adelante tiene usualmente una o más capas ocultas, las cuales hacen posible que la red direcciona correlaciones no lineales y complejas [37,38]. El presente trabajo muestra datos experimentales y modelados de una unidad de ósmosis inversa (OI) localizada en una planta piloto de TAR. Los efluentes provenientes de varios procesos en una planta de fabricación de latas de aluminio fueron mezclados y sujetos a un proceso de pretratamiento el cual está formado de filtros coalescentes, coagulación-floculación y sedimentación por gravedad, filtros de arena y carbón activado, filtros de pulimento, así como un proceso de filtrado a presión utilizando una membrana.

Dentro del pretratamiento, los procesos de coagulación-floculación, toman una gran importancia por ser primordiales para asegurar la calidad del agua llegando a la unidad de ósmosis inversa. La pequeña dimensión de las pequeñas partículas presentes en un agua, así como la existencia de cargas negativas repartidas en su superficie, dan lugar a una gran estabilidad de las suspensiones coloidales. Cuanto más pequeñas sean estas partículas que lleva consigo el agua, más difícil se hace su separación por sedimentación natural, basada en la gravedad. Por ello deben aplicarse procesos y tecnologías que faciliten esa operación, mejorando las características del agua que llega a la etapa de decantación, a base de agregar partículas contenidas en otras mayores, de mayor superficie específica y peso, capaces de separarse por sedimentación o flotación. En el campo del tratamiento de aguas, la coagulación es por definición, el fenómeno de desestabilización de las partículas coloidales, que puede conseguirse especialmente por medio de la neutralización de sus cargas eléctricas.

El objetivo de la coagulación como proceso previo a la decantación es cambiar las propiedades de los insolubles, de modo que sean más fácilmente separables. Las partículas contenidas en el agua forman campos de fuerza en su seno, pudiendo hallarse tamaños de partículas diversos como:

- a. Partículas que están en forma de suspensión, de tamaños mayores a 10^{-7} m.
- b. Partículas que forman una solución coloidal, de tamaños entre 10^{-7} y 10^{-9} m.
- c. Aquellas que forman una verdadera solución, de tamaños menores a 10^{-9} m.

La coagulación se centrará en aquellas partículas cuyos tamaños oscilen entre 10^{-4} y 10^{-9} m, partículas en suspensión y solución coloidal, no separables por decantación (gravedad) o por filtración. Los sistemas coloidales estables pueden ser de dos tipos: hidrofílicos o hidrofóbicos. La mayor parte de los contaminantes presentes en las aguas residuales urbanas o industriales, están constituidos por partículas coloidales de carácter hidrofílico. En el grupo de las hidrófobas hay que incluir sustancias insolubles en agua como arcillas o grasas, que se mantienen en suspensión como resultado de la repulsión electrostática experimentada debido a su carga iónica. La teoría de la estabilidad de los coloides se conoce como la teoría de la doble carga eléctrica, la cual parte de la base de que las cargas superficiales de la partícula coloidal atraen iones de carga opuesta, estableciéndose un estado de carga neutra entre la partícula y su alrededor inmediato. En esta zona de carga neutra, existe una capa difusa de cargas eléctricas que se extienden hasta el seno del agua. Esta capa se compone de varias zonas:

- a. Partícula superficial del coloide (con carga negativa)

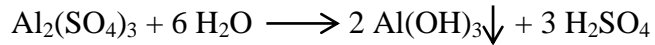
- b. Capa de Stern, compuesta por cargas de signos positivo, atraídas fuertemente por la superficie coloidal.
- c. Capa difusa, constituida por el resto de los iones móviles, hasta la superficie neutra del líquido.

Por tal motivo, para conseguir la coagulación se necesita aglutinar las pequeñas partículas coloidales, o sea coagularlas. Esta coagulación se consigue rompiendo la estabilidad del sistema coloidal de dos maneras:

- a. Compresión del espesor de la doble capa (incisos b y c anteriores) por efecto de la adición de contraiones simples. Esto se consigue adicionando cationes monovalentes o mediante la adición de electrolitos di o trivalentes (aunque a mayor carga iónica se hace más efectivo este proceso).
- b. Adsorción de contraiones en la superficie de la partícula. Esto es posible debido a los cambios de carga generados en la partícula coloidal en presencia de compuestos absorbidos, como especies hidrolizadas de sales di o trivalentes (normalmente hierro o aluminio), de alta densidad eléctrica y bajo peso molecular.

La concentración crítica del coagulante disminuye aproximadamente unas 30 veces por cada carga positiva añadida que tenga el metal, así el efecto de coagulación del Al^{+3} es unas 11 veces mayor que el del Ca^{+2} y 730 veces mayor que el de Na^{+} . Respecto a la reacción de coagulantes, por ejemplo $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, tras un período de mezcla-homogenización, aparecen sucesivas e instantáneas reacciones de hidrolisis de modo que coexisten diferentes especies iónicas, según el pH.

Al añadir el coagulante, parte de los cationes se dirigen a neutralizar las cargas negativas de los coloides, mientras que el resto reacciona con el agua para formar el hidróxido insoluble:



El hidróxido insoluble formado puede atrapar los coloides neutralizados y desestabilizarlos. El ácido formado reacciona con la alcalinidad del medio. A modo de resumen, la reacción de los coagulantes con el agua implica:

- a. Desestabilización de las partículas coloidales por compresión de la capa doble, debido al aumento de la concentración de las especies iónicas.
- b. Desestabilización coloidal debida a la adsorción en la superficie coloidal de las especies iónicas polinucleares positivas (hidroxicomplejos).
- c. Coagulación o aglomeración por arrastre de las partículas. Las partículas coloidales son arrastradas por el precipitado, $\text{Al}(\text{OH})_3\downarrow$.

En el tratamiento químico de coagulación se habrán de considerar todas las variables que puedan influir en el equilibrio sólido-líquido como son las variables inherentes a la composición química del agua (pH, alcalinidad, tipo y concentración de partículas coloidales), y variables físicas como temperatura, tiempo y condiciones de mezclado.

Si durante la coagulación, el coagulante anula las fuerzas repulsiva entre las partículas coloidales, iniciando la formación de microflóculos, ahora será necesario un agente que atraiga todos estos microflóculos formados, aumentando su tamaño y densidad de modo que sedimenten más fácil y rápidamente.

Estos agentes son llamados floculantes. El empleo de floculante o polielectrolitos, permite tratar mayores caudales de agua en estaciones depuradoras de aguas residuales, además mejora la floculación cuando ésta es difícil por cambios de calidad, bajas temperaturas, etc. En cuanto al mecanismo de floculación, los polímeros reaccionan con los coágulos a través de:

- a. Neutralización de cargas.
- b. Mecanismo de creación de puentes.

La neutralización de cargas tiene lugar de la misma manera que la neutralización llevada a cabo por las sales metálicas. El polímero tiene una carga opuesta a la de las partículas coloidales, de modo que la carga de los coloides es neutralizada por la carga del polímero. El mecanismo de creación de puentes requiere que la cadena del polímero sea adsorbida por una partícula y cuando otra partícula esté lo suficientemente cerca, como para que la cadena del polímero extendida pueda ser adsorbida por ella, se forme un puente físico entre las dos partículas. Este flóculo elemental crece formando puentes con otras partículas hasta alcanzar el flóculo un tamaño óptimo. La formación de flóculos se incrementa con fuerte agitación, aunque los grandes flóculos se rompen fácilmente. Esta situación indica que la agitación debe ir disminuyendo a medida que el tamaño del flóculo aumenta.

La combinación de sales metálicas con polímeros genera mejores rendimientos en el tratamiento de aguas que la aplicación de solo sales metálicas. La floculación está condicionada a los siguientes factores:

- a. Dosis óptima del polímero. Esta es la cantidad máxima de polímero que puede ser adsorbida sobre el sólido para producir un sistema floculado si ninguna ruptura de enlaces.
- b. Agitación. Una adecuada agitación es necesaria tanto en el momento de la dosificación del polímero como en el proceso de formación y engorde del flóculo. La dispersión del polímero en agua requiere de una gran agitación para favorecer la floculación homogénea, pero una vez iniciada esta, conviene reducir la velocidad para evitar la ruptura mecánica de los flóculos.
- c. Peso molecular del polímero. Es una propiedad que caracteriza a los polímeros y determina la eficacia de la floculación. A mayor peso molecular, mayor adsorción de moléculas, se optimiza la dosis del polímero y se incrementa la velocidad de decantación.
- d. pH. Esta variable del sistema afecta la cantidad y tipo de cargas presentes en la superficie de los sólidos y afecta también la cantidad de carga libre que configura el polímero en solución. Los polímeros aniónicos son muy eficaces en el intervalo de pH de 7 a 14 y los catiónicos suelen actuar eficazmente en el intervalo de pH de 3 a 7.
- e. Temperatura. No siempre una elevada temperatura favorece la floculación, ya que a veces esta provoca una elevada velocidad de difusión del floculante y de colisión de las partículas que desfavorece la adsorción.

El desempeño de la membrana de ósmosis inversa (MOI) fue evaluado mediante experimentos a nivel planta piloto.

El esquema completo de separación en la membrana fue validado mediante experimentos en una celda de circuito cerrado, en el cual la concentración del agente anti-incrustante y el pH fueron variados para determinar las condiciones de operación óptimas [39,40]. Estudios detallados para estos experimentos de flujo continuo fueron efectuados y los flujos de agua permeada en (MOI) fueron medidos experimentalmente. Los datos experimentales de flujo fueron correlacionados y analizados utilizando redes neuronales artificiales (RNA). Para este efecto, una red de cuatro capas alimentada hacia adelante con un algoritmo de propagación hacia atrás fue utilizada para entrenar los modelos de RNA. Después de que el proceso de entrenamiento fue terminado, los datos experimentales de flujo fueron utilizados para evaluar las capacidades de predicción de la red, con base en el flujo de agua permeada en MOI.

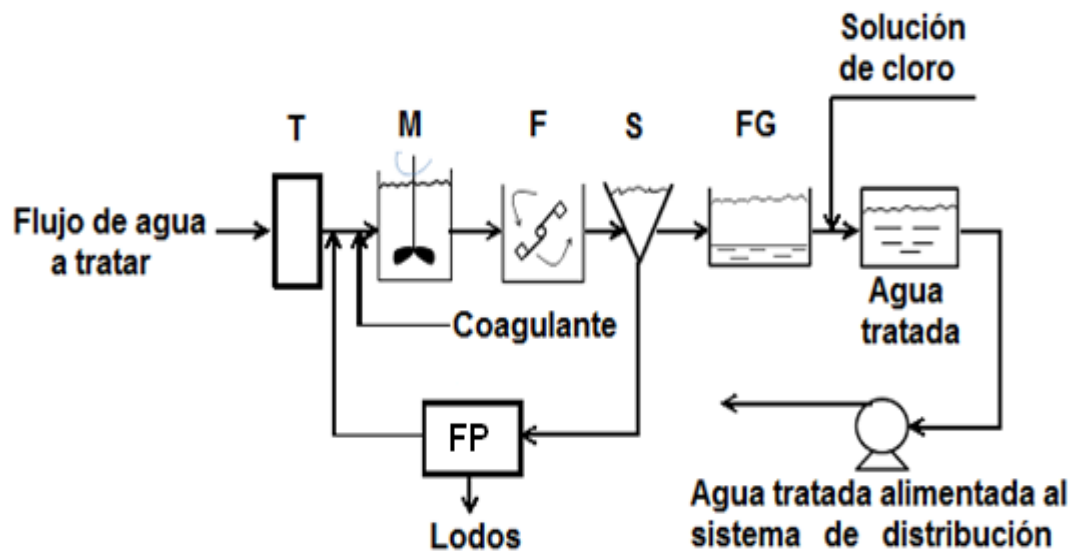
1.1 Tratamiento de aguas residuales provenientes de un proceso Industrial de fabricación de latas de aluminio (Caso de estudio).

En el presente estudio se mostrará el caso de una empresa mexicana dedicada al envasado de productos, localizada al sur de la República Mexicana. Esta empresa cuenta con varios procesos de fabricación, pero el proceso base para este estudio es el de fabricación de latas de aluminio.

En todo este proceso se genera una cantidad considerable de agua residual (335,439 m³/año) debido a las diferentes etapas de lavado de aluminio, misma que requiere de un tratamiento para los contaminantes reportados en la Tabla 13 (sección 3.1) para reciclarla y reusarla.

1.1.1 Situación actual (Antecedentes)

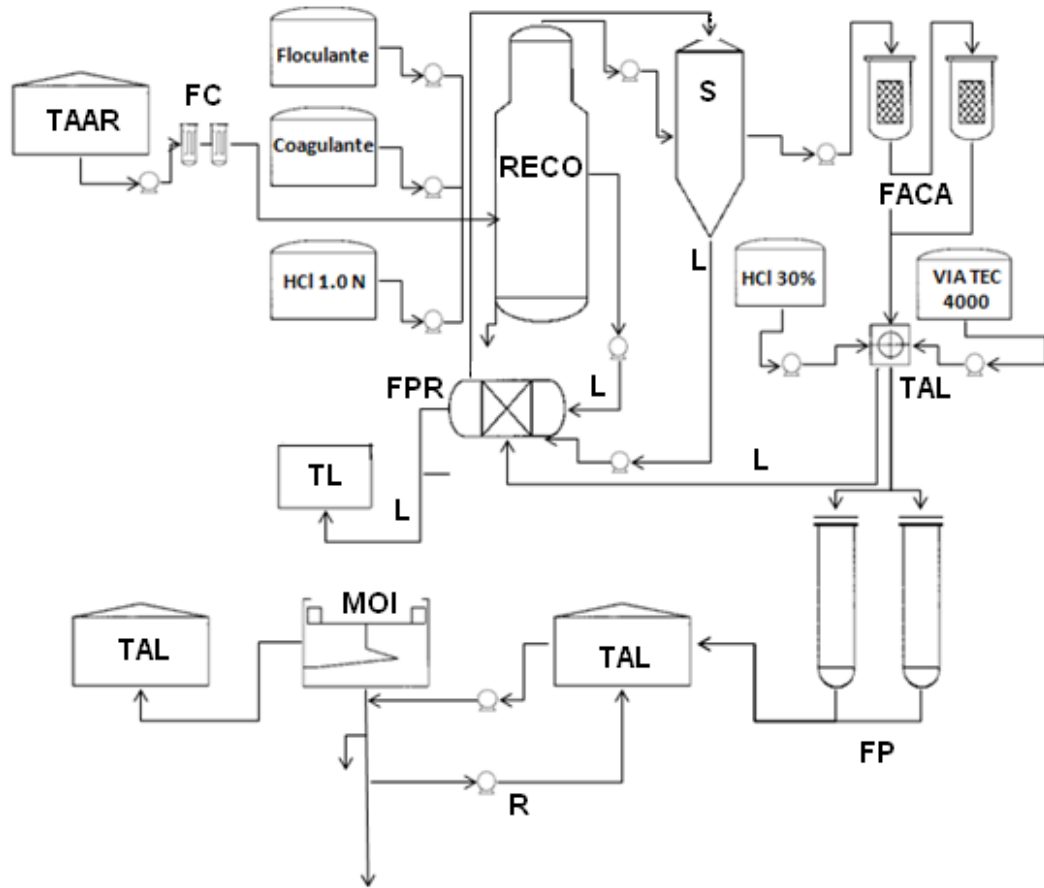
El proceso de fabricación de latas de esta empresa descarga aproximadamente 201,000 m³/año de agua residual proveniente de sus procesos; de tal modo que su impacto ambiental es muy significativo debido a que actualmente solo es capaz de reutilizar un 40 % (como máximo) de su agua industrial residual, debido a las limitaciones existentes en el tratamiento de la misma, basados en el proceso de Reynolds y Richards [41] y que es mostrado en la Figura 1.



T = Tamizado	M = Mezclador	F = Floculador
S = Sedimentador	FG = Filtro Granular	FP = Filtro Prensa

Figura 1. Diagrama de Flujo de una Planta de Filtración rápida de arena del tipo de Reynolds y Richards.

Debido a lo anteriormente mencionado tiene que ser considerada una mejora al proceso de tratamiento, la cual incluya un cambio en la manera de separar y contener de forma adecuada los contaminantes contenidos.



TAAR = Tanque almacén de aguas residuales	RECO = Reactor coagulador	S = Sedimentador
FACA = Filtros de arena y carbón activado	TL = Tanque de lodos	TAL = Tanque almacén
MOI = Membrana de ósmosis inversa	FPR = Filtro prensa	R = Recirculación
FC = Filtros coalescentes	FP = Filtros pulidores	L = Lodos

Figura 2. Planta de tratamiento de aguas residuales provenientes de una industria de envasado.

En la Figura 2 se muestra el diagrama de flujo propuesto para la planta piloto de tratamiento de aguas residuales industriales provenientes de la planta de manufactura de latas de aluminio, antes mencionada. Este consiste en unidades coalescentes para la separación de grasas y aceites contenidas en el agua del proceso de lavado de lámina de aluminio usada para la fabricación de latas, coagulación mediante el uso de sulfato de aluminio y floculación utilizando el reactivo NALCO 9907.

También consta de la unidad de sedimentación para la separación de los lodos precipitados, unidad de filtración multimedia mediante el uso de un filtro de arena y grava y un segundo filtro de carbón activado y antracita para la eliminación de la mayoría de los finos y flóculos no sedimentables, la adsorción en carbón remueve la mayoría de los compuestos orgánicos remanentes. Como una preparación del agua residual antes de su llegada al proceso MOI, el pH fue ajustado mediante la adición de ácido clorhídrico al 1.0 N, seguido por adición inhibidor de incrustación VIATEC 4000, ambos utilizados para la precipitación de sílice remanente en el agua residual. Del mismo modo, se utilizan filtros pulidores para la remoción de sílice precipitado generado en la etapa anterior y finalmente se utiliza una MOI para el filtrado final de la corriente de agua residual, proporcionándole las características que permiten su reúso en el proceso de fabricación de latas y su lavado. Adicionalmente a lo anterior, se utiliza un filtro prensa para el concentrado de todos los lodos generados en las diferentes partes del proceso, así como la recuperación del agua contenida en ellos.

1.1.2 Análisis crítico de literatura

La necesidad de una mejor calidad en aguas residuales provenientes de diferentes procesos industriales ha generado diversas investigaciones en las cuales son comparados diferentes tipos de tratamientos, así como diferentes técnicas de modelado para predecir la calidad del efluente. Pai, (2008) utilizó modelos grises y RNA para la predicción de SS, DQO y pH en el efluente de una PTAR, como una función de los índices del afluente. Fueron usados modelos grises y RNA para la predicción de SS, DQO y pH en el efluente de una PTAR.

Durante la investigación no fue analizado el desempeño de ningún equipo y no fueron utilizadas técnicas de ahorro de agua en descargas pero se logró cumplir con los estándares de descargas de aguas en Taiwán [15]. En el trabajo realizado por Prakash y cols., (2008) utilizaron RNA para la predicción de la adsorción de iones Cu (II) a partir de soluciones acuosas, utilizando aserrín como adsorbente en procesos por lotes. La predicción del grado de adsorción fue muy efectiva y las soluciones con concentraciones de 50 y 60 mg/L en iones Cu (II) se acercaron a la máxima remoción. No fue analizado el desempeño del equipo y no fueron utilizadas técnicas de ahorro de agua en descargas [52].

Daneshvar y cols., (2006) utilizaron RNA para la predicción de la eficiencia en la decoloración de soluciones de tinte textil, por medio de un proceso electroquímico en un reactor por lotes a escala de laboratorio. En esta investigación la técnica de modelación utilizada permitió estimar el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones, analizando primeramente el desempeño del equipo, sin utilizar técnicas de ahorro de agua en descargas. Las mejores condiciones de operación fueron: densidad de corriente 80 Am^{-2} , tiempo de electrólisis de 7 min., rango de pH inicial en 5-8 y concentración inicial de tinte $< 80 \text{ mg/L}$. Pai y cols., (2007) utilizaron modelos grises y de RNA para la predicción de SS y DQO en el efluente de una PTAR. En esta investigación no fue medido el desempeño de equipos y no se utilizaron técnicas de ahorro de agua en descargas, pero las técnicas de modelación utilizadas permitieron el uso de los índices de calidad del afluente para la predicción de la calidad del efluente, cumpliendo con los estándares de efluentes de Taiwán [17].

Mjalli y cols., (2007) utilizaron RNA para la predicción del desempeño de una PTAR, en términos de DQO, DBO y SST. Fueron utilizadas técnicas de modelación basadas en predicciones de RNA en tres entradas del agua residual suministrada (DBO, DQO y SST), las cuales dieron los mejores resultados. Los índices del afluente fueron aplicados en la predicción de la calidad del efluente, pero no fue analizado el desempeño del equipo y no fueron utilizadas técnicas de ahorro de agua en descargas [2007]. Elmolla y cols., (2010) utilizaron RNA para la predicción de la degradación de antibióticos en soluciones acuosas por medio del proceso Fenton en una prueba de laboratorio por lotes. Para esta investigación no fue analizado el desempeño del equipo y no fueron utilizadas técnicas de ahorro de agua en descargas, pero fueron usadas técnicas de modelación mediante RNA, donde se obtuvieron resultados muy cercanos a los experimentales con $R^2=0.997$ y se comprobó que la relación molar H_2O_2/Fe^{+2} es el parámetro de mayor influencia con una importancia relativa del 25.8% [53].

Rao y cols.,(2003) utilizaron ASR para la optimización de un proceso de coagulación-floculación, en el equipo de prueba de Jarras. Fueron utilizados el equipo de Jarras y el ASR para encontrar las condiciones óptimas. Mediante el ASR se obtuvieron los parámetros óptimos para la recuperación del 78% del agua, con una turbidez de 20 NTU. Los valores óptimos de las variables seleccionadas son: dosis de coagulante=15,000 mg/L, dosis de floculante=300 mg/L y pH=6 [32]. Preetha y Viruthagiri, (2007) utilizaron el ASR para optimizar las condiciones de operación en el proceso de biosorción de cobre usando *Rhizopus arrhizus* en una prueba por lotes a nivel laboratorio.

Para este trabajo Fueron utilizadas pruebas por lotes y el ASR para estudiar el efecto acumulativo de parámetros iniciales para optimizar las condiciones de proceso para la remoción máxima de iones cobre. Esta metodología puede ser empleada exitosamente para estudiar la importancia de los efectos individuales, interactivos y acumulativos de las variables de prueba. Los valores óptimos de las variables de prueba, que corresponden con el porcentaje máximo de remoción de cobre (98.34%) son: pH=4.14, Temperatura=37.75 °C, carga de biomasa=8.17 g/L y concentración de cobre inicial=53.84 mg/L. No fueron utilizadas técnicas de ahorro de agua en descargas [54].

Yus Azila y cols., (2008) utilizaron el ASR para la biosorción de Pb (II) sobre celdas inmovilizadas de *Pycnoporous sanguineus* en una prueba por lotes a nivel laboratorio. Para esta investigación fueron utilizadas pruebas por lotes y ASR para obtener las condiciones óptimas para la remoción porcentual de iones Pb (II), seleccionando tres parámetros independientes encontrando efectivamente el punto óptimo de operación, el cual es mostrado en gráficos de ASR en tres dimensiones [55]. No fueron utilizadas técnicas de ahorro de agua en descargas.

Ravikumar, (2004) utilizó el ASR para lograr la optimización de los parámetros de proceso para la remoción de tinta de un agua residual, usando un adsorbente híbrido a nivel laboratorio. Para este trabajo fueron utilizadas pruebas por lotes y ASR para obtener las condiciones óptimas, para la remoción de tinta seleccionando tres variables independientes. Un modelo polinomial de segundo orden fue altamente significativo y adecuado para representar la relación entre la respuesta y las variables con una $R^2=0.98$.

Las condiciones óptimas para el 100% de remoción de tinta son: pH 1.5 y Temperatura 27°C para la remoción de la tinta AB 25 y pH 12 y Temperatura 27°C para la remoción de la tinta BB 69. No fueron utilizadas técnicas de ahorro de agua en descarga [56].

Xu y cols., (2005) utilizaron la modelación ES en una planta de electrometalizado para encontrar las condiciones óptimas de operación. Para esta investigación la metodología de modelación utilizada juega un rol clave en el desarrollo de un sistema integrado de Electrometalizado (SIE) que consiste en un subsistema de electrometalizado (SEM) o de recubrimiento con metales y un sistema de recuperación de solución (SRS). Fueron utilizadas técnicas de ahorro de agua en descargas con evaluaciones cercanas a cero descargas. El mejor desempeño cerca de cero descargas fue en el diseño del sistema SRS como parte de un SIE con tres unidades de enjuague. El punto de operación con cero descargas no fue alcanzado [14]. Babuna y cols., (2006) evaluaron las condiciones de cero descargas en una industria de acabado de metales. Para esta investigación fueron utilizadas técnicas de ahorro de agua en descargas con evaluaciones técnicas de cero descargas. Los resultados del presente estudio claramente indican que el concepto de cero descargas necesita ser reformulado, debido a que el reúso del agua residual es del orden del 85% para esta industria. No fueron utilizadas técnicas de modelación [16]. Agrawal y cols., (2009), Investigaron sobre la recuperación/remoción de fierro y cobre de residuos industriales usando diferentes solventes. Para la presente investigación fueron utilizados métodos de extracción de metales mediante el uso de solventes en la industria del acero, donde todas las mejoras fueron centradas en la búsqueda de las mejores condiciones de operación mediante pruebas con diferentes solventes.

El objetivo fue la recuperación de residuos de hierro en el proceso de decapado y la recuperación de residuos de cobre de los procesos de electrometalizado y electrorefinado mediante el uso de solventes. No fueron utilizadas técnicas de modelación, tampoco fueron utilizadas técnicas de ahorro de agua en descargas y el desempeño de los equipos no fue evaluado [57].

Gartiser y cols., (2010) efectuaron una evaluación completa de efluentes en industrias de electrometalizado con pretratamiento biológico. Los autores consideraron que el impacto ambiental por el uso de tratamientos químicos en aguas residuales debe ser mejor atendido mediante estudios a gran escala de aguas residuales procedentes de diferentes tipos de industrias, previamente tratadas; esto con la finalidad de verificar la calidad del tratamiento efectuado. En el presente estudio cerca de la mitad de las muestras de agua residual probaron estar biológicamente bien tratadas, como quiera que sea, la DQO de algunas muestras fue insuficientemente removida. Fueron utilizadas técnicas de ahorro de agua en descargas pero no fueron utilizadas técnicas de modelación y La carga orgánica en aguas residuales de procesos de electro-metalizado no fue considerada [58].

1.1.3 Justificación

El análisis crítico de la literatura durante el estudio del presente proyecto resalta la importancia de enfocar la justificación de esta investigación en la optimización del proceso bajo estudio, para encontrar las mejores condiciones de operación que lleven a la máxima recuperación y reutilización del agua de proceso involucrada, lo cual redunde en la maximización de los recursos económicos involucrados.

Dado lo anterior, la justificación para el presente proyecto de investigación se fundamenta en uso de modelación soportada en RNA; el uso de procedimientos operativos enfocados al ahorro de agua como lo son las operaciones cercanas a cero descargas; el uso de diferentes tecnologías de tratamiento incluyendo un tratamiento para aceites y grasas contenidas, coagulación, sedimentación, filtración y el uso de un proceso a base de membrana de ósmosis inversa (MOI).

Por lo tanto, de acuerdo a literatura reciente, ningún estudio ha analizado el uso de RNA para modelar una unidad de MOI como parte de una planta piloto usada para tratar aguas residuales industriales provenientes de una planta de manufactura de latas.

En este proyecto de investigación se propone incluir algunas características innovadoras enfocadas totalmente a incrementar la tasa de reúso del agua industrial residual generada en el proceso de fabricación de latas de aluminio y definitivamente a mejorar las características de calidad del agua tratada a la salida de la planta piloto de TAR. Dichas características que hacen del proyecto algo especial, incluyen las principales metodologías de los proyectos mencionados en la sección 1.1.2 sobre el análisis crítico de literatura, pero además incluyen otras que lo hacen único y novedoso.

Dentro de las características innovadoras en el proyecto propuesto en la presente investigación se encuentran las siguientes:

- a. El uso de pruebas de jarras a nivel laboratorio mediante condiciones de operación basadas en un diseño factorial. Lo novedoso se encuentra en el uso de diferentes coagulantes y floculantes para encontrar la pareja que mejor desempeño operativo ofrezca en cuanto a la calidad obtenida en el agua tratada.

- b. El uso de pruebas de sedimentación en columna para determinar el tiempo de detención y verificar la remoción total de sólidos suspendidos a la salida del tanque sedimentador. La ventaja del uso de esta técnica se encuentra en calcular la eficiencia del equipo involucrado antes de construirlo, con lo cual se asegura el mejor desempeño ya en operación.
- c. Fueron efectuadas técnicas de modelación (basadas en el uso de ASR y RNA) y sus resultados fueron comparados con los obtenidos mediante el diseño factorial. El diseño factorial y el ASR fueron aplicados al reactor coagulador, mientras que el diseño factorial, ASR y RNA fueron aplicadas al proceso de OI. Ninguna de las literaturas estudiadas incluye el uso de 2 técnicas de modelación (además el diseño factorial), cuya ventaja no solo estriba en encontrar puntos óptimos de operación, sino en encontrar el mejor modelo para el proceso involucrado basado en análisis de desempeño.
- d. Fueron aplicadas técnicas de ahorro de agua en descargas mediante la recirculación de agua del filtro prensa al tanque sedimentador y mediante la optimización operativa del circuito cerrado del proceso de OI, basada en el control del diferencial de presión de MOI.

Lo novedoso del uso de esta técnica es maximizar la economía del proceso en cuanto a recuperación de agua se refiere.
- e. La mayoría de los equipos de esta planta piloto de tratamiento de aguas residuales (TAR) fueron diseñados de acuerdo a la “Ruta de Diseño” para tener la mejor capacidad para el flujo de agua residual que está siendo tratado.

La novedad y ventaja de diseñar los equipos involucrados en este proyecto, es verificar que los equipos sean diseñados con una capacidad óptima al flujo de agua que van a tratar. Los cartuchos de filtros coalescentes y pulidores fueron adquiridos con un proveedor.

- f. El prelavado de la membrana de ósmosis inversa (MOI) con HCl 1.0 N fue considerado. En la presente investigación, el prelavado de la MOI resultó en una mejora importante en la recuperación del agua residual, pero a su vez sienta el precedente que el pre-acondicionamiento de las MOI pudiera ser requerido en algunos procesos, dependiendo de la calidad del agua a tratar y del tipo de membrana a utilizar.
- g. Fue mejorada la calidad del efluente de esta planta piloto de tratamiento de aguas residuales (TAR): Una reducción del 94.67% en los sólidos totales disueltos (SDT), 80% de reducción en SiO_2 y un incremento de casi 72% en la reutilización del agua residual usando las condiciones óptimas de operación de $\text{pH}=4$ y concentración de anti-incrustante VIATEC 4000 de 3 mg/L. La ventaja en este punto es notable debido a que el tipo de procesos incluidos en la planta piloto de esta investigación mejoró la recuperación y reúso del agua tratada en 31.25 puntos porcentuales.

1.1.4 Hipótesis

“La tasa de reúso de aguas residuales de una industria de envasado será incrementada optimizando la unidad de ósmosis inversa de su planta de tratamiento de aguas residuales, mediante su modelación, aplicando redes neuronales”.

1.1.5 Objetivo general

Aplicar la metodología de RNA a la unidad de OI una planta de tratamiento de aguas residuales de una industria de envasado para encontrar sus condiciones óptimas de operación, las cuales permitirán incrementar la tasa de reúso del agua residual generada.

1.1.6 Objetivos particulares

- a. Diseñar los diferentes equipos y procesos de una planta piloto de tratamiento de aguas residuales, aplicando la metodología de la ruta de diseño.
- b. Determinar las mejores condiciones de operación para los procesos de pretratamiento a nivel laboratorio. Para esto se trabajará en la modelación del reactor coagulador utilizando ASR, para encontrar las mejores condiciones de operación en pruebas de jarras (sus resultados serán comparados con los encontrados por el diseño factorial). En el caso del tanque sedimentador, se llevarán a cabo pruebas de sedimentación en columna a nivel laboratorio para determinar el tiempo de detención mediante la creación de curvas de isoporcentaje.
- c. Modelar el sistema de OI utilizando RNA y ASR. Una vez modelado este proceso, comparar sus resultados con los obtenidos por medio del diseño factorial para encontrar las mejores condiciones de operación.
- d. Optimizar la tasa de reúso del agua residual generada.

2.0 MATERIALES Y MÉTODOS

Ya una vez que se tuvo la planta piloto en operación, dentro de su diseño original fue contemplado el instalar puertos de muestreo para el agua en tratamiento. Estos puertos de muestreo fueron instalados a la entrada de la planta piloto (agua proveniente del proceso de manufactura de latas de aluminio) y a la entrada y salida de cada equipo de la planta piloto. Para el caso del proceso de MOI, también fue instalado un puerto de muestreo en la recirculación. Todos los muestreos se apegaron a la norma Mexicana NMX-AA-003-1980 y dentro de los principales lineamientos que se cumplieron fueron los siguientes:

- a. Para todos los casos fueron utilizados recipientes para transporte de las muestras, los cuales contaban con una completa identificación del lugar físico del puerto de muestreo, hora y fecha y temperatura de la muestra. Estos fueron de polietileno con tapas de sellado hermético.
- b. Todos los puertos de muestreo contaban con válvulas de cierre que permitieron el paso libre de las muestras de agua y de los materiales que pudieran contener. Estas válvulas proporcionaron un cierre hermético de cada toma y fueron del mismo material del puerto de muestreo donde se instalaron.
- c. La información de cada muestra fue tomada en una hoja de registro, para llevar un control de todas las muestras colectadas y asegurar que no nos faltara alguna muestra.
- d. Las muestras fueron representativas de las condiciones de cada punto de muestreo.

Esto fue asegurado instalando para todos los casos los puertos de muestreo en la dirección del flujo de agua y tirando un flujo de agua en cada puerto equivalente a 10 veces el volumen de los recipientes plásticos. Después se enjuagó el recipiente con el mismo flujo de agua a muestrear y finalmente fue llenado cada recipiente con su muestra.

- e. Los recipientes utilizados fueron de 6 litros en todos los casos, lo que permitió efectuar todos los análisis necesarios en cada muestra.
- f. Para todos los casos, una vez que cada muestra era tomada, estas fueron localizadas inmediatamente en un cuarto con control de temperatura (4 °C) y después transportadas al laboratorio en un autotransporte provisto con control de temperatura (4 °C).

Dentro de la planta piloto se definen dos etapas principales de tratamiento: pre-tratamiento y proceso de MOI. Dentro del pre-tratamiento se consideran los procesos de eliminación de grasas, coagulación y floculación, sedimentación, así como el filtrado mediante arena y carbón activado.

Dentro de la etapa de pre-tratamiento, el proyecto fue enfocado en los procesos de coagulación y floculación, así como sedimentación. Esto fue para obtener un agua tratada con la mejor calidad posible para el proceso de MOI, lo cual fue comprobado con los resultados obtenidos en la prueba de jarras y columna de sedimentación (Tablas 14 a 21 y Figura 19).

Los métodos de análisis aplicados a la etapa de pre-tratamiento fueron del tipo de diseño factorial (soportado en pruebas de jarras [42,43] con análisis de Pareto para determinar el efecto de las diferentes variables seleccionadas) y ASR para encontrar las condiciones óptimas de operación en el reactor coagulador y en el tanque sedimentador.

En el caso del proceso MOI, se utilizó el diseño factorial para determinar el comportamiento del proceso en diferentes puntos de operación (flujo máximo de agua permeada a diferentes niveles de pH y concentración de agente anti-incrustante), mismos que fueron analizados mediante ASR y la herramienta de RNA contenida en MATLAB R2009b [44-50].

2.1 Material, equipo y ubicación del equipo

En este apartado se enlistan todos los equipos y materiales que fueron utilizados en cada una de las corridas experimentales a nivel laboratorio y planta piloto.

2.1.1 En laboratorio

A nivel laboratorio fueron utilizados materiales y equipos para pruebas de coagulación y floculación (prueba de jarras), así como para sedimentación (prueba de sedimentación en columna). El objetivo de estas pruebas fue encontrar la mejor combinación de coagulante y floculante, así como determinar las mejores condiciones de operación del reactor coagulador.

2.1.1.1 Coagulación y floculación

Para las pruebas de coagulación a nivel laboratorio fueron utilizados los siguientes materiales y equipos:

- a. Equipo de pruebas de Jarras, el cual consta de 6 vasos de precipitados y control de velocidad de agitación. Marca Armfielf, modelo 01662600.
- b. Equipo para medición del pH, marca Omega, modelo CDH-1X.
- c. Coagulantes CaO, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y FeCl_3
- d. Floculantes NALCO 9907 y NALCO 3249
- e. Solución para ajustar el pH (HCl 1.0 N).
- f. Juego de jeringas para la adición de coagulante, floculante y ajuste del pH.
- g. Termómetro
- h. Turbidímetro, marca NALCO, modelo 400-PT 100.88.
- i. Colorímetro, marca NALCO-ONDEO, modelo DR/890.

2.1.1.2 Sedimentación en columna

Para las pruebas de sedimentación a nivel laboratorio fueron utilizados los siguientes materiales y equipos:

- a. Columna de sedimentación
- b. Compresor de aire, marca Ingersoll Rand modelo PS7.5-3SD.
- c. Espectrofotómetro, marca Jasco, modelo V-660 UV-VIS.
- d. Equipo para medición de pH, marca Omega, modelo CDH-1X.
- e. Cronómetro
- f. Embudos de filtración

- g. Filtros de 5 μm
- h. Vasos de precipitados
- i. Agitador magnético, marca IKA modelo RET BASIC.
- j. Matraces Erlenmeyer
- k. Agua residual a tratar
- l. Floculante NALCO 9907
- m. Coagulante $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$
- n. Agua destilada
- o. Solución para ajustar el pH, HCl 1.0 N.
- p. Solución para neutralizar soluciones al final de cada corrida, NaOH 1.0 N.

2.1.2 En planta piloto

Los equipos de esta planta fueron construidos por la empresa Aquamex SA de CV en sus talleres localizados en Santa Catarina, Nuevo León, México y transportados después a la ciudad de Toluca. La planta piloto fue construida y cada uno de sus equipos fue probado en vacío y comisionado de acuerdo a parámetros del fabricante y de las principales normas de ingeniería aplicables al diseño, construcción e inspección de recipientes a presión (NOM-020-STPS-2002 y código ASME secciones VIII y IX) . Los principales equipos que constituyen esta planta piloto, mostrada en la Figura 2, son los siguientes:

- a. Tanque almacén de alimentación de agua industrial residual
- b. Filtros coalescentes
- c. Tanques para la alimentación de coagulante, floculante y ajustador de pH.
- d. Reactor coagulador

- e. Tanque sedimentador
- f. Filtro de arena
- g. Filtro de carbón activado
- h. Filtro prensa
- i. Tanque almacén para la adición de HCl al 30% y anti-incrustante VIATEC 4000.
- j. Filtros pulidores
- k. Bomba de alta presión
- l. Membrana de ósmosis inversa
- m. Tanque de recirculación
- n. Tanque almacén de agua permeada

Cada uno de los equipos anteriores fue calculado en su ingeniería básica aplicando la metodología de Ruta de Diseño (ver sección 2.4.2).

2.1.2.1 Filtración mediante membrana

Para las pruebas de filtración por ósmosis inversa a nivel planta piloto, fueron utilizados los siguientes materiales y equipos:

- a. Todos los equipos antes mencionados en la sección anterior
- b. Membrana de poliamida (ósmosis inversa)
- c. Ajustador de pH, HCl.
- d. Anti-incrustante VIATEC 4000
- e. Equipo para medición puntual de sólidos disueltos totales, SDT

- f. Contenedores plásticos de 6 litros para toma de muestras en diferentes puntos del proceso de filtrado de OI.
- g. Medidores de flujo de agua a la entrada de MOI, de recirculado y permeado en la misma membrana.
- h. Microscopio electrónico de barrido Marca FEI, modelo Nova 200-Nano SEM.

2.2 Procedimiento experimental

Aquí se incluyen todas las actividades llevadas a cabo en cada uno de los equipos a nivel laboratorio (equipo para prueba de jarras y columna de sedimentación) así como a nivel planta piloto (procesos de pre-tratamiento y proceso de filtración mediante una membrana de ósmosis inversa (MOI)).

2.2.1 Pretratamiento

El efluente general proveniente de los diferentes procesos de la planta de manufactura de latas de aluminio fue alimentado a la planta piloto de TAR. Dentro de la etapa de pretratamiento han sido consideradas todas las unidades de proceso corriente arriba de nuestra unidad de proceso de OI. Estos equipos son: Filtros coalescentes, reactor coagulador, tanque sedimentador, filtros de arena y carbón activado, filtros pulidores y membrana de ósmosis inversa. Las características de cada uno de estos equipos se describen a continuación.

El objetivo primordial de los diferentes procesos contenidos dentro de la etapa de pretratamiento fue reducir los valores de algunos parámetros de calidad en el agua a tratar, para permitir que MOI trabajara dentro de sus condiciones normales de operación (caída de presión máxima permitida de 0.68 kg/cm^2 , % de rechazo de soluto de 99.5 a 99.7 y una turbidez máxima permitida de 1.0 UNT).

2.2.1.1 Eliminación de grasas

Dentro del proceso de manufactura de latas de aluminio se tiene una considerable generación de grasas debido a la aplicación de aditivos para el lavado de las mismas. Este tipo de elementos filtrantes son de alta eficiencia basada en una estructura porosa de polipropileno de alta estabilidad mecánica y térmica. La finalidad de estos filtros es la retención de aceites y grasas por medio de un cartucho de poliuretano compactado. Las características de estos filtros coalescentes se incluyen en la sección técnica (2.4.2).

2.2.1.2 Coagulación y floculación

El objetivo del reactor coagulador fue desestabilizar las partículas coloidales en suspensión y favorecer su aglutinamiento para formar un flóculo. Las características del reactor coagulador se incluyen en la sección técnica (2.4.2). Para encontrar las condiciones óptimas de operación del reactor coagulador, fueron efectuadas pruebas a nivel laboratorio en el equipo de pruebas de jarras a $22.6 \text{ }^\circ\text{C}$. La Tabla 1 muestra las combinaciones coagulante-floculante efectuadas en el presente estudio.

TABLA 1

COMBINACIONES COAGULANTE-FLOCULANTE USADAS EN PRUEBAS DE JARRAS.

Combinación	Coagulante	Floculante
1	CaO	NALCO 9907 (*)
2	Al ₂ (SO ₄) ₃	NALCO 9907
3	FeCl ₃	NALCO 9907
4	CaO	NALCO 3249
5	Al ₂ (SO ₄) ₃	NALCO 3249
6	FeCl ₃	NALCO 3249

(*) NALCO es una compañía química mundial enfocada al tratamiento de agua.

2.2.1.2.1 Prueba de jarras

Fue efectuado un diseño factorial 2^k utilizando cuatro variables principales que son parte de la prueba de jarras para conocer su interrelación en la obtención de una mejor calidad del agua a tratar. Este diseño factorial es explicado de la siguiente manera:

Las 4 variables seleccionadas fueron (pH inicial, cantidad de coagulante, cantidad de floculante y velocidad de agitación al añadir el floculante) y fueron definidos 2 niveles de operación para cada variable definidos como alto (+) y bajo (-).

La Tabla 2, muestra los valores seleccionados para cada variable (diferentes coagulantes, floculantes, pH y velocidad de agitación durante la adición de floculante) son los siguientes:

TABLA 2**VALORES ASIGNADOS A CADA VARIABLE EN EL DISEÑO FACTORIAL**

Variable	Valor bajo (-)	Valor alto (+)
Volumen solución de CaO de 10 mg/L, mL	1.0	3.5
Volumen de solución de Al ₂ (SO ₄) ₃ de 0.10 mg/L, mL	1.0	6.5
Volumen de solución de FeCl ₃ de 0.10 mg/L, mL	4.5	8.5
Volumen de solución de NALCO 9907 de 1.0 mg/L, mL	1.0	4.0
Volumen de solución de NALCO 3249 de 1.0 mg/L, mL	1.0	2.0
pH	5	10
Velocidad de agitación durante la adición de floculante (rpm)	100	150

Con la información anterior se obtienen 16 corridas experimentales para cada pareja de coagulante-floculante indicadas de la siguiente manera en la Tabla 3:

TABLA 3**DISEÑO FACTORIAL USADO EN EQUIPO PARA PRUEBA DE JARRAS**

Corrida	Variables consideradas			
	pH	Concentración de coagulante	Concentración de floculante	Velocidad de agitación durante la adición de floculante
1	+	+	-	-
2	+	-	-	-
3	+	-	+	-
4	+	+	+	-
5	+	-	-	+
6	+	+	-	+
7	+	+	+	+
8	+	-	+	+
9	-	+	-	-
10	-	-	-	-
11	-	+	+	-
12	-	-	+	-
13	-	+	-	+
14	-	-	-	+
15	-	-	+	+
16	-	+	+	+

Para cada prueba de jarras fue llevado a cabo el siguiente procedimiento experimental:

Primeramente fueron preparadas cada una de las soluciones utilizadas durante cada corrida (solución de NaOH 1.0 N, solución de HCl 1.0 N, solución de CaO de 10 mg/L, solución de $Al_2(SO_4)_3$ de 0.10 mg/L, solución de $FeCl_3$ de 0.10 mg/L, solución de NALCO 9907 de 1.0 mg/L y una solución de NALCO 3249 de 1.0 mg/L).

El equipo para pruebas de jarras fue utilizado para tratar cuatro muestras de agua a la vez. Para esto fueron usados 4 matraces de 1.0 litro de capacidad los cuales se colocan dentro del equipo de jarras con su agitador.

Primeramente fue ajustado el pH del agua de cada una de las 4 muestras utilizando NaOH 1.0 N o HCl 1.0 N según se requiera. Para esto fue utilizada una jeringa de 10 mL y el equipo para medición del pH, marca Omega, modelo CDH-1X. El coagulante fue añadido de acuerdo a lo indicado en cada una de las 4 corridas seleccionadas, utilizando una jeringa de 5 o 10 mL según el volumen utilizado.

Una vez que el coagulante fue integrado, se ajustó la velocidad de agitación del equipo para pruebas de jarras por 10 minutos en 250 rpm, para llevar a cabo la integración del coagulante. El floculante fue añadido de acuerdo a lo indicado en cada una de las 4 corridas seleccionadas, utilizando una jeringa de 5 mL. Se ajustó la velocidad de agitación en el equipo para pruebas de jarras por 45 segundos durante la adición del floculante según se indicó en cada una de las 4 corridas seleccionadas.

Una vez que el floculante fue integrado se ajustó la velocidad de agitación en las 4 corridas en 30 rpm por 5 minutos para promover la formación de flóculo. Cuando el tiempo indicado para la formación de flóculo transcurrió, se detuvo el equipo para pruebas de jarras y se tomaron muestras de 50 mL. A cada muestra se le tomaron valores de turbidez y transmitancia mediante el Turbidímetro, marca NALCO, modelo 400-PT 100.88.

A cada muestra se le tomaron valores de pH final mediante el equipo para medición del pH, marca Omega, modelo CDH-1X. Del mismo modo fueron tomados valores de temperatura final de cada muestra mediante un termómetro de escala expandida.

Toda la información obtenida para estas primeras cuatro corridas fue registrada y se continuó en grupos de cuatro corridas sucesivamente hasta terminar las 16. Cada corrida fue repetida 3 veces y los resultados fueron reportados en las Figuras 14 a 19 (solo en el caso de la turbidez no se tuvo variación entre los valores de cada repetición y el valor promedio). Es muy importante mencionar que si bien los floculantes seleccionados tienen actividad catiónica y aniónica y los coagulantes seleccionados presentan actividad en función del intervalo de pH en que se encuentran (especies activas que se puedan presentar en función del pH), el diseño factorial llevado a cabo encontró las mejores condiciones de operación en el reactor coagulador.

2.2.1.2.2 Determinación de condiciones de operación en el reactor coagulador

Una vez concluidas las pruebas de jarras en cada una de las parejas de coagulante-floculante, tomando en cuenta las condiciones de operación sugeridas en el diseño factorial, se tomaron muestras de agua tratada en cada una de las 16 corridas experimentales y aquella con mejores parámetros de calidad como turbidez (UNT) y transmitancia (%), fue seleccionada como la mejor corrida experimental y sus condiciones de operación se tomaron como base para operar el reactor coagulador de la planta piloto. También fueron tomados datos de pH final y temperatura en cada corrida. La Tabla 20 muestra las mejores condiciones de operación (sugeridas para operar el reactor coagulador).

2.2.1.3 Sedimentación

El objetivo del tanque sedimentador fue la eliminación de los flóculos en suspensión. Las características del tanque sedimentador se incluyen en la sección técnica (2.4.2).

Para encontrar las condiciones óptimas de operación del tanque sedimentador, fueron efectuadas pruebas en una torre de sedimentación construida especialmente para este proyecto. El arreglo de esta torre es mostrado en la Figura 3, y consiste de una columna de acrílico de 3.30 metros de altura y un diámetro de 15.24 centímetros, con 6 puntos para muestreo y con una distancia de 50 centímetros entre cada uno de ellos. El volumen de la torre es de 60.19 L, hasta la marca de 3.3 metros de altura.

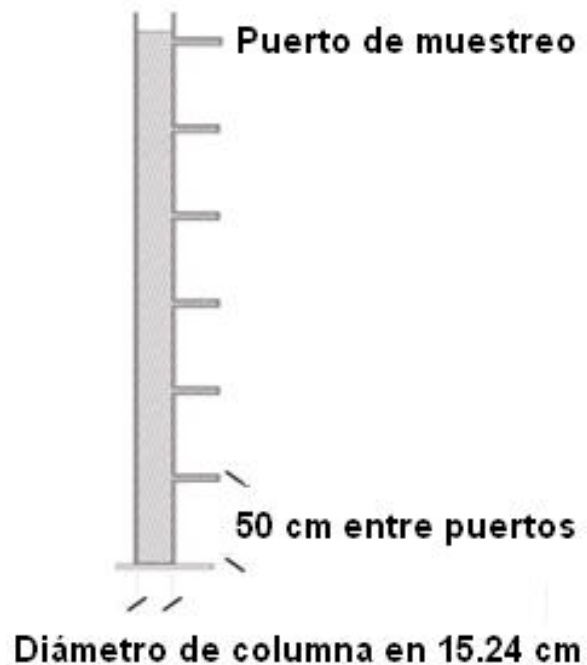


Figura 3. Columna de sedimentación

El objetivo de estas pruebas fue generar una matriz de sólidos recuperados a diferentes tiempos y alturas de la columna, mediante la cual se puede calcular la velocidad de sedimentación o el porcentaje total de SST removidos en función del tiempo de detención en el agua bajo estudio. El procedimiento experimental de estas pruebas de sedimentación empezó con la preparación de soluciones que se utilizaron durante el experimento. Estas fueron: $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ de 0.10 mg/L, s NALCO 9907 de 1.0 mg/L, y HCl 1.0 N. La columna de sedimentación fue llenada con el agua a tratar, hasta llegar al nivel de los 3.20 metros. Se ajustó el valor del pH del agua en la columna a un valor de 5.0, añadiendo al agua a tratar una solución de HCl 1.0 N mediante una jeringa de 10 mL. Para esto se utilizó el equipo para medición de pH, marca Omega, modelo CDH-1X.

Se conectó el compresor de aire (marca Ingersoll Rand modelo PS7.5-3SD) en la parte inferior de la columna, utilizando una manguera flexible de pvc de 1.9 cm, la cual se ajustó al compresor y al puerto de la columna por medio de abrazaderas de 2.5 cm. De esta manera se alimentó un flujo de $50 \text{ m}^3/\text{h}$ para fomentar la agitación continua. Cada puerto de esta columna cuenta con válvulas de 2.5 cm para el control de los fluidos a cargar y descargar. El compresor de aire fue encendido para generar una turbulencia y promover el mezclado de la preparación de coagulante-floculante y fue mantenida abierta la válvula del puerto para ello. Después se añadió el coagulante, en la misma concentración manejada en la prueba de jarras. Para el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ de 0.10 mg/L fue 1.0 mL por cada litro de agua a tratar y la agitación con aire del compresor fue mantenida por 10 minutos. Posteriormente fue añadido el floculante, en la misma concentración manejada en la prueba de jarras.

Para el NALCO 9907 de 1.0 mg/L fue de 4.0 mL por cada litro de agua a tratar y se mantuvo la agitación con aire del compresor por un minuto. Posteriormente fue cerrada la válvula de alimentación de aire del compresor para detener la agitación. En ese mismo instante se apagó el compresor y fue considerado ese momento como tiempo cero para la toma de muestras de agua en cada puerto de nuestra torre de sedimentación. A los 7 minutos fue tomada la muestra inicial de agua de 500 mL en cada uno de los puertos y se filtra usando papel filtro de 5 μm y embudo de filtración.

Una vez que fueron separados los sólidos en suspensión de cada una de las primeras 6 muestras, se pesaron y fueron llevados registros de peso de sólidos removidos en función de la profundidad en la torre y del tiempo. Se continuó con la toma de muestras en la columna por cada 7 minutos y se continuó también con el registro de peso de sólidos suspendidos removidos. Fue elaborada una matriz de datos de la prueba (Tabla 21) y con esta información fueron elaboradas las curvas de isoporcentajes de sedimentación (Figura 19) para poder definir a partir de ellas el porcentaje de remoción total de sólidos.

2.2.1.4 Filtración mediante arena y carbón activado

La filtración es una de las aplicaciones más comunes del flujo de fluidos a través de lechos empacados. El objetivo de este proceso es la separación de un sólido del fluido en el cual se transporta. Por lo general el medio granular se compone de una o más capas de partículas sólidas soportadas en un lecho de arena sobre una rejilla-soporte, a través del cual fluye el material que va a filtrarse, ya sea por gravedad o a presión. Las características de los filtros de arena y carbón activado se incluyen en la sección técnica (2.4.2).

2.2.1.5 Filtro prensa

El objetivo del filtro prensa fue la recuperación del agua siendo tratada que se encuentra con los lodos colectados en el reactor coagulador, tanque sedimentador y tanque de transferencia para ajuste de pH y adición del agente anti-incrustante. El agua recuperada en esta operación es recirculada a la entrada del tanque de sedimentación. Las características del filtro prensa se incluyen en la sección técnica (2.4.2).

2.2.1.6 Filtros pulidores

El objetivo de los filtros pulidores es la eliminación de sílice y partículas remanentes provenientes de los procesos corriente arriba en el pretratamiento. Utilizan un medio filtrante a base de polipropileno, celulosa o poliéster compactados o a base de hilados de polipropileno que permiten la retención de partículas de hasta 5 μm . Las características de estos filtros se incluyen en la sección técnica (2.4.2).

2.2.2 Sistema de filtración mediante una membrana de ósmosis inversa (MOI)

El objetivo de este proceso de filtrado es la eliminación de partículas (hasta de 0.0001 μm) y sales contenidas en ella, haciéndola pasar a través de una membrana semipermeable mediante el uso de alta presión. Las características de una MOI se incluyen en la sección técnica (2.4.2). Para encontrar las condiciones óptimas de operación del sistema de filtrado mediante el uso de MOI, fueron efectuadas pruebas a nivel de planta piloto.

Para establecer estas condiciones de operación, en la Figura 4 se aprecia el diagrama de especiación del silicio como una función del pH, donde se muestra un amplio rango para la precipitación del SiO_2 , un amplio rango para la actuación de la especie $\text{SiO}(\text{OH})_3^-$ y un estrecho rango para la actuación del resto de sus especies de pH 10 a valores mayores a 12.

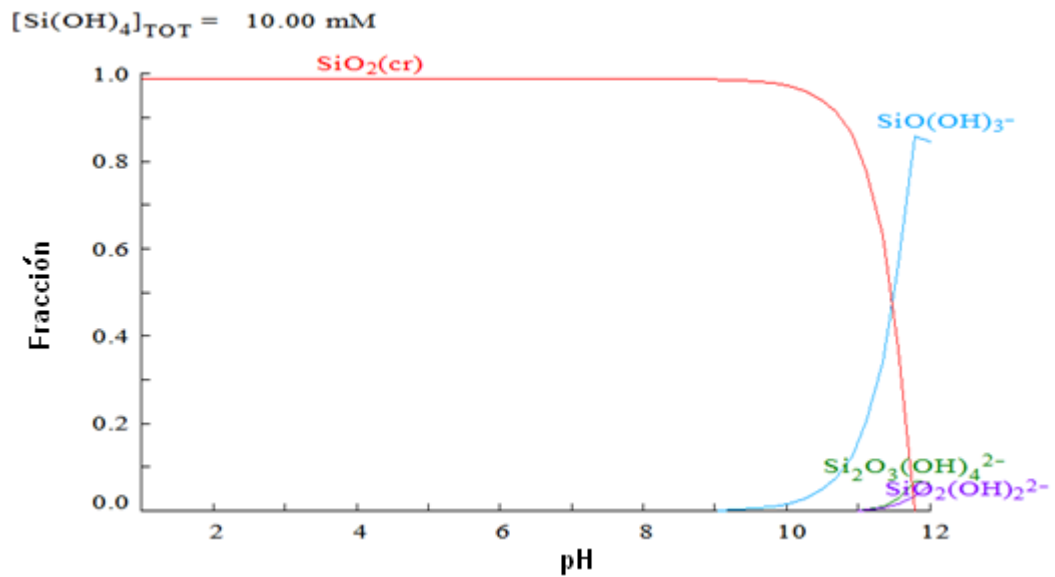


Figura 4. Diagrama de especiación para el silicio.

Como se puede ver en la gráfica anterior, para incrementar la efectividad en la operación de la membrana para la separación del SiO_2 , se debe trabajar a pH menor de 10, pero la actividad de las especies en el intervalo de pH de 10 a 12 debe ser evaluado.

Por lo tanto es recomendado efectuar un diseño factorial de la siguiente manera: Para dos variables en MOI (pH y concentración de agente anti-incrustante), cuatro niveles en el control de pH (3.0, 4.0, 7.0 y 12.0) y dos niveles en la concentración de anti-incrustante (1.0 y 3.0 mg/L), se generaron ocho posibles combinaciones experimentales.

Del mismo modo fue tomada en cuenta el desempeño de una membrana usada en la operación del proceso de MOI; para esto se decidió tomar el mejor de los 8 casos anteriores y repetirlo pero usando una membrana recuperada (usada y retro-lavada con HCl 1.0 N). De esta manera fueron analizadas 9 corridas experimentales en el sistema MOI de la planta piloto bajo estudio, tal y como se muestra en el diseño factorial de la Tabla 4.

TABLA 4

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL SISTEMA MOI

Experimento (Caso)	pH	Concentración de agente anti-incrustante (VIATEC 4000) (mg/L)
1	12	1
2	7	1
3	12	3
4	7	3
5	4	1
6	4	3
7	3	1
8	3	3
9(*)	4	3

(*) Para este caso particular, la unidad de MOI fue prelavada con una solución de HCl para reducir la caída de presión e incrementar el flujo permeado.

El objetivo de estas pruebas fue encontrar las condiciones óptimas de operación en este sistema de filtrado, que permitieran maximizar el flujo de agua residual permeada o recuperada durante la operación de la planta piloto.

El procedimiento experimental para cada combinación de pH y concentración de anti-incrustante VIATEC 4000, inició con todos los equipos de la planta operando en estado estable con un flujo de agua de 908.40 L/h y fue tomada cada hora la temperatura del agua a tratar llegando a la planta piloto. Entonces fueron colectados 5.0 litros de agua residual en la entrada, en la salida y en la recirculación de la membrana, cada hora y durante los 6 días de operación. Para esto fueron utilizados contenedores plásticos de 6.0 L de capacidad, los cuales fueron identificados indicando la hora y posición en la membrana (entrada, permeada y recirculación). Los contenedores fueron entregados cada hora al laboratorio para su análisis de SiO₂ y SDT.

Del mismo modo fueron tomados los valores de flujo de agua cada hora en las tres posiciones de la membrana (entrada, permeada y recirculación). Para cada una de las corridas al pasar el tiempo la membrana tendió a ensuciarse y la caída de presión en la membrana comenzó a subir. En esos momentos se abrió ligeramente la recirculación para hacer que el diferencial de presión se mantuviera constante en 0.68 kg/cm².

Para cada una de las ocho corridas anteriores fue utilizada una membrana nueva. La mejor de las ocho corridas fue repetida pero utilizando ahora una membrana recuperada (membrana usada y retro-lavada con una solución de HCl 1.0 N) para conocer su comportamiento. En cada una de las nueve corridas, el flujo permeado disminuyó en la unidad de OI como resultado de las variaciones en otras características tales como las concentraciones de óxido de silicio y SDT a la entrada y salida de la membrana. Estos resultados son mostrados en las Figuras 16 a 60 para los nueve casos diferentes.

Dada la información anterior, fue muy importante mostrar el comportamiento del silicio así como de sus iones en solución, como una función del pH, para poder utilizar la MOI de una manera más efectiva. Una vez que las condiciones óptimas de operación fueron determinadas para el sistema de la membrana de OI, varios experimentos fueron llevados a cabo y los datos resultantes fueron analizados utilizando la herramienta para RNA de MATLAB R2009b [48-51]. Dentro de las actividades realizadas en la corrida de mejor desempeño de MOI, estuvo el efectuar análisis de los sólidos retenidos o incrustados en MOI para conocer el tipo de especies remanentes en el agua siendo tratada llegando este proceso (Tabla 23).

2.3 Manejo y disposición de los residuos generados

Todos los lodos y/o residuos generados en los diferentes equipos y procesos durante la operación de la planta piloto de tratamiento de aguas residuales fueron manejados por la administración de la empresa envasadora en Toluca.

2.4 Información técnica

La información técnica del agua industrial residual por tratar se encuentra detallada en la Tabla 13. Esta información fue tomada a la salida de la actual planta de manufactura de latas de aluminio.

Esta información muestra un agua residual alta en conductividad, con un contenido medio de dureza total, un alto nivel de sólidos disueltos totales (SDT), así como un considerable contenido de sílice.

2.4.1 Parámetros de calidad del agua

Varias muestras de efluente fueron tomadas en planta de manufactura de latas de aluminio. Para esto el método de muestreo se apoyó en la norma NMX-AA-003-1980 para muestreo de aguas residuales (Sección 2.0 Materiales y Métodos). De igual forma las muestras colectadas fueron analizadas usando métodos fisicoquímicos [51] tales como NMX-AA-093-SCFI-2000 para determinación de la conductividad, NMX-AA-072-SCFI-2001 para determinación de la dureza total, NMX-AA-008-SCFI-2000 para medición del pH, NMX-AA-034-SCFI-2001 para determinación de la concentración de sólidos suspendidos totales (SST), y NMX-AA-005-SCFI-2000 para medición de grasas y aceites.

2.4.2 Información técnica del equipo

Todos los equipos de la planta piloto fueron diseñados de acuerdo a los lineamientos de ingeniería básica y de la ruta de diseño (RD), en cuyas ecuaciones se muestran las variables tomadas en cuenta para cada diseño.

2.4.2.1 Filtros Coalescentes

Este tipo de elementos filtrantes son de alta eficiencia basada en una estructura porosa de polipropileno de alta estabilidad mecánica y térmica. La finalidad de estos filtros es la retención de aceites y grasas por medio de un cartucho de poliuretano compactado. Son cartuchos de uso industrial instalados en un tanque de acero inoxidable con tapas y seguros del tipo candado, para cambio rápido de cartucho. Están diseñados para presiones de operación de hasta 150 psi y temperaturas de hasta 150 °C.

Se tienen eficiencias de retención de hasta 99.98% y el cambio de elemento es recomendado a una caída de presión de 0.58 Kg/cm².

Para este proyecto se tendrán dos unidades en paralelo con una capacidad de manejo individual de hasta 1589.70 L/h y con un área filtrante individual de 0.51 m². A continuación la Tabla 5 muestra la información técnica de los filtros coalescentes.

TABLA 5
INFORMACIÓN DE DISEÑO DE LOS FILTROS COALESCENTES

Característica	Descripción / Valor
Medio filtrante	Poliuretano comprimido
Capacidad de retención de aceites y grasas	Cualquier concentración mayor a 5 mg/L
Flujo máximo permitido	1,589.70 L/h
Presión de operación	3 kg/cm ²
Presión máxima de operación	10.20 kg/cm ²
Diámetro del elemento filtrante	0.06 m
Largo del elemento filtrante	0.25 m
Temperatura de operación	25 °C
Temperatura máxima de operación del elemento filtrante	150 °C
Caída de presión máxima permitida	0.58 kg/cm ²
Área de filtración	0.51 m ²

2.4.2.2 Reactor Coagulador

Estos equipos son utilizados para el ablandamiento parcial del agua o reducción parcial de sólidos totales disueltos mediante el uso de coagulantes. Para este proyecto se trata de un tanque de polipropileno con rebosadero interior, un volumen total de 1,100 litros y un tiempo de detención o residencia de 1.0 hora.

El agua es alimentada al reactor con una premezcla de HCl 1.0 N para ajustar el pH, una solución 1.0 mL de coagulante de $Al_2(SO_4)_3$ de 0.10 mg/L por cada litro de agua a tratar y una solución de 4.0 mL de floculante catiónico NALCO 9907 de 1.0 mg/L por cada litro de agua a tratar. El agua y la combinación de químicos son mezcladas neumáticamente por medio de una inyección de $51m^3/h$ de aire por el fondo del reactor; motivo por el cual estrictamente hablando aunque el tiempo de detención teórico de este equipo es 1.0 horas, la sedimentación es despreciable debido a la agitación. Las ecuaciones involucradas en los cálculos básicos del equipo son:

$$G = (P/\mu V)^{1/2} \quad (1)$$

Dónde:

G = Gradiente medio de velocidad, 1/s

P = Potencia necesaria, W

μ = viscosidad dinámica, N s/m²

V = Volumen del reactor

$$G = (Qt_d)^{-1}(PV \mu)^{1/2} \quad (2)$$

Dónde:

t_d = Tiempo de detención

Q = Caudal, m^3/s

$$P = (P_a)(V_a) (\ln(P_c / P_a)) \quad (3)$$

Dónde:

P = Potencia disipada por el mezclador neumático en KW.

P_a = Presión atmosférica (KN/m^2)

V_a = Volumen de aire introducido a la presión atmosférica, m^3/s .

P_c = Presión del aire en el punto de descarga, KN/m^2

A continuación la Tabla 6 muestra la información técnica del reactor coagulador.

TABLA 6

INFORMACIÓN DE DISEÑO DEL REACTOR COAGULADOR

Característica	Valor
Flujo de aire para agitación / potencia	50 m^3/h / 0.70 kw
Volumen del Reactor	1,100 L
Flujo de agua a tratar	908.40 L/h
Material del tanque	Polipropileno
Gradiente	100/s

2.4.2.3 Tanque Sedimentador

Para el presente proyecto, el tanque sedimentador está hecho de polipropileno de un volumen de 1,100 litros, una altura de 3.30 metros para operar con un tiempo de detención de 1.0 horas. Las ecuaciones que describen el proceso de sedimentación en columna son:

$$v_c = H t_c \quad (4)$$

Dónde:

v_c = carga superficial o velocidad de sedimentación

H = altura de la columna de sedimentación, m

t_c = tiempo necesario para alcanzar un tiempo de remoción dado, minutos

$$R \% = \frac{n}{h=1} (\Delta h_n H) (R_n + R_{n+1}) \quad (5)$$

Dónde:

R = Remoción de SST, %

n = número de curva con igual porcentaje de remoción

Δh_1 = Distancia entre curvas de igual porcentaje de remoción, m

H = Altura total de la columna de sedimentación, m

R_n = Porcentaje de igual remoción de la curva número "n"

R_{n+1} = Porcentaje de igual remoción de la curva número “n+1”

A continuación la Tabla 7 muestra la información técnica del tanque sedimentador.

TABLA 7
INFORMACIÓN DE DISEÑO DEL SEDIMENTADOR

Característica	Valor
Altura teórica requerida	3.30 m
Flujo de agua a tratar	908.40 L/h
Altura teórica requerida	3.30 m
Flujo de agua a tratar	908.40 L/h
Tiempo de detención	1.0 h
Carga superficial	3 m/h
Área superficial	0.30 m ²
Volumen teórico del sedimentador	908 L
Volumen real del sedimentador	1,100 L
Capacidad de remoción de sólidos	85.41%
Material del tanque	Polipropileno

2.4.2.4 Filtros de Arena y Carbón Activado

El agua saliendo del tanque sedimentador es enviada a una unidad de filtración compuesta por dos filtros en serie: uno de arena y grava y el otro de carbón activado y antracita. La finalidad primordial de estos filtros es la eliminación de trazas de partículas orgánicas (grasas y aceites) así como de cualquier tipo de sólido en suspensión. Las camas de arena/grava y carbón activado/antracita son de 0.23 m³, respectivamente, las cuales estarán sujetas a ciclos de operación de 144 horas, con 10 horas de retro lavado. Para el presente proyecto, los dos filtros de un diámetro de 0.51 m y una altura de 1.52 m, fueron construidos en material de acero al carbón, con un revestimiento interior de neopreno para evitar la corrosión. Una de las ecuaciones más reconocidas para el cálculo de la caída de presión en lechos empacados es la siguiente:

$$(-\Delta P)g_c L D_p \rho V_{sm}^2 \varepsilon^3 (1 - \varepsilon) = [150(1 - \varepsilon) N_{Re}] + 1.75 \quad (6)$$

Dónde:

$(-\Delta P)$ = Caída de presión a través del lecho empacado, Kg_f/m²

L = Longitud del lecho, m

D_p = Diámetro de partícula, m

ρ = Densidad del fluido, Kg/m³

V_{sm} = Velocidad superficial a una densidad promedio entre las condiciones de entrada y salida, m/s

ε = Porosidad del lecho, adimensional

N_{Re} = Numero de Reynolds promedio basado en V_{sm}, adimensional

A continuación las Tablas 8 y 9 muestran la información técnica de los filtros de arena y grava y de carbón activado y antracita.

TABLA 8

INFORMACIÓN DE DISEÑO DE LOS FILTROS DE ARENA Y GRAVA

Característica	Valor
Volumen de cama de arena	0.23 m ³
Volumen de cana de grava	0.23 m ³
Ciclo de operación	114 h de operación X 10 de retrolavado
Diámetro de camas filtrantes	0.51 m
Altura del filtro	1.52 m
Material del tanque	Acero al carbón revestido con neopreno

TABLA 9

INFORMACIÓN DE DISEÑO DE LOS FILTROS DE CARBÓN ACTIVADO Y ANTRACITA.

Característica	Valor
Volumen de cama de carbón activado	0.23 m ³
Volumen de cana de antracita	0.23 m ³
Ciclo de operación	114 h de operación X 10 de retrolavado
Diámetro de camas filtrantes	0.51 m
Altura del filtro	1.52 m
Material del tanque	Acero al carbón revestido con neopreno

2.4.2.5 Filtro Prensa

Todos los lodos provenientes de los diferentes equipos que se purgan de manera programada en la planta piloto (reactor coagulador, tanque sedimentador y el tanque de transferencia para el ajuste del pH y adición de agente anti-incrustante) son enviados al filtro prensa que consta de 10 marcos y placas de 10 X 30 cm, los cuales trabajan continuamente para separar los lodos. El agua recuperada en esta operación es recirculada a la entrada del tanque de sedimentación. La ecuación para el cálculo de este tipo de equipos es la siguiente:

$$[\Delta V \ \Delta\theta] = g_c A^2 (-\Delta P_t) \ \mu\alpha W (V_f + V_e) \quad (7)$$

Dónde:

$\Delta V \ \Delta\theta$ = Velocidad de filtración (Volumen de filtrado / tiempo), L/h

V_f = Volumen del filtrado, L

V_e = Volumen de filtrado equivalente, L

$\mu\alpha W \ g_c A^2 (-\Delta P_t)$ = Pendiente del equipo = velocidad reciproca del filtro /
Volumen del filtrado, h/m²

A = Área de los marcos del filtro prensa, m²

$(-\Delta P_t)$ = Diferencial de presión en el filtro prensa, Kg/cm²

g_c = Aceleración gravitacional = 9.80 m/s²

A continuación se muestra la Tabla 10 que contiene la información técnica del filtro prensa.

TABLA 10**INFORMACIÓN DE DISEÑO DEL FILTRO PRENSA**

Característica	Valor
Volumen de filtrado equivalente	0.33 L
Numero de marcos requeridos	6
Dimensiones de marcos	0.30 m X 0.30 m
Área requerida de filtrado	0.54 m ²

2.4.2.6 Filtros pulidores

Los filtros pulidores son filtros de cartucho a base de polipropileno, celulosa o poliéster compactado de densidad creciente de adentro hacia afuera contenidos en pequeños cilindros de acero inoxidable. Otro tipo de cartuchos también pueden ser a base de hilados de los mismos materiales mencionados. La finalidad de estos filtros es la eliminación de posibles partículas de óxido de silicio de hasta de 5 μm que pudieran saturar la MOI. Son resistentes a presiones de operación de hasta 10.20 kg/cm^2 y permiten caídas de presión de 0.58 kg/cm^2 . Tienen un área filtrante de 0.51 m^2 , una eficiencia de remoción del 99.98% y una capacidad máxima de flujo de 1589.70 L/h. A continuación la Tabla 11 muestra la información técnica de los filtros pulidores.

TABLA 11**INFORMACIÓN DE DISEÑO DE LOS FILTROS PULIDORES**

Característica	Valor
Medio filtrante	Hilos de polipropileno
Capacidad de retención	Partículas de hasta 5 μm
Flujo máximo permitido	1,589.70 L/h
Presión de diseño	10.20 kg/cm^2
Caída de presión permitida	0.58 kg/cm^2
Área filtrante requerida	0.51 m^2
Eficiencia de remoción	99.98%

2.4.2.7 Membrana de ósmosis inversa (MOI)

El proceso de filtración de agua mediante el uso de una membrana requiere de una fuerza impulsora que provoque la separación del solvente y el soluto. El proceso de ósmosis inversa consiste en separar un solvente de una solución salina mediante el uso de una membrana semi-impermeable y de una presión hidrostática. Este es un método muy útil de separación, debido a que la membrana permite el paso de agua y rechaza el paso de otras moléculas diferentes a la del agua, así como de iones. Para este proyecto se ha utilizado para la operación de la planta una membrana a base de poliamida, con un área activa de 37.2 m^2 la cual puede operar a presiones de hasta 40.81 Kg/cm^2 , en un intervalo de pH de 2 a 12, con caídas de presión de hasta 0.68 Kg/cm^2 , una turbidez máxima a la entrada de la membrana de 1.0 UNT y una razón mínima de flujo concentrado a flujo permeado de 5:1.

La ecuación involucrada en los cálculos dimensionales en una MOI, es la siguiente:

$$J = [A \quad R_{TOT \ MEM}](\Delta P - \Delta \pi) \quad (8)$$

Dónde:

J = Flujo permeado en la membrana, L/h

A = Área de filtración en la membrana, m^2

$\sum R_{TOT. MEM.}$ = resistencia total en la membrana
(Ensuciamiento + Compactación de la membrana), $Kg_f \ m / h$

ΔP = Diferencial de presión en flujos de alimentación y permeado, Kg_f/cm^2

$\Delta \pi$ = Diferencial de presión osmótica de flujos de alimentación y permeado,
 Kg_f/cm^2

El área de filtración de la membrana fue estimada de la siguiente manera:

$$\text{Flujo de agua a tratar} = 908.40 \text{ L/h} = 0.90840 \text{ m}^3/\text{h} = J$$

$$A = [J/(\Delta P - \Delta \pi)](R_{TOT \ MEM})$$

Para una membrana de poliamida, $0.061 \text{ m/h} < (\Delta P - \Delta \pi)/(R_{TOT \ MEM}) < 4.87 \text{ m/h}$

Por lo tanto, se escoge el valor menor por estar del lado seguro proporcionando un área mayor en la membrana.

$A = 14.89 \text{ m}^2$, por lo tanto usaremos una membrana de 2.5 veces mayor área filtrante que la teóricamente requerida. A continuación la Tabla 12 muestra la información técnica de MOI.

TABLA 12**INFORMACIÓN DE DISEÑO DE MOI.**

Característica	Valor
Presión máxima de trabajo	40.81 kg/cm ²
Temperatura máxima de operación	45 °C
Rango de pH	2 – 12
Turbidez máxima permitida	1.0 UNT
Razón mínima de flujos concentrado a permeado	5 : 1
Caída de presión máxima permitida	0.68 kg/cm ²
% de Rechazo de soluto	99.5 a 99.7%
Área de membrana requerida para flujo mínimo de 908.40 L/h	14.90 m ²
Área real de membrana	37.15 m ²
Flujo permeado máximo	2,265.25 L/h

2.5 Modelación

Para el presente trabajo el proceso MOI (equipo principal) fue sometido a un proceso de modelación mediante el uso de RNA, mientras que el reactor coagulador (equipo secundario) perteneciente al pretratamiento en la planta piloto, fue sometido a un diseño factorial y a un análisis de superficie de respuesta. Solo para propósitos comparativos contra el método de RNA, el proceso de MOI fue sometido a un diseño factorial y a un ASR.

2.5.1 Tipos de modelación

En la presente investigación el proceso de MOI (equipo principal) fue modelado mediante redes neuronales artificiales (RNA) y análisis de superficie de respuesta (ASR), mientras que el reactor coagulador (equipo secundario perteneciente a la etapa de pretratamiento) fue modelado solamente mediante el análisis de superficie de respuesta (ASR). Adicionalmente fueron efectuados diseños factoriales en ambos equipos para comparar los resultados obtenidos.

2.5.1.1 Diseño factorial

En el estudio sobre la mejora de procesos industriales (control de calidad) es usual trabajar en problemas en los que hay muchos factores que pueden influir en la variable de interés. La utilización de experimentos con un elevado número de variables tiene el gran inconveniente de necesitar un número elevado de observaciones, además puede ser una estrategia ineficaz porque, por lo general, muchos de los factores en estudio no son influyentes y mucha información analizada no es relevante.

En este caso una estrategia recomendable es utilizar una técnica secuencial donde se comienza por trabajar con unos pocos factores y según los resultados que se obtienen se eligen los factores a estudiar en la segunda etapa. De esta manera se pueden analizar factores que resulten significativos.

Los diseños factoriales 2^k son diseños en los que se trabaja con k factores, todos ellos con dos niveles (se suelen denotar + y -). Estos diseños son adecuados para tratar información generada en equipos como el reactor coagulador y la membrana de ósmosis inversa, debido a que permiten trabajar con un número elevado de factores y son válidos para estrategias secuenciales.

2.5.1.2 Análisis de superficie de respuesta (ASR)

La metodología de ASR es un conjunto de técnicas matemáticas utilizadas en el tratamiento de problemas en los que una respuesta de interés está influida por varios factores de carácter cuantitativo.

El propósito inicial de estas técnicas es diseñar un experimento que proporcione valores razonables de la variable respuesta y, a continuación, determinar el modelo matemático que mejor se ajusta a los datos obtenidos. El objetivo final es establecer los valores de los factores que optimizan el valor de la variable respuesta.

Para el presente proyecto fue utilizado el programa computacional llamado “Design experts” de la compañía Stat-Ease Inc., al cual se le pueden alimentar datos de más de tres variables o factores en diferentes niveles de operación.

El programa genera una superficie de respuesta donde se pueden identificar fácilmente los máximos, los mínimos y los óptimos (locales). El objetivo de ASR es optimizar la variable de interés, lo cual se logra al determinar las condiciones óptimas de operación del sistema.

Los factores son las condiciones del proceso que influyen la variable de respuesta y estos pueden ser cuantitativos o cualitativos. La respuesta es una cantidad medible cuyo valor se ve afectado al cambiar los niveles de los factores. El interés principal es optimizar dicho valor. Al decir que un valor de respuesta “Y” depende de los niveles x_1, x_2, \dots, x_k , de k factores, E_1, E_2, \dots, E_k , estamos diciendo que existe una función matemática de x_1, x_2, \dots, x_k , cuyo valor para una combinación dada de los niveles de los factores a Y . esto es:

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (9)$$

La función de respuesta se puede representar con una ecuación polinomial. El éxito de un estudio de ASR depende de que la respuesta se pueda ajustar a un polinomio de primer o segundo grado:

$$Y = B_0 + B_1x_1 + B_2x_2 \quad (10)$$

Donde B_0, B_1, B_2 , son los coeficientes de regresión a estimar, x_1 y x_2 representan los niveles de E_1 y E_2 respectivamente. Suponiendo que se colectan $N \geq 3$ valores de respuesta (Y), con los estimadores b_0, b_1 y b_2 se obtienen B_0, B_1, B_2 respectivamente. Al remplazar los coeficientes de regresión por sus estimadores obtenemos:

$$Y_1 = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 \quad (11)$$

Donde Y_1 denota el valor estimado de Y dado por x_1 y x_2 .

La relación $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$ entre Y y los niveles de los k factores E_1, E_2, \dots, E_k representa una superficie. Con k factores la superficie está en $k+1$ dimensiones; por ejemplo cuando se tiene $Y = f(x_1)$ la superficie esta en dos dimensiones, mientras que si tenemos $Y = f(x_1, x_2)$ la superficie está en tres dimensiones

2.5.1.3 Redes neuronales artificiales (RNA)

Esta sección provee detalles sobre el procedimiento usado para construir la RNA, incluyendo el desarrollo de la arquitectura de la RNA, el entrenamiento de la red neuronal y la selección de la configuración óptima de la RNA. El número de neuronas en la capa oculta fue analizado para entender su impacto sobre el número de iteraciones y sobre los valores del error cuadrático medio (ECM) obtenidos.

La manera en la cual las neuronas de la red son estructuradas en varias capas y la interconectividad entre las neuronas de diferentes capas temas de mucha importancia para el diseño de la arquitectura de la red. En general existen tres clases fundamentales de arquitecturas de redes: Capa sencilla, multi-capas y redes recurrentes de alimentación hacia adelante.

Las redes multi-capas de alimentación hacia adelante con funciones de activación propias, son utilizadas debido a su precisión con los datos experimentales después del entrenamiento. Las redes multi-capas alimentadas hacia adelante pueden tener una o más capas ocultas. Similarmente entre las varias funciones de activación, la función tangente fue utilizada para entrenamiento.

Después del entrenamiento, dos capas oculta con un número particular de neuronas resultó con el menor error en la predicción y fue entonces seleccionada para la arquitectura de la red, la cual también incluyó tres neuronas en la capa de entrada y una neurona en la capa de salida. El 33% de los datos experimentales fueron utilizados para el entrenamiento. El conjunto completo de datos colectados tuvieron las siguientes entradas: concentración de entrada de óxido de silicio, concentración de SDT a la entrada y tiempo. La salida de la red fue el flujo permeado en MOI. Se utilizó el algoritmo de Levenberg-Marquardt para el entrenamiento de la red. Para un conjunto de datos de entrada en la red, la respuesta de cada neurona de la capa de salida es calculada y comparada con la salida o respuesta experimental deseada. La matriz de pesos de la red es ajustada, así como la minimización de los errores de cada neurona.

Para la presente investigación el modelo de RNA utilizado fue el de “alimentación hacia adelante y propagación hacia atrás”, cuya arquitectura se muestra en la Figura 75. Esta fase de alimentación hacia adelante se inicia cuando se presenta un patrón en la capa de entrada de la red. Cada unidad de la entrada se corresponde con un elemento del vector patrón de entrada. Las unidades de entrada toman el valor de su correspondiente elemento del patrón de entrada y se calcula el valor de activación o nivel de salida de la primera capa.

A continuación las demás capas realizarán la fase de propagación hacia adelante que determina el nivel de activación de las otras capas. La unidad procesadora j obtiene la cantidad S_j según la ecuación (12):

$$S_j = \sum_i a_i w_{ji} \quad (12)$$

y genera la salida o nivel de activación según la ecuación (13):

$$Salida = f(S_j) \quad (13)$$

La función f es una función umbral genérica, entre las que cabe destacar la función sigmoïdal y la función hiperbólica. El valor de la salida de la unidad j es enviado o transmitido a lo largo de todas las conexiones de salida de dicha unidad.

Una vez se ha completado la fase de propagación hacia adelante se inicia la fase de corrección o fase de propagación hacia atrás. Los cálculos de las modificaciones de todos los pesos de las conexiones empiezan por la capa de salida y continua hacia atrás a través de todas las capas de la red hasta la capa de entrada. Dentro de los tipos de ajuste de pesos se puede clasificar dos grupos, ajuste de unidades procesadoras de la capa de salida y ajuste de unidades procesadoras de las capas ocultas.

El ajuste de los pesos de la capa de salida es relativamente sencillo debido a que existe y se conoce el valor deseado para cada una de las unidades de la capa de salida. Cada unidad de la capa de salida produce un número real como salida y se compara con el valor deseado especificado en el patrón del conjunto de entrenamiento. A partir del resultado de la comparación se calcula un valor de error δ_j , según la ecuación (14) para cada unidad de la capa de salida.

$$\delta_j = (t_j - a_j) f'(S_j) \quad (14)$$

Siendo t_j el valor de salida deseado y f' la derivada de la función umbral f .

Las capas no tienen un vector de salidas deseadas y por tanto no se puede seguir el método de propagación de error mencionado en el caso de unidades procesadoras de la capa de salida. El valor de error calculado para este tipo de unidades procesadoras se obtiene a partir de la ecuación (15).

$$\delta_j = [\sum_k \delta_k w_{kj}] f'(S_j) \quad (15)$$

El ajuste de los pesos asociados a las conexiones se realiza a partir del valor Δw_{ji} de cada unidad de proceso. Cada peso es ajustado según la ecuación (16) conocida como la regla de ajuste de pesos generalizada:

$$\Delta w_{ji} = \eta \delta_j a_i \quad (16)$$

La variable η es el coeficiente de aprendizaje. Este coeficiente, normalmente entre 0.25 y 0.75 refleja el grado de aprendizaje de la red. Algunas veces este coeficiente es modificado de un valor inicial alto a valores progresivamente menores durante la sesión del entrenamiento con el objetivo de lograr un mejor aprendizaje.

Durante la Convergencia en el proceso de entrenamiento o aprendizaje de la red alimentada hacia adelante y con propagación hacia atrás es frecuente medir cuantitativamente el aprendizaje mediante el valor ECM (error cuadrático medio) del error de la red. Esta medida refleja el modo en el que la red está logrando respuestas correctas; a medida que la red aprende, su valor ECM decrece.

3.0 RESULTADOS Y DISCUSIONES

La sección de resultados está enfocada en proveer la información obtenida de las pruebas experimentales efectuadas en el elemento principal de esta investigación que es el proceso MOI, en los elementos secundarios pertenecientes a la sección de pretratamiento de esta planta piloto que son, el reactor coagulador y el tanque de sedimentación, y en proveer información relativa al diseño básico del equipo involucrado en esta planta piloto.

3.1 Caracterización del agua residual

Las características de calidad mostradas en la Tabla 13 indican que el agua no puede ser reusada en otras etapas del proceso o descargada al drenaje sin un tratamiento adecuado. Por tal motivo, los procesos seleccionados en la planta piloto deben ser aquellos que se requieran para cumplir con las normas aplicables en materia de descarga de aguas o con los parámetros requeridos para su reutilización.

TABLA 13

**CARACTERÍSTICAS DE CALIDAD DEL AGUA INDUSTRIAL RESIDUAL
ALIMENTADA A LA PLANTA PILOTO DE TAR**

Parámetros	Unidades	Valores
Conductividad	Micro ohm/cm	2467
pH	unidades de pH	8.35
Dureza total	mg/L as CaCO ₃	71.6
Dureza de calcio	mg/L as CaCO ₃	36
Dureza de magnesio	mg/L as CaCO ₃	35.6
Óxido de silicio	mg/L	258
Sólidos totales, ST	mg/L	1862
Sólidos disueltos totales, SDT	mg/L	1817
Sólidos suspendidos totales, SST	mg/L	45
Demanda química de oxígeno, DQO	mg/L	300

Los altos valores en los diferentes parámetros como conductividad, sólidos totales (ST), sólidos disueltos totales (SDT), así como de los valores moderados de dureza fueron relacionados a la aplicación de aditivos químicos durante el proceso de lavado de latas y requirieron de un proceso de coagulación-floculación y sedimentación, así como de uno o varios procesos adecuados de filtración en la planta de tratamiento de aguas residuales. El valor de DQO requirió de un proceso de eliminación de grasas y aceites, las cuales fueron generadas en el proceso de lavado y desengrasado de placas y latas de aluminio. En particular la elevada concentración de óxido de silicio fue debida al agua de lavado utilizada en el proceso de manufactura de latas la cual es obtenida del subsuelo y requiere de un eficiente proceso a base de una membrana de ósmosis inversa (MOI).

3.2 Resultados experimentales

Los resultados experimentales del presente trabajo están enfocados en el proceso MOI (equipo principal) y en el reactor coagulador y tanque sedimentador (equipos pertenecientes al pretratamiento) dada su potencial contribución en el desempeño de la planta piloto de tratamiento de aguas residuales.

3.2.1 Reactor coagulador

Para este equipo los resultados principales están enfocados en los experimentos con el equipo para prueba de jarras a nivel laboratorio para definir los siguientes puntos:

- a. Mejores condiciones de operación para el reactor coagulador
- b. Selección de la mejor pareja de coagulante – floculante

- c. Análisis de Pareto para identificar las variables principales que pueden afectar la operación del reactor coagulador.

Para cada combinación de coagulante-floculante mostrada en la Tabla 1 (sección 2.2.1.2), un diseño factorial 2^k fue efectuado. Para el presente proyecto fueron seleccionadas cuatro variables de principal influencia en el desempeño del equipo para prueba de jarras y por consiguiente del reactor coagulador en la planta piloto propuesta.

Estas variables son:

- a. Dosis del coagulante
- b. Dosis del floculante
- c. pH inicial
- d. Velocidad de agitación durante la adición del floculante

Ya con las variables principales definidas, el número de combinaciones posibles en el diseño factorial 2^4 es mostrado en la Tabla 3 (sección 2.2.1.2.1):

A continuación se presentan los datos experimentales de cada una de las parejas de coagulante y floculante en el equipo para prueba de jarras. En todos los casos después de añadir el coagulante se mantuvo constante la velocidad de agitación de 250 rpm durante 10 minutos. Es muy importante mencionar que las variables de respuesta que fueron analizadas son la turbidez y la transmitancia. Cada prueba de jarras se efectuó por triplicado y los valores obtenidos de turbidez en cada prueba fueron iguales al promedio en todos los casos (debido a esto solo se reporta el valor promedio). En el caso de la transmitancia, los valores obtenidos en cada prueba fueron ligeramente diferentes entre ellos, por lo que fue necesario reportar el valor de cada prueba y un valor promedio.

En la Tabla 14 se presenta la información obtenida en prueba de jarras para la pareja CaO – NALCO 9907:

TABLA 14
PRUEBA DE JARRAS PARA CaO – NALCO 9907

Corrida	pH inicial	CaO 10 mg/L (mL)	rpm en adición de NALCO 9907 por 45 seg.	NALCO 9907 1.0 mg/L (mL)	pH final	Temp. °C	Turbidez UNT	PRUEBA			
								% T ₁ P R U E B A 1	% T ₂ P R U E B A 2	% T ₃ P R U E B A 3	% T V P A R L O M R E D S I O
1	10	1.0	100.0	1	9.81	25.10	9.0	93.50	93.48	93.58	93.53
2	5	3.5	150.0	4	6.00	24.70	2.0	98.42	98.78	98.58	98.59
3	5	1.0	100.0	1	6.01	24.80	3.0	97.51	97.59	98.21	97.77
4	10	3.5	100.0	1	9.95	24.90	8.0	94.61	94.79	94.55	94.65
5	10	1.0	150.0	4	10.00	25.20	1.0	99.25	98.89	99.16	99.10
6	10	1.0	100.0	4	9.83	24.60	6.0	95.78	95.91	96.34	96.01
7	10	3.5	100.0	4	9.84	24.90	5.0	96.01	97.22	96.03	96.42
8	10	3.5	150.0	4	10.09	25.20	4.0	96.55	98.03	96.99	97.19
9	10	3.5	150.0	1	10.10	25.10	5.0	96.50	95.23	97.62	96.45
10	10	1.0	150.0	1	9.88	25.10	3.0	97.15	97.86	99.05	98.02
11	5	3.5	150.0	1	5.95	24.70	1.0	98.90	98.42	99.68	99.00
12	5	3.5	100.0	1	6.28	24.70	6.0	95.21	97.73	94.25	95.73
13	5	1.0	150.0	1	5.71	24.80	1.0	99.77	98.15	99.65	99.19
14	5	1.0	150.0	4	5.73	24.60	5.0	98.63	97.19	93.26	96.36
15	5	3.5	100.0	4	6.29	24.70	5.0	97.32	97.89	94.53	96.58
16	5	1.0	100.0	4	6.04	24.70	3.0	97.21	98.40	99.05	98.22

En la Tabla 15 se presentan los resultados obtenidos en prueba de jarras para la pareja $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ – NALCO 9907:

TABLA 15
PRUEBA DE JARRAS PARA $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ – NALCO 9907

Corrida	pH inicial	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.10 mg/L (mL)	rpm en adición de NALCO 9907 por 45 seg.	NALCO 9907 1.0 mg/L (mL)	pH final	Temp. °C	Turbidez z UNT	% T ₁ P R U E B A 1	% T ₂ P R U E B A 2	% T ₃ P R U E B A 3	% T V P A R L O O M R E E D S I O
1	10	1.0	100.00	1	9.78	22.60	1.00	98.89	99.26	99.87	99.34
2	5	6.5	150.00	4	6.01	22.60	3.00	96.57	97.00	99.38	97.65
3	5	1.0	100.00	1	5.61	22.60	2.00	99.25	98.51	98.34	98.70
4	10	6.5	100.00	1	9.72	22.60	5.00	97.33	97.01	94.35	96.23
5	10	1.0	150.00	4	9.58	22.60	3.00	97.35	98.21	98.44	98.00
6	10	1.0	100.00	4	9.80	22.60	1.00	99.35	98.79	99.04	99.06
7	10	6.5	100.00	4	9.81	22.60	0.00	100.00	100.0	100.0	100.00
8	10	6.5	150.00	4	9.59	22.60	1.00	98.99	99.37	99.24	99.20
9	10	6.5	150.00	1	9.78	22.60	6.00	97.25	96.21	93.61	95.69
10	10	1.0	150.00	1	9.77	22.60	2.00	99.07	98.69	97.65	98.47
11	5	6.5	150.00	1	5.93	22.60	7.00	96.45	96.10	92.63	95.06
12	5	6.5	100.00	1	5.59	22.60	1.00	99.39	98.72	99.13	99.08
13	5	1.0	150.00	1	5.98	22.60	1.00	99.49	99.02	99.18	99.23
14	5	1.0	150.00	4	6.00	22.60	1.00	99.81	99.33	99.76	99.60
15	5	6.5	100.00	4	5.72	22.60	0.00	99.89	99.69	99.46	99.68
16	5	1.0	100.00	4	5.82	22.60	0.00	100.0	100.0	100.0	100.00

En la Tabla 16 se presenta los resultados obtenidos en prueba de jarras para la pareja FeCl₃ – NALCO 9907:

TABLA 16
PRUEBA DE JARRAS PARA FeCl₃ – NALCO 9907

Corrida	pH inicial	FeCl ₃ 0.10 mg/L (mL)	rpm en adición de NALCO 9907 por 45 seg.	NALCO 9907 1.0 mg/L (mL)	pH final	Temp. °C	Turbidez UNT	% T ₁ P R U E B A 1	% T ₂ P R U E B A 2	% T ₃ P R U E B A 3	% T V P A R L O M B R E D S I O
1	10	4.5	100.00	1	9.84	22.60	2.00	98.99	98.04	98.59	98.54
2	5	8.5	150.00	4	6.24	22.60	3.00	97.91	98.35	98.34	98.20
3	5	4.5	100.00	1	5.12	22.60	2.00	97.76	99.00	99.25	98.67
4	10	8.5	100.00	1	9.82	22.60	2.00	98.35	98.73	99.26	98.78
5	10	4.5	150.00	4	9.59	22.60	1.00	99.71	99.68	99.29	99.56
6	10	4.5	100.00	4	9.84	22.60	3.00	99.25	98.30	96.48	98.01
7	10	8.5	100.00	4	9.83	22.60	4.00	98.25	97.43	95.83	97.17
8	10	8.5	150.00	4	9.58	22.60	1.00	99.59	99.40	99.39	99.46
9	10	8.5	150.00	1	9.57	22.60	0.00	100.0	100.0	100.0	100.00
10	10	4.5	150.00	1	9.47	22.60	6.00	96.29	96.02	94.43	95.58
11	5	8.5	150.00	1	6.19	22.60	2.00	99.33	98.75	98.44	98.84
12	5	8.5	100.00	1	5.06	22.60	7.00	96.81	96.49	91.76	95.02
13	5	4.5	150.00	1	6.23	22.60	2.00	99.09	98.70	98.58	98.79
14	5	4.5	150.00	4	6.24	22.60	4.00	98.71	97.63	95.56	97.30
15	5	8.5	100.00	4	5.94	22.60	1.00	99.65	99.37	98.13	99.05
16	5	4.5	100.00	4	6.03	22.60	1.00	99.31	98.78	98.88	98.99

En la Tabla 17 se presenta los resultados obtenidos en prueba de jarras para la pareja CaO – NALCO 3249:

TABLA 17
PRUEBA DE JARRAS PARA CaO – NALCO 3249

Corrida	pH inicial	CaO 10 mg/L (mL)	rpm en adición de NALCO 3249 por 45 seg.	NALCO 3249 1.0 mg/L (mL)	pH final	Temp. °C	Turbidez UNT	% T ₁ P R U E B A 1	% T ₂ P R U E B A 2	% T ₃ P R U E B A 3	% T V P A R L O M B R E D S I O
1	10	1.00	100.00	1	9.96	24.00	1.00	99.01	99.71	99.15	99.29
2	5	3.50	150.00	2	6.12	24.00	11.00	94.48	93.89	89.25	92.54
3	5	1.00	100.00	1	6.00	24.10	1.00	99.88	99.01	99.73	99.54
4	10	3.50	100.00	1	10.05	24.10	4.00	97.23	97.09	96.47	96.93
5	10	1.00	150.00	2	9.92	24.20	2.00	99.03	98.98	97.40	98.47
6	10	1.00	100.00	2	9.93	24.20	4.00	98.36	98.90	95.27	97.51
7	10	3.50	100.00	2	10.08	24.20	2.00	99.12	98.91	97.92	98.65
8	10	3.50	150.00	2	9.93	24.20	8.00	95.89	94.80	92.54	94.41
9	10	3.50	150.00	1	9.96	24.00	2.00	99.21	99.08	92.14	98.61
10	10	1.00	150.00	1	9.84	24.10	16.00	91.25	90.14	85.97	89.12
11	5	3.50	150.00	1	6.72	24.00	2.00	99.17	97.23	98.77	98.39
12	5	3.50	100.00	1	6.40	24.20	10.00	95.18	93.21	90.61	93.00
13	5	1.00	150.00	1	6.35	24.20	8.00	95.63	94.76	93.23	94.54
14	5	1.00	150.00	2	5.52	24.10	4.00	98.65	97.11	95.84	97.20
15	5	3.50	100.00	2	6.79	24.00	4.00	97.15	98.22	96.23	97.20
16	5	1.00	100.00	2	6.60	24.20	2.00	99.02	98.69	97.58	98.43

En la Tabla 18 se presentan los resultados obtenidos en prueba de jarras para la pareja $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ – NALCO 3249:

TABLA 18
PRUEBA DE JARRAS PARA $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ – NALCO 3249

Corrida	pH inicial	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.10 mg/L (mL)	rpm en adición de NALCO 3249 por 45 seg.	NALCO 3249 1.0 mg/L (mL)	pH final	Temp. °C	Turbidez UNT	% T			V P A R L O M R E E D S I O
								P R U E B A 1	P R U E B A 2	P R U E B A 3	
1	10	1.0	100.00	1	9.82	24.10	0.00	99.89	99.45	99.97	99.77
2	5	6.5	150.00	2	5.62	24.00	6.00	97.35	97.80	93.09	96.08
3	5	1.0	100.00	1	5.75	24.10	11.00	93.47	92.99	90.74	92.40
4	10	6.5	100.00	1	9.81	24.10	4.00	98.21	98.00	96.05	97.42
5	10	1.0	150.00	2	9.77	24.00	1.00	99.14	98.89	98.88	98.97
6	10	1.0	100.00	2	9.83	24.10	2.00	98.56	98.79	98.57	98.64
7	10	6.5	100.00	2	9.83	24.00	5.00	97.45	96.99	95.60	96.68
8	10	6.5	150.00	2	9.77	24.10	2.00	98.89	99.21	96.59	98.23
9	10	6.5	150.00	1	9.76	24.10	3.00	98.39	98.13	95.56	97.36
10	10	1.0	150.00	1	9.72	24.10	6.00	97.59	97.04	93.70	96.11
11	5	6.5	150.00	1	5.72	24.00	8.00	95.00	94.37	94.10	94.49
12	5	6.5	100.00	1	5.75	24.20	10.00	94.00	92.87	92.07	92.98
13	5	1.0	150.00	1	5.76	24.00	7.00	95.65	94.76	94.11	94.84
14	5	1.0	150.00	2	5.65	24.00	15.00	90.23	90.12	88.42	89.59
15	5	6.5	100.00	2	5.75	24.10	4.00	97.01	96.90	96.94	96.95
16	5	1.0	100.00	2	5.76	24.10	12.00	92.39	92.04	91.30	91.91

En la Tabla 19 se presenta los resultados obtenidos en prueba de jarras para la pareja FeCl₃ – NALCO 3249:

TABLA 19
PRUEBA DE JARRAS PARA FeCl₃ – NALCO 3249

Corrida	pH inicial	FeCl ₃ 0.10 mg/L (mL)	rpm en adición de NALCO 3249 por 45 seg.	NALCO 3249 1.0 mg/L (mL)	pH final	Temp. °C	Turbidez UNT	% T ₁	% T ₂	% T ₃	% T
								P R U E B A 1	P R U E B A 2	P R U E B A 3	V P A R A L O M E R E D S I O
1	10	4.5	100.00	1	9.82	24.10	6.00	96.66	95.98	93.80	95.48
2	5	8.5	150.00	2	5.55	24.00	7.00	95.01	94.99	94.31	94.77
3	5	4.5	100.00	1	5.44	24.10	7.00	93.21	96.03	95.01	94.75
4	10	8.5	100.00	1	9.75	24.20	4.00	97.35	97.99	95.84	97.06
5	10	4.5	150.00	2	9.80	24.30	9.00	94.29	94.01	92.77	93.69
6	10	4.5	100.00	2	9.84	24.10	5.00	95.19	96.48	98.22	96.63
7	10	8.5	100.00	2	9.84	24.20	4.00	95.00	96.78	98.77	96.85
8	10	8.5	150.00	2	9.80	24.20	7.00	95.31	94.87	94.64	94.94
9	10	8.5	150.00	1	9.80	24.30	4.00	96.79	98.10	96.35	97.08
10	10	4.5	150.00	1	9.80	24.30	6.00	95.31	95.86	96.74	95.97
11	5	8.5	150.00	1	5.63	24.30	8.00	93.79	93.91	94.15	93.95
12	5	8.5	100.00	1	5.31	24.10	4.00	97.33	97.81	96.82	97.32
13	5	4.5	150.00	1	5.60	24.20	3.00	97.31	98.00	97.19	97.50
14	5	4.5	150.00	2	5.52	24.10	15.00	90.19	90.23	87.87	89.43
15	5	8.5	100.00	2	5.60	24.10	3.00	96.16	96.97	99.37	97.50
16	5	4.5	100.00	2	5.60	24.00	3.00	98.32	97.65	96.53	97.50

Las condiciones de operación del reactor coagulador fueron definidas de acuerdo a los resultados en las pruebas de jarras con diferentes parejas de coagulante-floculante y tomando en cuenta las variables operativas que afectaron los resultados de las pruebas de jarras y por lo tanto del mismo reactor coagulador.

De acuerdo a los datos experimentales de las Tablas 14 a la 19, las mejores condiciones de operación se muestran en la Tabla 15, corrida 16, para la pareja de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ – NALCO 9907. Los datos experimentales muestran el menor valor de turbidez en el agua tratada, con los más bajos consumos de productos químicos necesarios para la operación del reactor coagulador. Estos resultados fueron debidos a la mejor acción de esta pareja de coagulante-floculante ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ – NALCO 9907) para trabajar en las condiciones de operación de $\text{pH} = 5$ seleccionadas. Esto fue confirmado al analizar los diagramas de especiación para los 3 diferentes coagulantes [CaO , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y FeCl_3] en las Figuras 5, 6 y 7, donde a un pH de 4 a 6 las especies existentes del aluminio muestran una mayor actividad.

A continuación la Tabla 20 muestra las mejores condiciones reportadas en la prueba de jarras, las cuales son las condiciones de operación para el reactor coagulador durante las pruebas experimentales en la planta piloto.

TABLA 20

CONDICIONES DE OPERACIÓN SUGERIDAS PARA EL REACTOR COAGULADOR.

Corrida	pH inicial	Al ₂ (SO ₄) ₃ mg/L (mL)	rpm en adición de NALCO 9907 por 45 seg.	NALCO 9907 mg/L (mL)	pH final	Temp. °C	Turbidez UNT	% T ₁ P R U E B A 1	% T ₂ P R U E B A 2	% T ₃ P R U E B A 3	% T V P A R L O M B R E D S I O
16	5	1.0	100.00	4	5.82	22.60	0.00	100.0	100.0	100.0	100.00

En la Figura 5 se aprecia el diagrama de especiación para el calcio como una función del pH, donde se muestra una amplia región de actividad de los iones Ca⁺² y CaOH⁺ a un pH = 5, pero una nula actividad de alguna otra especie.

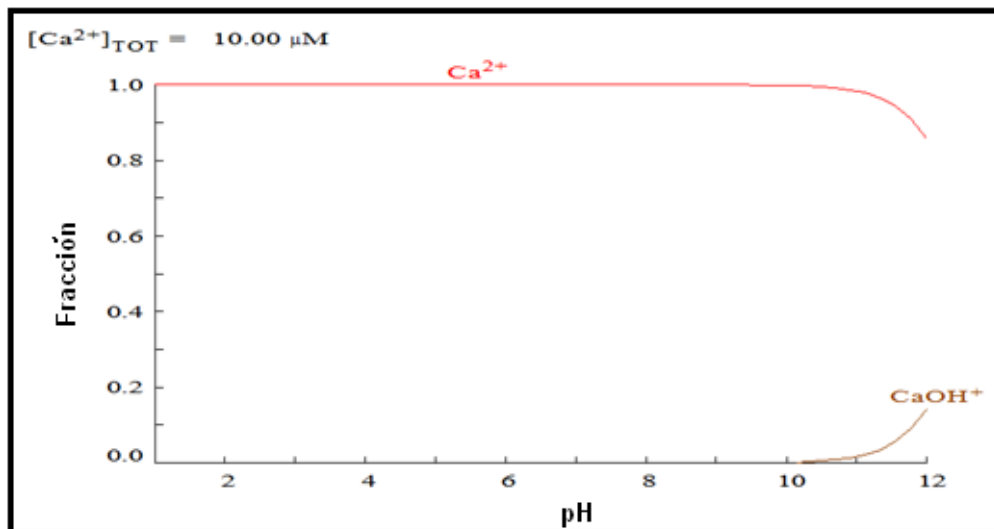


Figura 5. Diagrama de especiación para el calcio.

En la Figura 6 se aprecia el diagrama de especiación del aluminio como una función del pH, donde se muestra la muy amplia región de actividad sus diferentes iones en solución y la región de precipitación del hidróxido de aluminio de pH 4.2 a 9.5. Es muy importante mencionar que en el intervalo de pH de 4 a 5 aproximadamente, coexisten la mayoría de las especies del aluminio en solución, incluyendo el precipitado de hidróxido de aluminio y excluyendo a la especie Al(OH)_4^- , la cual se encuentra en el intervalo de pH de 7 a 12.

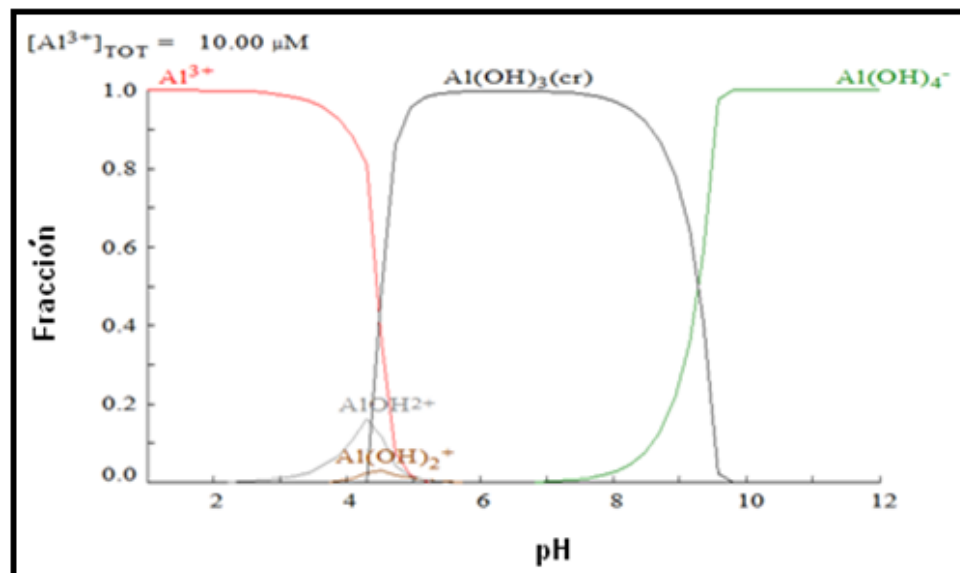


Figura 6. Diagrama de especiación para el aluminio.

En la Figura 7 se aprecia el diagrama de especiación para el hierro, como una función del pH, donde se muestra una baja región de actividad de sus diferentes iones en solución (pH de 0 a 3) y la región de precipitación del óxido férrico de pH 1.5 hasta 12.

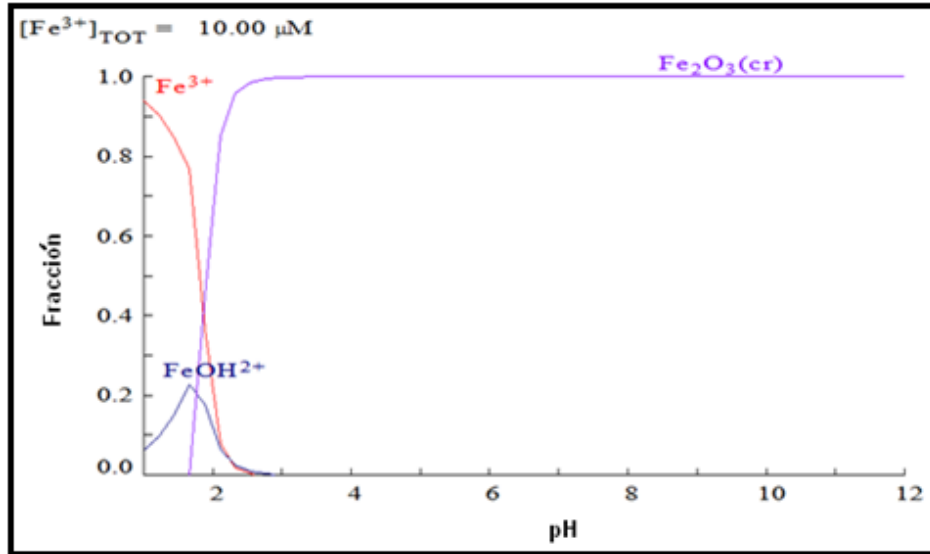


Figura 7. Diagrama de especiación para el hierro.

Del mismo modo fueron efectuados análisis de Pareto para conocer los efectos estandarizados de cada variable sobre los resultados de las prueba de jarras. Con esto se puede soportar la elección de la mejor pareja de coagulante-floculante y se podrán conocer así las variables de mayor influencia en el sistema. La Figura 8 muestra la gráfica de Pareto de efectos estandarizados para la pareja de coagulante-floculante de CaO- NALCO 9907:

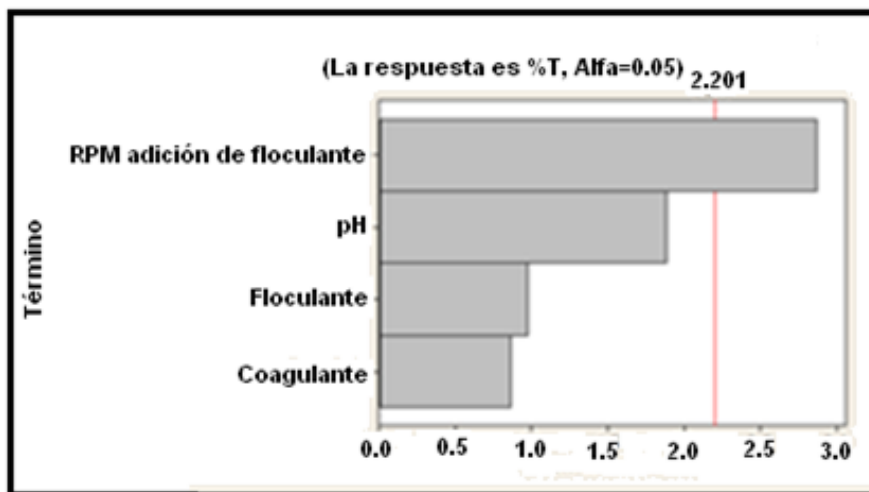


Figura 8. Pareto de los efectos estandarizados para la pareja CaO- NALCO 9907.

En la Figura 8 se muestra que la única variable que realmente tiene una marcada influencia sobre el desempeño de la prueba de jarras para la pareja CaO- NALCO 9907, es la velocidad de agitación durante la adición del floculante. Esto significa que aún y cuando el coagulante tiene especies activas importantes en solución, estas tienen una baja influencia en el pH utilizado en esta prueba de jarras (Figura 5). Del mismo modo la velocidad en la que se integra el floculante utilizado en esta prueba de jarras tiene una mayor influencia que el resto de las variables tomadas en cuenta (pH, concentración de floculante y concentración de coagulante). La Figura 9 muestra la gráfica de Pareto de efectos estandarizados para la pareja de coagulante-floculante de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ – NALCO 9907:

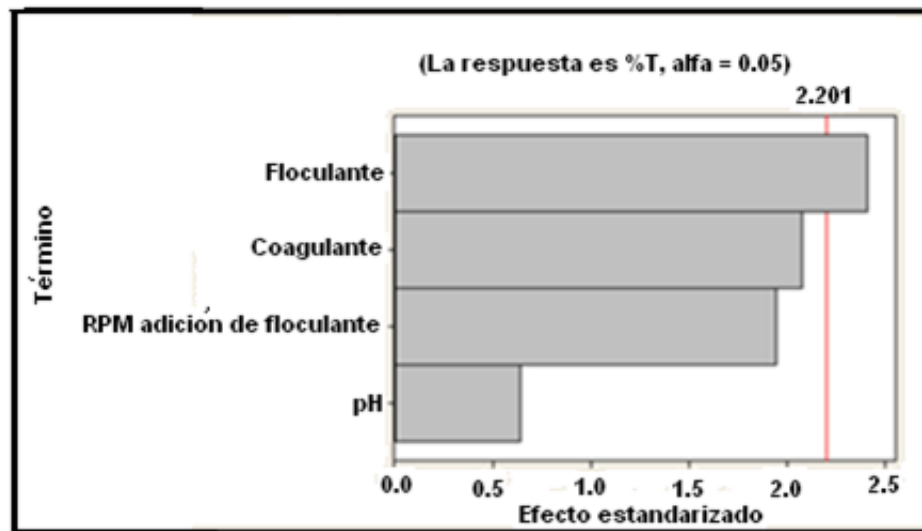


Figura 9. Pareto de los efectos estandarizados para la pareja $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ – NALCO 9907.

La Figura 9 muestra que la única variable que realmente tiene una influencia en los resultados de la prueba de jarras para la pareja $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ – NALCO 9907, es la concentración de floculante.

Esto quiere decir que aparte de que el coagulante utilizado tiene especies activas importantes en solución, las cuales han mostrado una influencia marcada en el pH usado en esta prueba de jarras (Figura 6), la concentración del floculante utilizado tiene una influencia dominante sobre el resto de las variables tomadas en cuenta (concentración de coagulante, velocidad de agitación durante la adición del floculante y el pH). La Figura 10 muestra la gráfica de Pareto de efectos estandarizados para la pareja de coagulante-floculante de FeCl_3 – NALCO 9907:

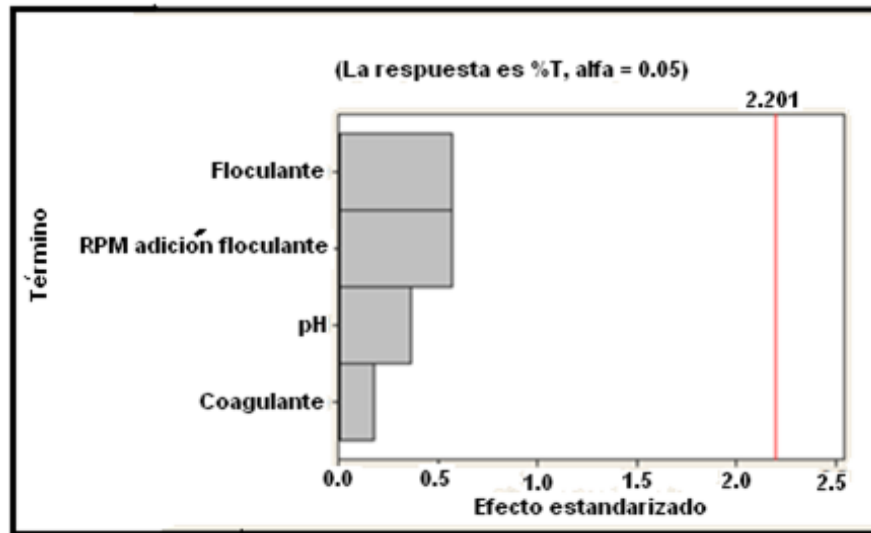


Figura 10. Pareto de los efectos estandarizados para la pareja FeCl_3 – NALCO 9907.

La Figura 10 muestra que ninguna variable tiene influencia en los resultados de la prueba de jarras para la pareja de FeCl_3 – NALCO 9907. Esto es debido a que aún y cuando el coagulante tiene especies activas importantes en solución, estas no tienen ninguna influencia en el pH usado en esta prueba de jarras (Figura 7).

La Figura 11 muestra la gráfica de Pareto de efectos estandarizados para la pareja de coagulante-floculante de CaO - NALCO 3249:

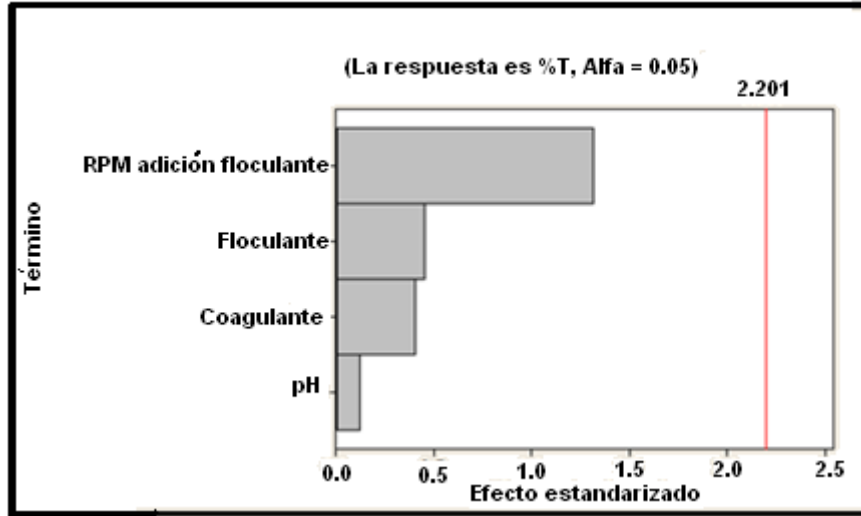


Figura 11. Pareto de los efectos estandarizados para la pareja CaO- NALCO 3249.

En la Figura 11 se muestra que ninguna variable tiene influencia en los resultados de la prueba de jarras para la pareja de CaO- NALCO 3249. Esto quiere decir que aún y cuando el coagulante tiene especies activas importantes en solución, estas no tienen ninguna influencia en el pH usado en esta prueba de jarras (Figura 5). Por esta razón ninguna variable mostrada en del Pareto muestra algún influencia significativa.

La Figura 12 muestra la gráfica de Pareto de efectos estandarizados para la pareja de coagulante-floculante de $Al_2(SO_4)_3$ – NALCO 3249:

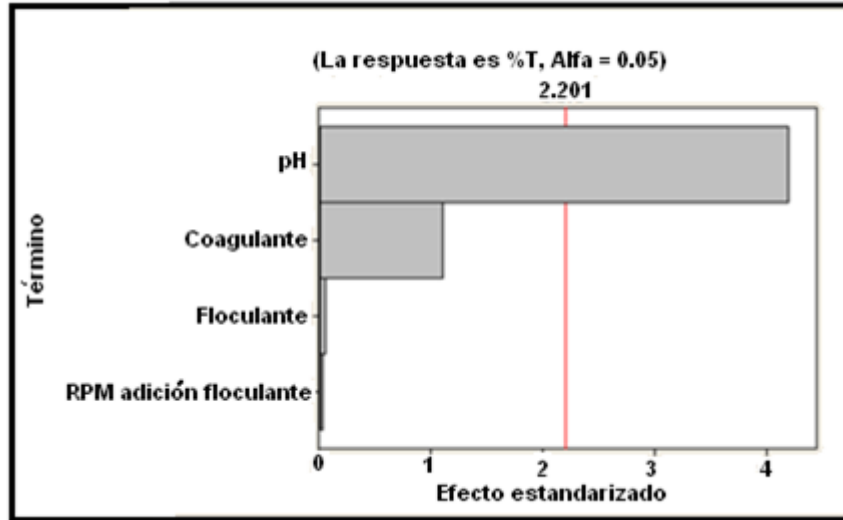


Figura 12. Pareto de los efectos estandarizados para la pareja $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ – NALCO 3249.

En la Figura 12 se muestra que la única variable que realmente tiene una influencia en los resultados de la prueba de jarras para la pareja $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ – NALCO 3249, es el pH y el resto de las variables no muestran influencia. Esto es debido a que aún y cuando el coagulante tiene especies activas importantes en solución, y tienen una influencia significativa en el pH usado en esta prueba de jarras (Figura 6), el uso de un floculante aniónico (para intervalos de pH de 7 a 12) afecta el desempeño de esta prueba de jarras.

La Figura 13 muestra la gráfica de Pareto de efectos estandarizados para la pareja de coagulante-floculante de FeCl_3 – NALCO 3249:

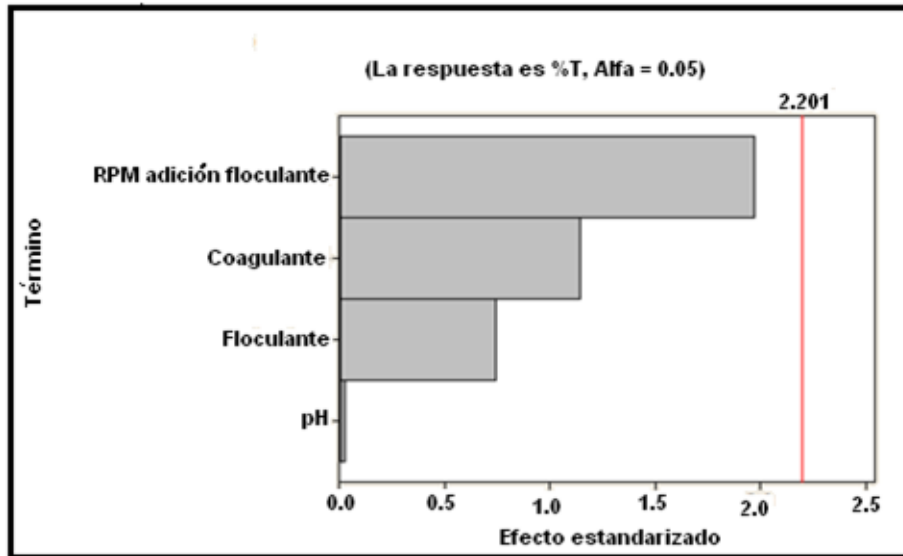


Figura 13. Pareto de los efectos estandarizados para la pareja FeCl_3 – NALCO 3249.

En la Figura 13 se muestra que ninguna de las variables analizadas alcanza a tener alguna influencia significativa sobre los resultados de esa prueba de jarras para la pareja FeCl_3 – NALCO 3249. Esto quiere decir que aún y cuando el coagulante tiene especies activas importantes en solución, estas no tienen ninguna influencia en el pH usado en esta prueba de jarras (Figura 7), sin tomar en cuenta que el floculante aniónico utilizado no es el adecuado para el pH de trabajo.

Algunas de las corridas de la prueba de jarras mostrada en la Tabla 15, con la mejor pareja de coagulante-floculante $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ – NALCO 9907, fueron verificadas utilizando el programa computacional de análisis de superficie de respuesta (ASR).

La Figura 14, muestra el ASR para la corrida número 1 de la Tabla 15, con las condiciones de operación de 1.0 mL de coagulante, 100 s^{-1} de velocidad de agitación, 1.0 mL de floculante y pH inicial de 10, con lo que se obtuvo una transmitancia de 99.34%. Esta Figura muestra una gran área de estabilidad en nivel de transmitancia, pero por debajo de 100%. También se puede visualizar, que al incrementar la cantidad de coagulante y la velocidad de agitación, la transmitancia disminuye drásticamente.

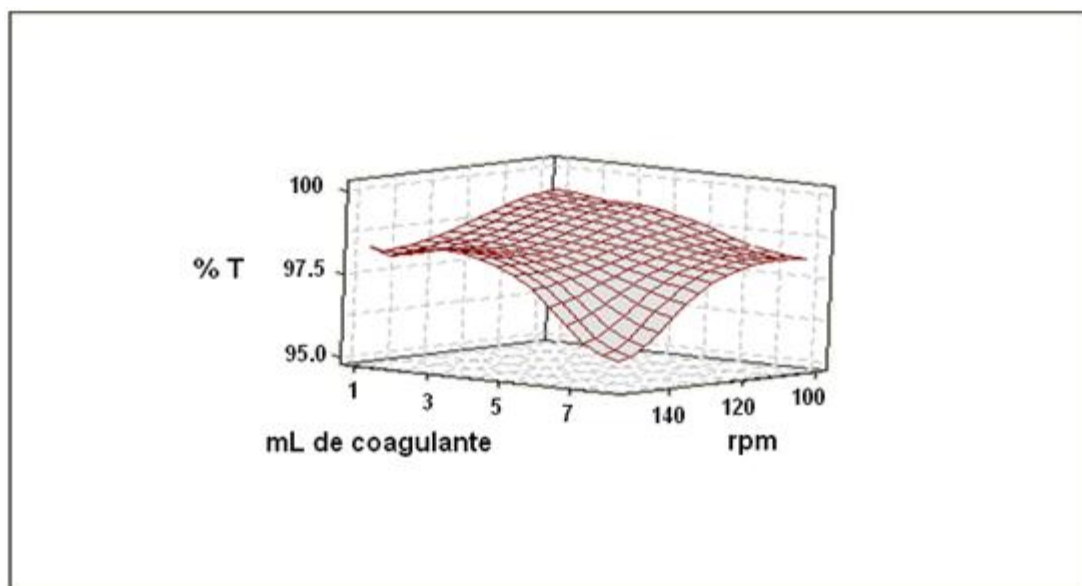


Figura 14. ASR para la corrida 1 de prueba de jarras $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ – NALCO 9907 (1.0 mL de coagulante y velocidad de agitación de 100 s^{-1} para obtener una transmitancia del 99.34%).

La Figura 15, muestra el ASR para la corrida número 5 de la Tabla 15, con las condiciones de operación de 1.0 mL de coagulante, 150 s^{-1} de velocidad de agitación, 4.0 mL de floculante y pH inicial de 10, con lo que se obtuvo una transmitancia de 98.00%. Esta Figura muestra una gran área de estabilidad en nivel de transmitancia, pero por debajo de 100%. También se puede visualizar que al aumentar el pH y la cantidad de coagulante la transmitancia disminuye drásticamente.

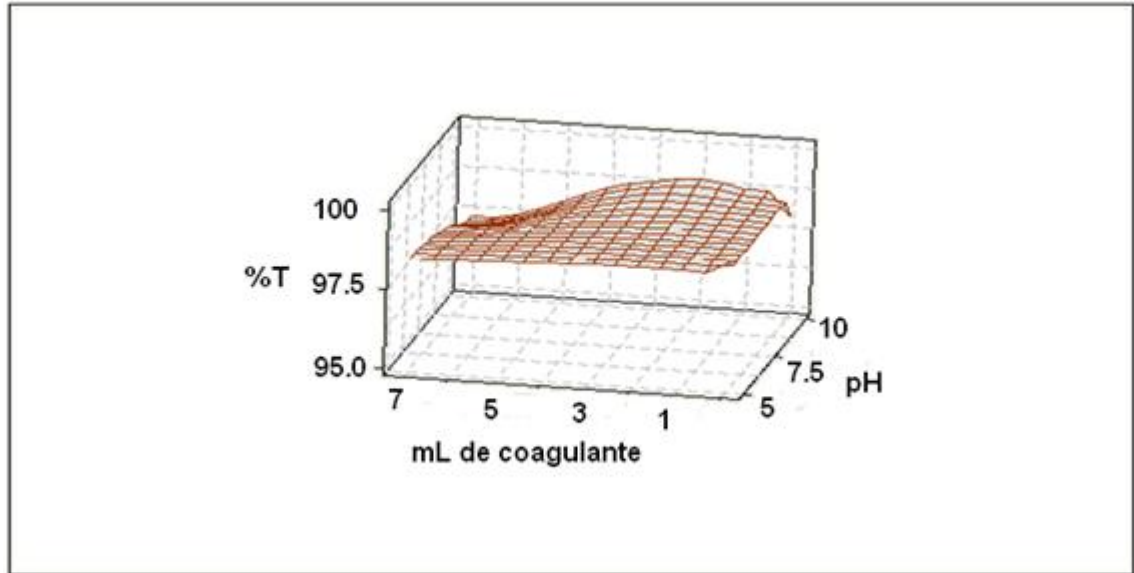


Figura 15. ASR para la corrida 5 de prueba de jarras $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ – NALCO 9907 (1.0 mL de coagulante y un pH de 10 para obtener una transmitancia del 98.00%).

La Figura 16, muestra el ASR para la corrida número 6 de la Tabla 15, con las condiciones de operación de 1.0 mL de coagulante, 100 s^{-1} de velocidad de agitación, 4.0 mL de floculante y pH inicial de 10, con lo que se obtuvo una transmitancia de 99.06%. Esta Figura muestra una gran área de estabilidad en nivel de transmitancia, pero por debajo de 100%.

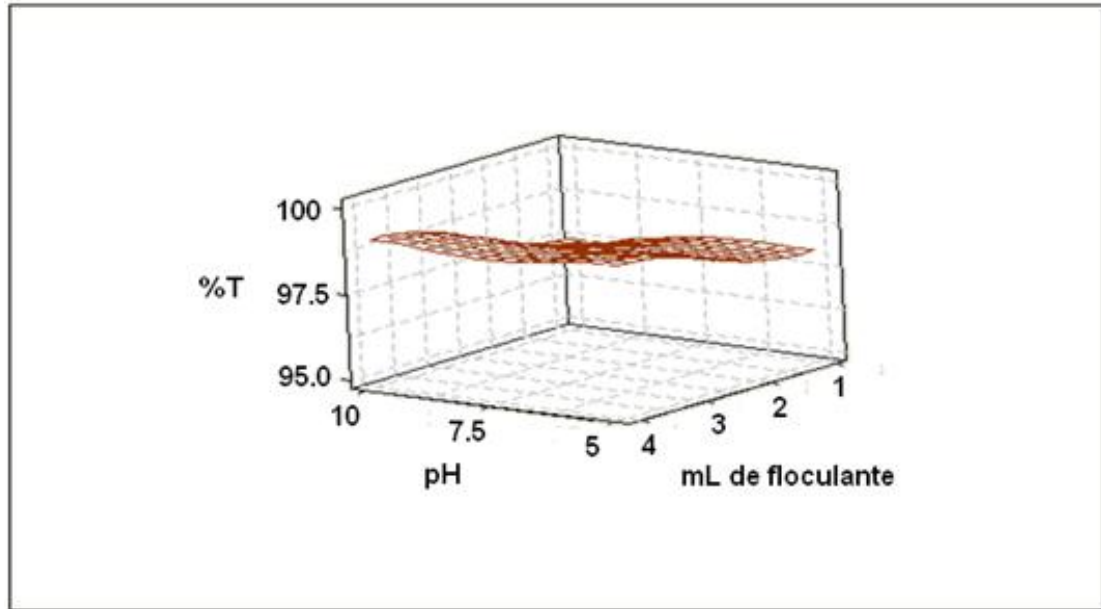


Figura 16. ASR para la corrida 6 de prueba de jarras $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ – NALCO 9907 (4.0 mL de floculante y un pH de 10 para obtener una transmitancia del 99.06%).

La Figura 17, muestra el ASR para la corrida número 15 de la Tabla 15, con las condiciones de operación de 6.5 mL de coagulante, 100 s^{-1} de velocidad de agitación, 4.0 mL de floculante y pH inicial de 5, con lo que se obtuvo una transmitancia de 99.68%. Esta Figura muestra que al incrementar la cantidad de floculante y disminuir la velocidad de agitación, la transmitancia aumenta rápidamente.. También se puede visualizar que a medida que aumenta la velocidad de agitación la transmitancia disminuye independientemente de la cantidad de floculante.

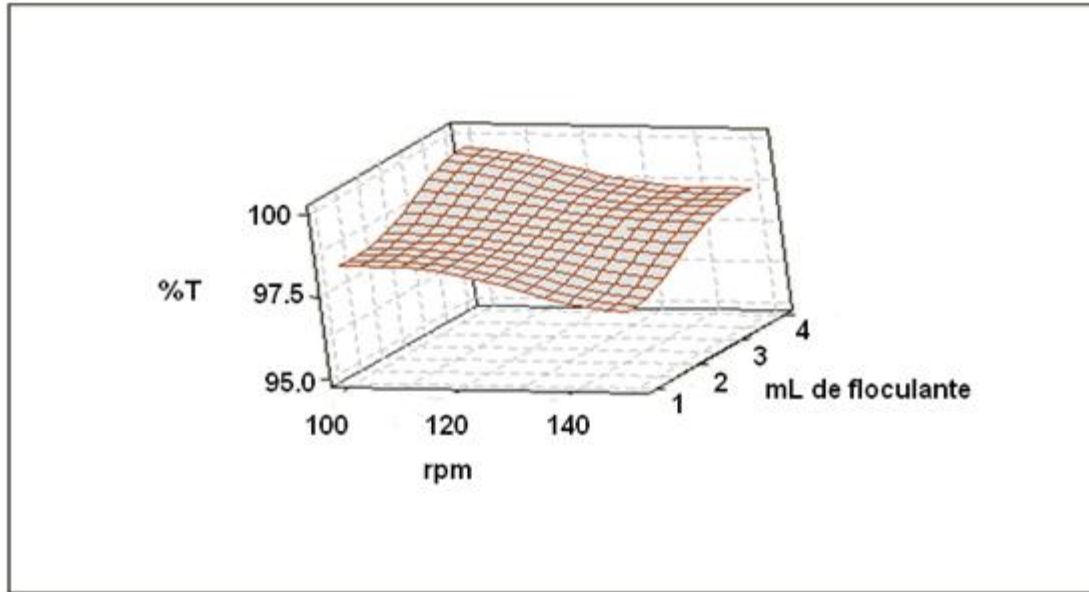


Figura 17. ASR para la corrida 15 de prueba de jarras $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ – NALCO 9907 (4.0 mL de coagulante y velocidad de agitación de 100 s^{-1} para obtener una transmitancia del 99.68%).

La Figura 18, muestra el ASR para la corrida número 16 de la Tabla 15, con las condiciones de operación de 1.0 mL de coagulante, 100 s^{-1} de velocidad de agitación, 4.0 mL de floculante y pH inicial de 5, con lo que se obtuvo una transmitancia de 100%. Estas fueron las mejores condiciones de operación obtenidas en el equipo para pruebas de jarras. La Figura muestra que la transmitancia tiene un máximo del 100% con 4.0 mL de floculante y 1.0 mL de coagulante. El área restante de esta grafica de ASR muestra gran estabilidad a un 99% de transmitancia, pero muestra un descenso marcado al disminuir la cantidad de floculante (esto debido a la gran influencia del floculante en este proceso indicado en el Pareto de la Figura 9).

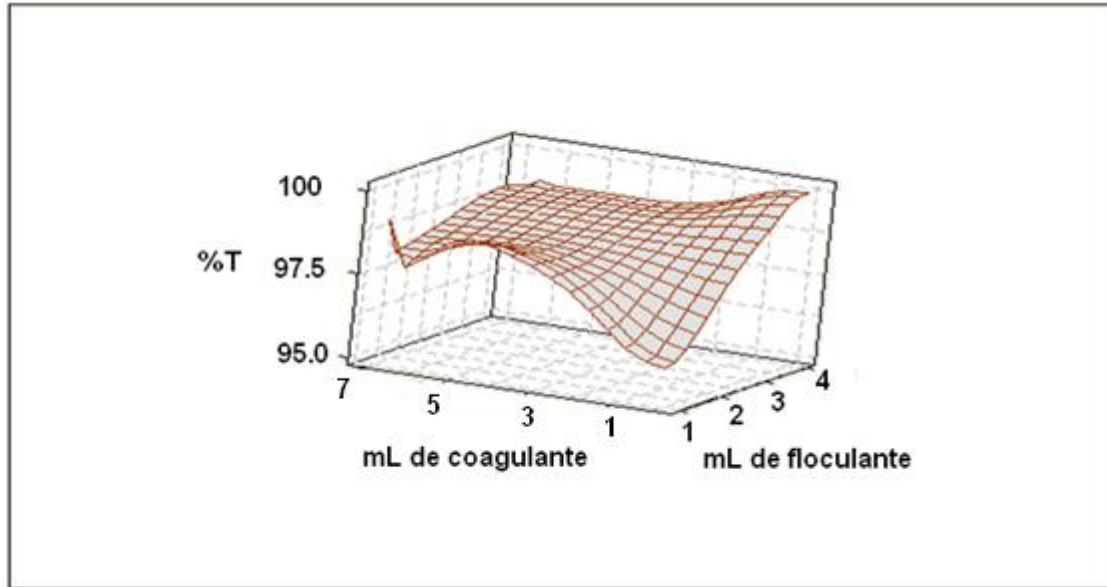


Figura 18. ASR para la corrida 16 de prueba de jarras $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ – NALCO 9907 (1.0 mL de coagulante y velocidad de agitación de 100 s^{-1} para obtener una transmitancia del 100%).

3.2.2 Tanque sedimentador

El principal resultado obtenido en este proceso es el efectuado en la columna de sedimentación a nivel laboratorio. Las pruebas de columna determinaron que para un volumen de 908 L, una altura de columna de 3.30 m y un tiempo de detención de 1.0 h en el tanque sedimentador, se lograría una remoción experimental del 85.41% en sólidos suspendidos. Las condiciones de operación fueron las mismas a las utilizadas en la prueba de jarras que tuvo los menores valores de turbidez (UNT). Esto debido a que prácticamente la prueba de sedimentación en columna a nivel laboratorio, integra la operación del reactor coagulador y del tanque sedimentador en un solo equipo, en una prueba por lotes en la columna.

A continuación se presentan en la Tabla 21 los datos obtenidos en las pruebas experimentales de sedimentación en columna, y en la Figura 19 se muestran las curvas de isoporcentajes construidas con los mismos datos experimentales obtenidos:

TABLA 21

PRUEBAS DE SEDIMENTACION EN COLUMNA

Profundidad (cm)		Sólidos recuperados en cada puerto de la columna de sedimentación (g)*					
		20	70	120	170	220	270
T i e m p o (minutos)	0	0.030					
	7	0.023	0.024	0.025	0.026	0.027	0.027
	14	0.016	0.017	0.020	0.022	0.023	0.023
	21	0.008	0.011	0.015	0.018	0.020	0.020
	28	0.000	0.003	0.010	0.014	0.016	0.017
	35		0.000	0.000	0.011	0.013	0.014
	42				0.007	0.011	0.012
	49				0.003	0.009	0.010
	56				0.000	0.007	0.009
	63					0.006	0.007
70					0.004	0.006	
77					0.002	0.004	
84					0.001	0.002	
91					0.000	0.001	
98						0.000	

* Sólidos remanentes en cada una de las muestras (no lograron sedimentarse).

De acuerdo a la información obtenida en la Tabla 21 anterior, las curvas de isoporcentajes de remoción fueron calculadas de la siguiente manera:

- a. La cantidad total de sólidos removidos en el experimento fue calculada como la suma de todas las remociones de sólidos a todas las profundidades y tiempos.
- b. A cada profundidad y tiempo las cantidades de sólidos removidos fueron convertidas a porcentajes, dividiéndolas entre la cantidad total removida y calculada en el inciso anterior. Estas cantidades sirvieron para elaborar las curvas de isoporcentajes en la Figura 19.
- c. Se determina el tiempo crítico de sedimentación (tiempo necesario para alcanzar un tiempo de remoción dado, minutos) el cual fue considerado como el tiempo de detención, mediante la siguiente ecuación 4. Este tiempo fue de 60 minutos.
- d. El porcentaje de remoción alcanzado a los 3.3 m de profundidad se determina al interpolar entre las curvas correspondientes a 80 y 90 %, obteniendo un porcentaje de remoción para el tiempo de sedimentación calculado (60 minutos) dado por la línea punteada en la Figura 19.
- e. Se determina el porcentaje total de remoción usando la ecuación 5. Esto se logra trazando una línea vertical desde 80% a una profundidad de 3.3 m, hasta el eje cero y se determinan los valores apropiados de Δh para los diferentes porcentajes de remoción:

$$\Delta h_1 = 2.112 \text{ m}, \Delta h_2 = 0.2419 \text{ m}, \Delta h_3 = 0.6296 \text{ m}, \Delta h_4 = 0.2069 \text{ m}$$

$$(\Delta h_1/H) (\Delta h_n / H)(R_n + R_{n+1}) = [(90+100)/2](0.64) = 60.80$$

$$(\Delta h_2/H) (\Delta h_n / H)(R_n + R_{n+1}) = [(80+90)/2](0.0733) = 6.23$$

$$(\Delta h_3/H) (\Delta h_n / H)(R_n + R_{n+1}) = [(70+80)/2](0.1908) = 14.31$$

$$(\Delta h_4/H) (\Delta h_n H)(R_n + R_{n+1}) = [(60+70)/2](0.0627) = 4.07$$

Por lo tanto, $R(\%) = 85.41\%$

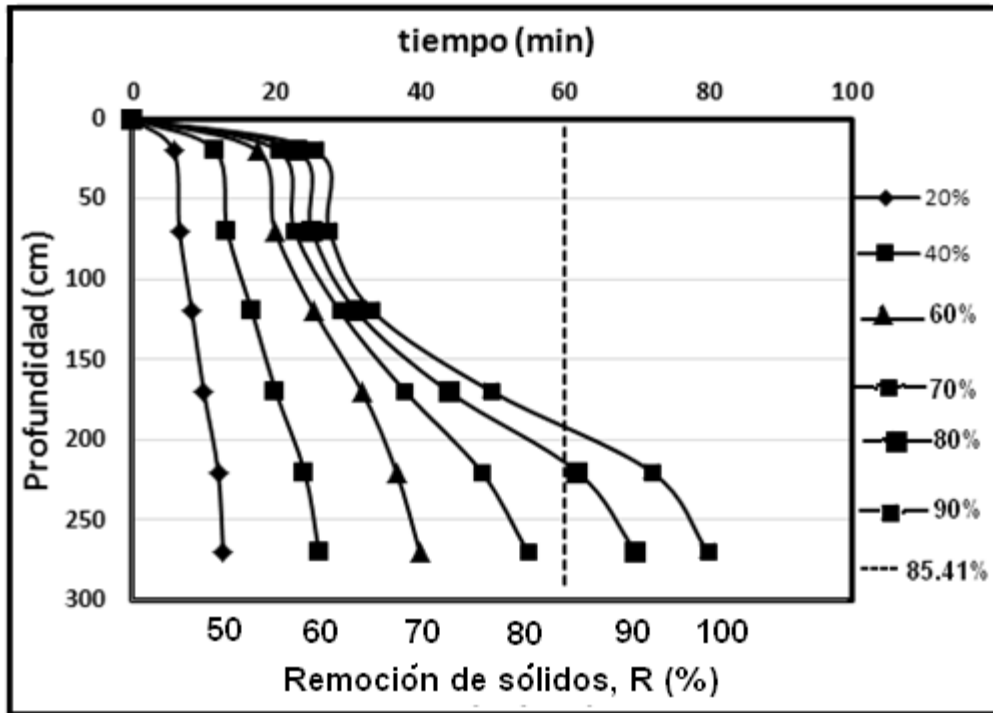


Figura 19. Curvas de isoporcentaje de sedimentación en columna

3.2.3 Membrana de ósmosis inversa (MOI)

De acuerdo a la Tabla 4 (sección 2.2.2) fueron efectuadas 9 corridas experimentales y los datos de cada caso fueron colectados y graficados como una función del tiempo para cada una de las variables involucradas a la entrada y a la salida de MOI. Estas variables son: Concentración de SiO_2 , concentración de SDT y flujo permeado. Los datos experimentales que fueron obtenidos cada hora durante seis días consecutivos de operación para los 9 casos en la planta piloto, se muestran en el APÉNDICE A, Tablas I a la IX. Un análisis del agua antes de entrar al proceso de MOI no mostró presencia de sólidos suspendidos.

3.2.3.1 Caso 2: pH = 12 y concentración de agente anti-incrustante = 1.0 mg/L

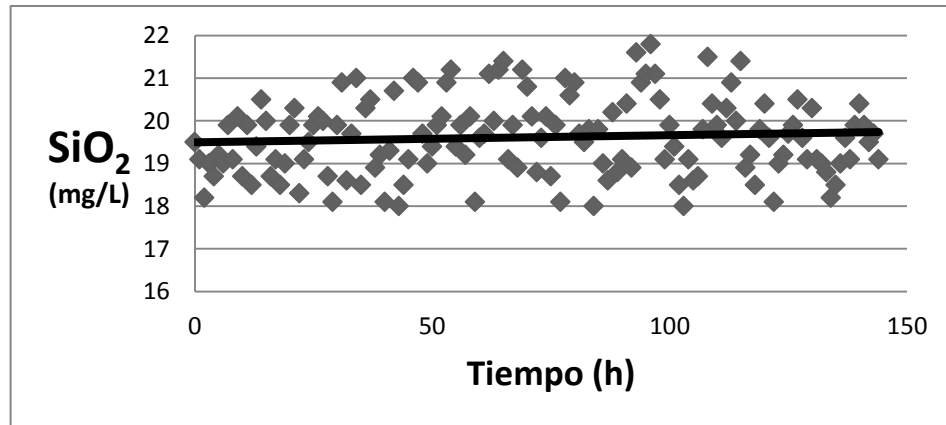


Figura 20. Variación en la concentración de SiO₂ a la entrada de MOI.

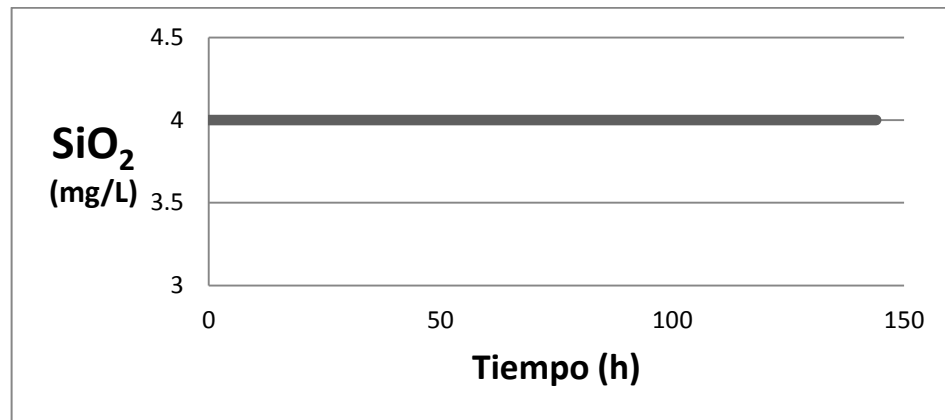


Figura 21. Variación en la concentración de SiO₂ a la salida de MOI.

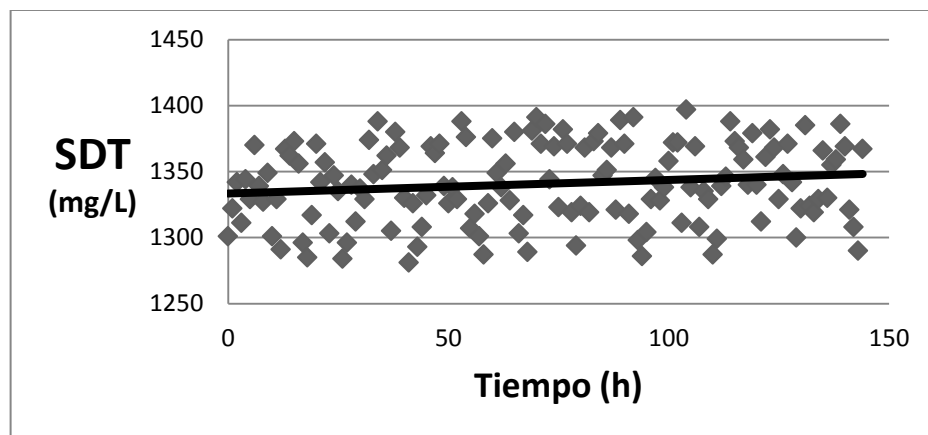


Figura 22. Variación en la concentración de SDT a la entrada de MOI.

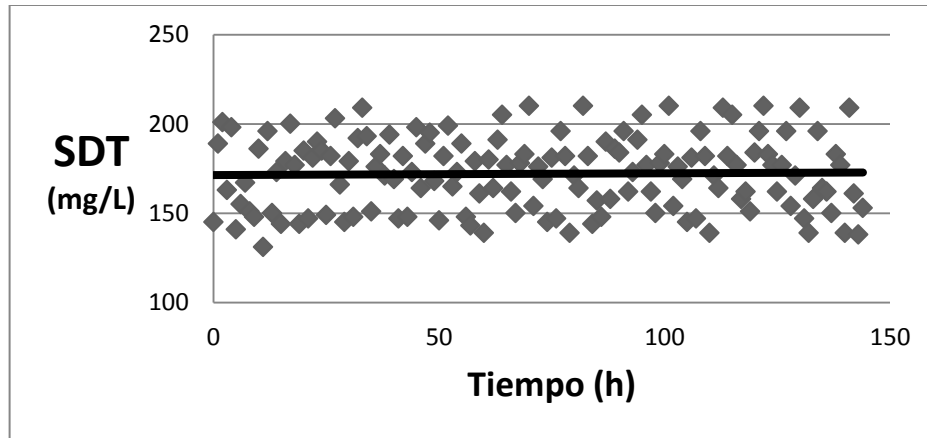


Figura 23. Variación en la concentración de SDT a la salida de MOI.

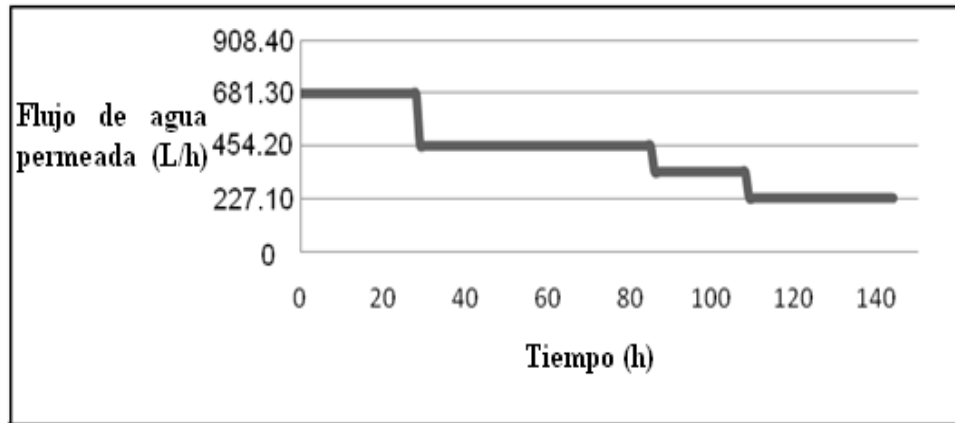


Figura 24. Flujo de agua permeada en MOI.

Como se muestra en la Figura 20, la concentración de SiO_2 a la entrada de MOI en el caso 1, se encuentra en el intervalo de 18 a 22 mg/L y es casi la misma para todas las corridas. La Figura 21, muestra la concentración de SiO_2 a la salida de MOI, la cual se muestra constante en 4.0 mg/L. La Figura 22, muestra la concentración de SDT a la entrada de MOI, la cual se encuentra en el intervalo de 1,280 a 1,400 mg/L y es casi la misma en todas las corridas. La Figura 23, muestra la concentración de SDT a la salida de MOI, la cual se encuentra en el intervalo de 130 a 210 mg/L. La Figura 24, muestra el flujo de agua permeada en MOI, la cual se encuentra en el intervalo de 227.10 a 681.30 L/h con un promedio de 397.43 L/h.

Es muy importante mencionar que las concentraciones de SiO_2 y SDT encontradas a la entrada de la membrana, indicaron que los procesos de coagulación, sedimentación y filtración que se encuentran corriente arriba del proceso de MOI no fueron 100% efectivos en la remoción de las mismas, lo cual sugirió la necesidad de utilizar un sistema MOI. Del mismo modo las concentraciones de SiO_2 y SDT a la salida de MOI confirmaron la necesidad del proceso MOI, así como un buen desempeño que mejoró dichas concentraciones. En el caso del valor de flujo permeado promedio obtenido en esta corrida, junto con los valores obtenidos en las concentraciones de SiO_2 y SDT a la salida de la membrana, fueron comparados entre las nueve corridas para determinar las mejores condiciones de operación en MOI (Tabla 22).

3.2.3.2 Caso 2: pH = 7 y concentración de agente anti-incrustante = 1.0 mg/L

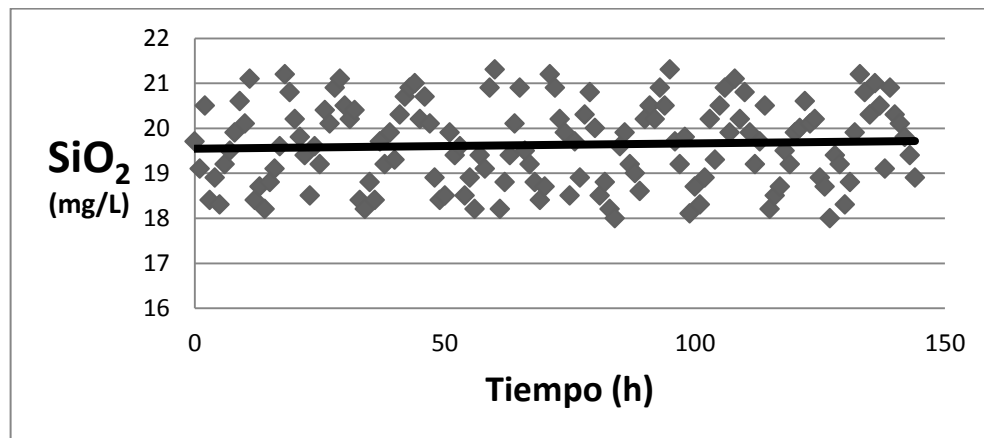


Figure 25. Variación de concentración de SiO_2 a la entrada de MOI.

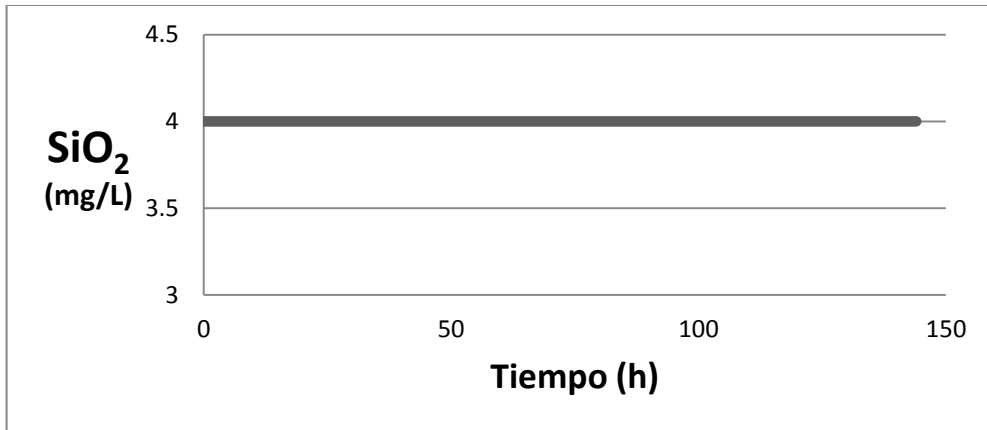


Figura 26. Variación de la concentración de SiO₂ a la salida de MOI.

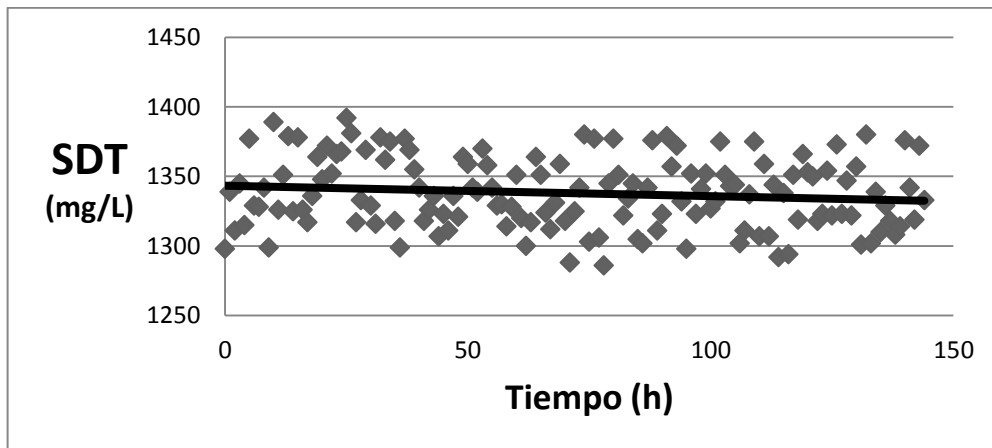


Figure 27. Variación de la concentración de SDT a la entrada de MOI.

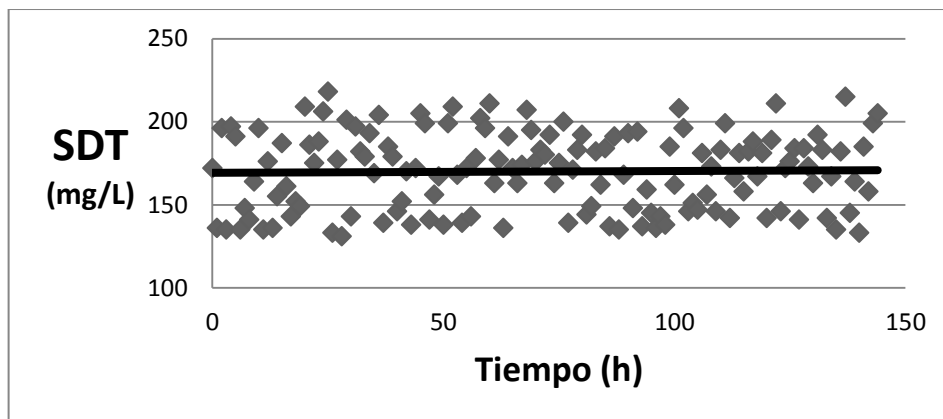


Figura 28. Variación de la concentración de SDT a la salida de MOI.

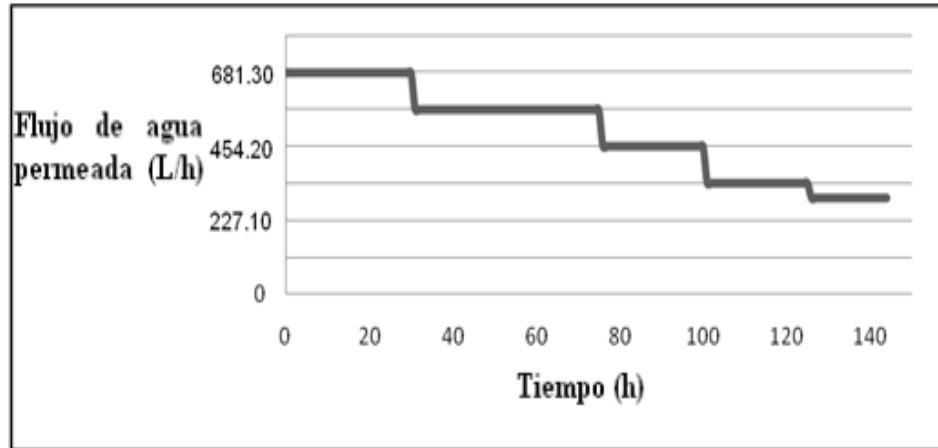


Figura 29. Flujo de agua permeada en MOI.

Como se muestra en la Figura 25, la concentración de SiO_2 a la entrada de MOI en el caso 2, se encuentra en el intervalo de 18 a 22 mg/L y es casi la misma para todas las corridas. La Figura 26, muestra la concentración de SiO_2 a la salida de MOI, la cual se muestra constante en 4.0 mg/L. La Figura 27, muestra la concentración de SDT a la entrada de MOI, la cual se encuentra en el intervalo de 1,280 a 1,400 mg/L y es casi la misma en todas las corridas. La Figura 28, muestra la concentración de SDT a la salida de MOI, la cual se encuentra en el intervalo de 130 a 220 mg/L. La Figura 29, muestra el flujo de agua permeada en MOI, la cual se encuentra en el intervalo de 295.23 a 681.30 L/h con un promedio de 483.72 L/h.

Al igual que el caso anterior, es muy importante mencionar que las concentraciones de SiO_2 y SDT encontradas a la entrada de la membrana, indicaron que los procesos de coagulación, sedimentación y filtración que se encuentran corriente arriba del proceso de MOI no fueron 100% efectivos en la remoción de las mismas, lo cual sugirió la necesidad de utilizar un sistema MOI. Del mismo modo las concentraciones de SiO_2 y SDT a la salida de MOI confirmaron la necesidad del proceso MOI, así como un buen desempeño que mejoró dichas concentraciones.

En el caso del valor de flujo permeado promedio obtenido en esta corrida, junto con los valores obtenidos en las concentraciones de SiO_2 y SDT a la salida de la membrana, fueron comparados entre las nueve corridas para determinar las mejores condiciones de operación en MOI (Tabla 22).

3.2.3.3 Caso 3: pH = 12 y concentración de agente anti-incrustante = 3.0 mg/L

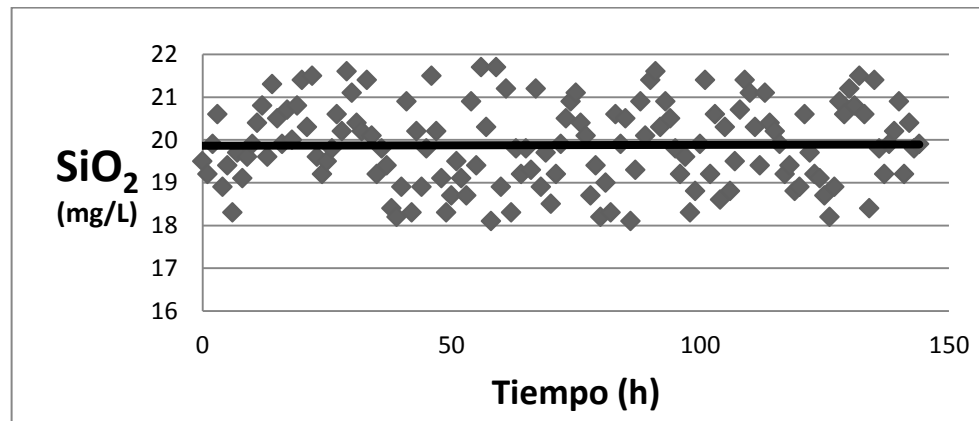


Figura 30. Variación de concentración de SiO_2 a la entrada de MOI.

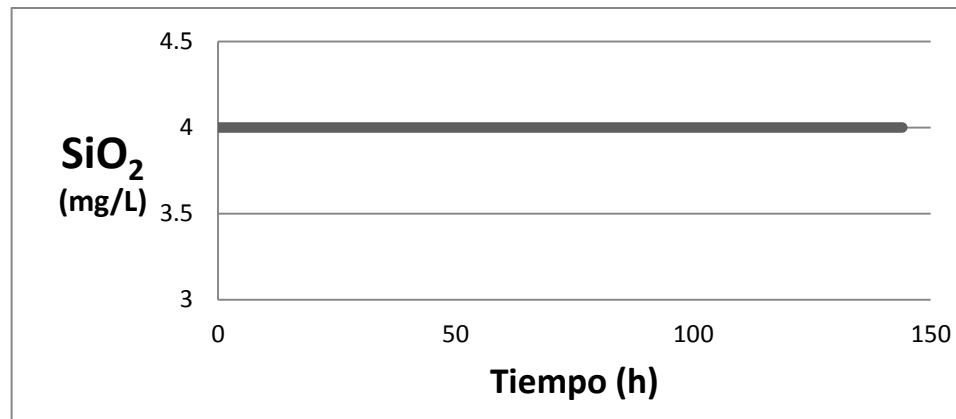


Figura 31. Variación de la concentración de SiO_2 a la salida de MOI.

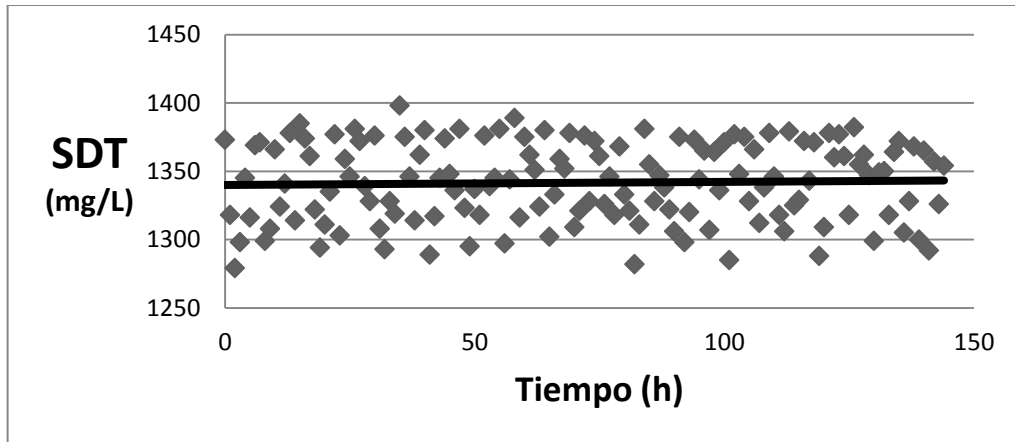


Figura 32. Variación de la concentración de SDT a la entrada de MOI.

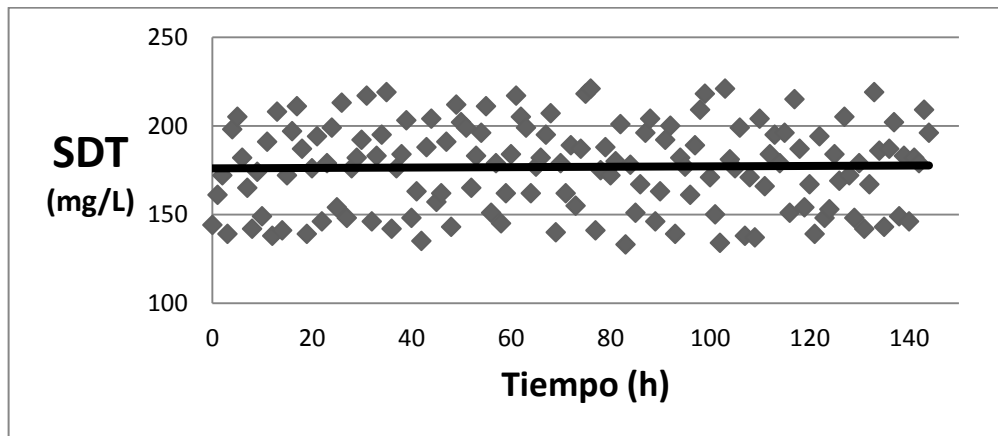


Figura 33. Variación de la concentración de SDT a la salida de MOI.

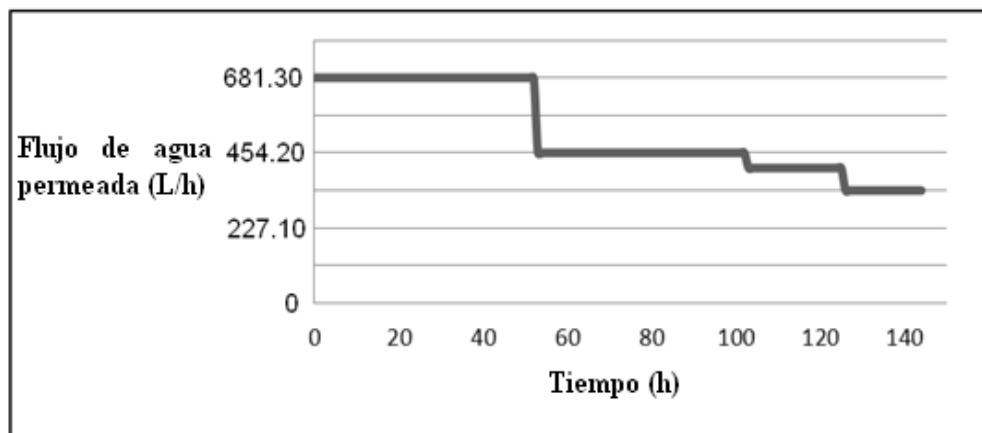


Figura 34. Flujo de agua permeada en MOI.

Como se muestra en la Figura 30, la concentración de SiO_2 a la entrada de MOI en el caso 3, se encuentra en el intervalo de 18 a 22 mg/L y es casi la misma para todas las corridas. La Figura 31, muestra la concentración de SiO_2 a la salida de MOI, la cual se muestra constante en 4.0 mg/L. La Figura 32, muestra la concentración de SDT a la entrada de MOI, la cual se encuentra en el intervalo de 1,280 a 1,400 mg/L y es casi la misma en todas las corridas. La Figura 33, muestra la concentración de SDT a la salida de MOI, la cual se encuentra en el intervalo de 130 a 225 mg/L. La Figura 34, muestra el flujo de agua permeada en MOI, la cual se encuentra en el intervalo de 340.65 a 681.30 L/h con un promedio de 501.89 L/h. Al igual que en las corridas anteriores, es muy importante mencionar que las concentraciones de SiO_2 y SDT encontradas a la entrada de la membrana, indicaron que los procesos de coagulación, sedimentación y filtración que se encuentran corriente arriba del proceso de MOI no fueron 100% efectivos en la remoción de las mismas, lo cual sugirió la necesidad de utilizar un sistema MOI. Del mismo modo las concentraciones de SiO_2 y SDT a la salida de MOI confirmaron la necesidad del proceso MOI, así como un buen desempeño que mejoró dichas concentraciones. En el caso del valor de flujo permeado promedio obtenido en esta corrida, junto con los valores obtenidos en las concentraciones de SiO_2 y SDT a la salida de la membrana, fueron comparados entre las nueve corridas para determinar las mejores condiciones de operación en MOI (Tabla 22).

3.2.3.4 Caso 4: pH = 7 y concentración de agente anti-incrustante = 3.0 mg/L

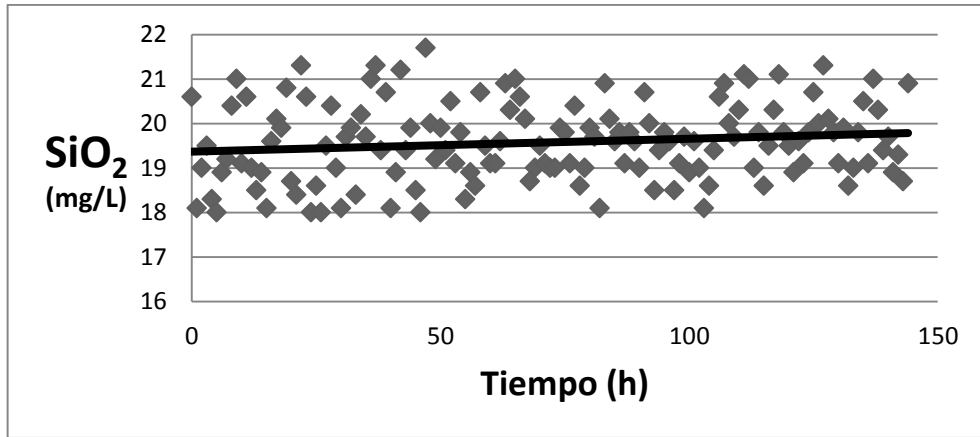


Figura 35. Variación de concentración de SiO₂ a la entrada de MOI.

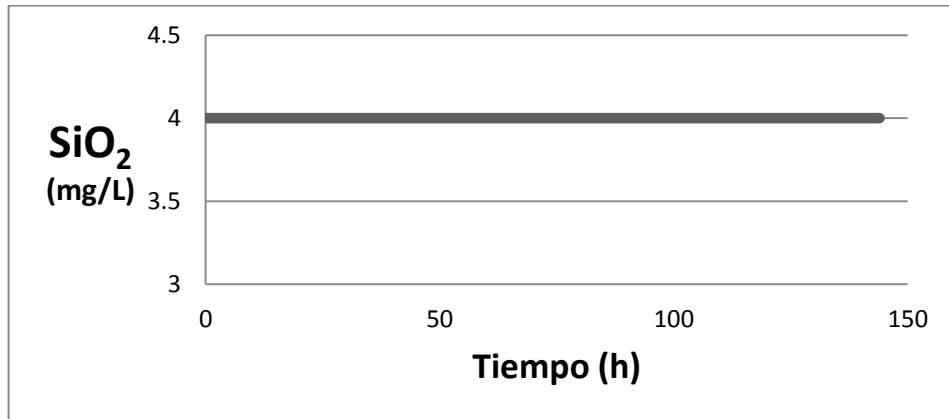


Figura 36. Variación de la concentración de SiO₂ a la salida de MOI.

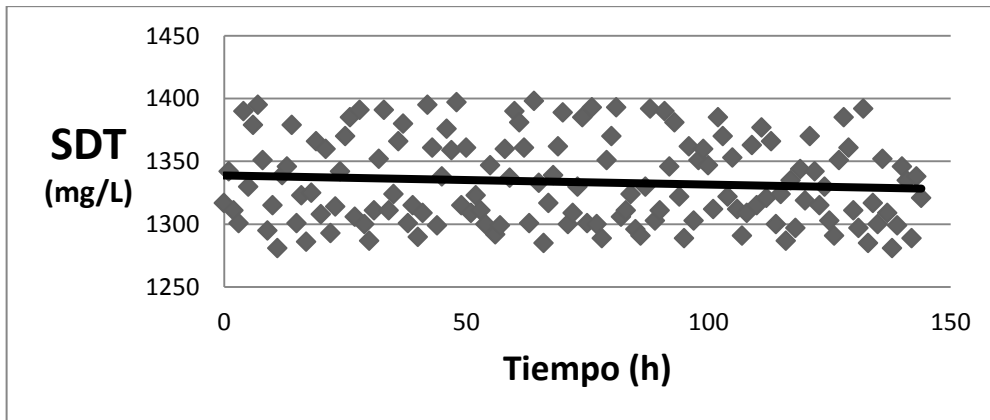


Figura 37. Variación de la concentración de SDT a la entrada de MOI.

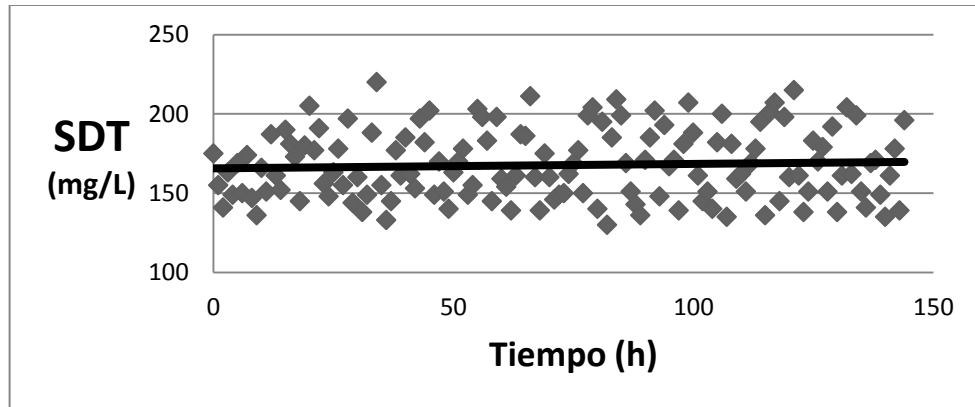


Figura 38. Variación de la concentración de SDT a la salida de MOI.

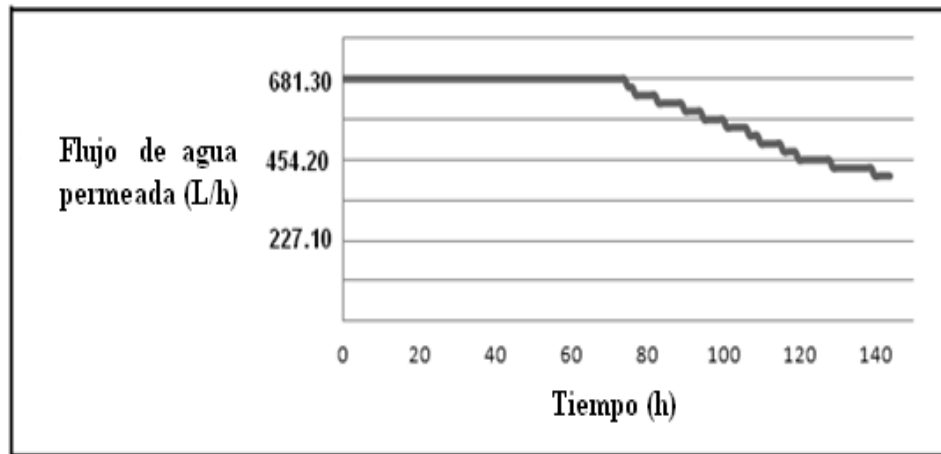


Figura 39. Flujo de agua permeada en MOI.

Como se muestra en la Figura 35, la concentración de SiO_2 a la entrada de MOI en el caso 4, se encuentra en el intervalo de 18 a 22 mg/L y es casi la misma para todas las corridas. La Figura 36, muestra la concentración de SiO_2 a la salida de MOI, la cual se muestra constante en 4.0 mg/L. La Figura 37, muestra la concentración de SDT a la entrada de MOI, la cual se encuentra en el intervalo de 1,280 a 1,400 mg/L y es casi la misma en todas las corridas. La Figura 38, muestra la concentración de SDT a la salida de MOI, la cual se encuentra en el intervalo de 130 a 220 mg/L. La Figura 39, muestra el flujo de agua permeada en MOI, la cual se encuentra en el intervalo de 408.78 a 681.30 L/h con un promedio de 579.11 L/h.

Al igual que en las corridas anteriores, es muy importante mencionar que las concentraciones de SiO_2 y SDT encontradas a la entrada de la membrana, indicaron que los procesos de coagulación, sedimentación y filtración que se encuentran corriente arriba del proceso de MOI no fueron 100% efectivos en la remoción de las mismas, lo cual sugirió la necesidad de utilizar un sistema MOI. Del mismo modo las concentraciones de SiO_2 y SDT a la salida de MOI confirmaron la necesidad del proceso MOI, así como un buen desempeño que mejoró dichas concentraciones. En el caso del valor de flujo permeado promedio obtenido en esta corrida, junto con los valores obtenidos en las concentraciones de SiO_2 y SDT a la salida de la membrana, fueron comparados entre las nueve corridas para determinar las mejores condiciones de operación en MOI (Tabla 22).

3.2.3.5 Caso 5: pH=4 y concentración de agente anti-incrustante= 1.0 mg/L

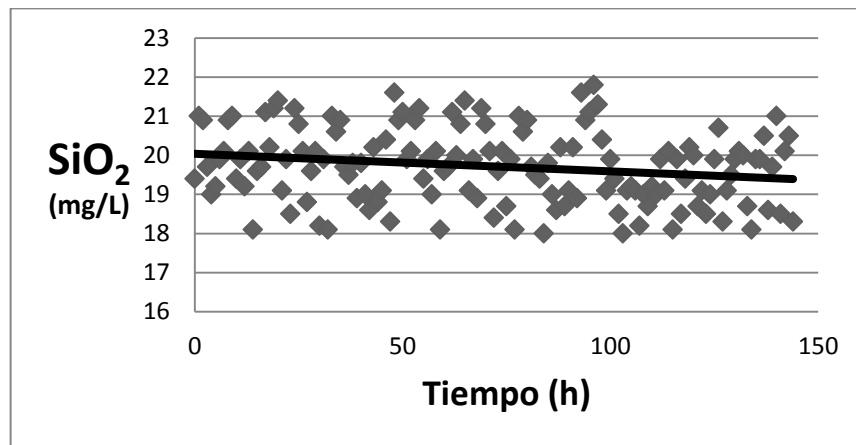


Figura 40. Variación de concentración de SiO_2 a la entrada de MOI.

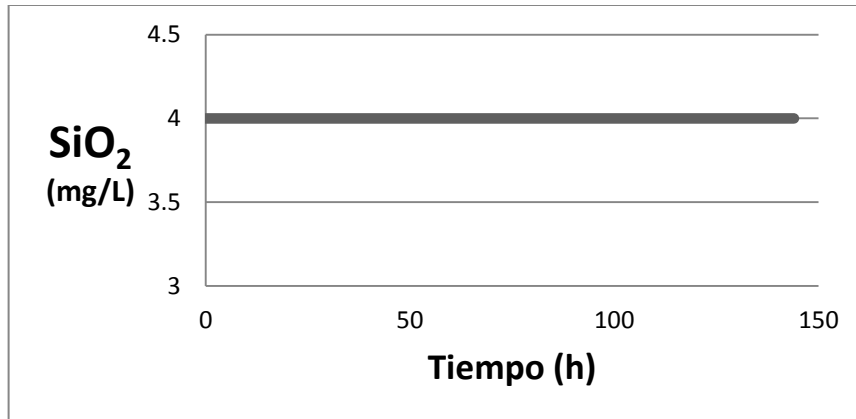


Figura 41. Variación de la concentración de SiO_2 a la salida de MOI.

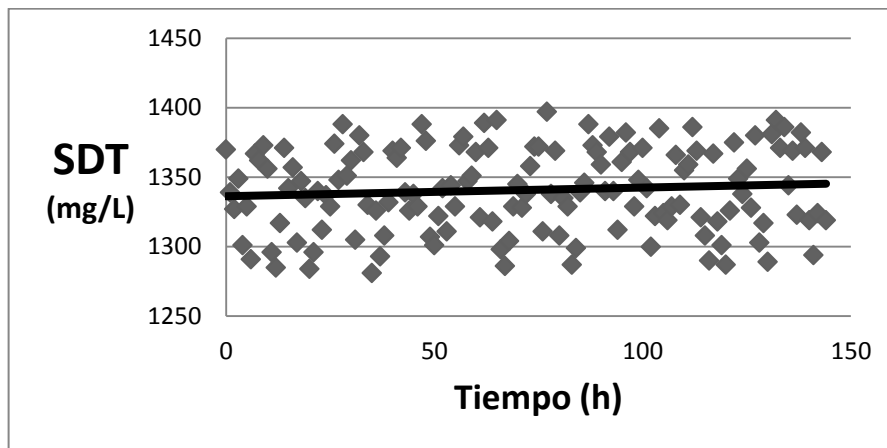


Figura 42. Variación de la concentración de SDT a la entrada de MOI.

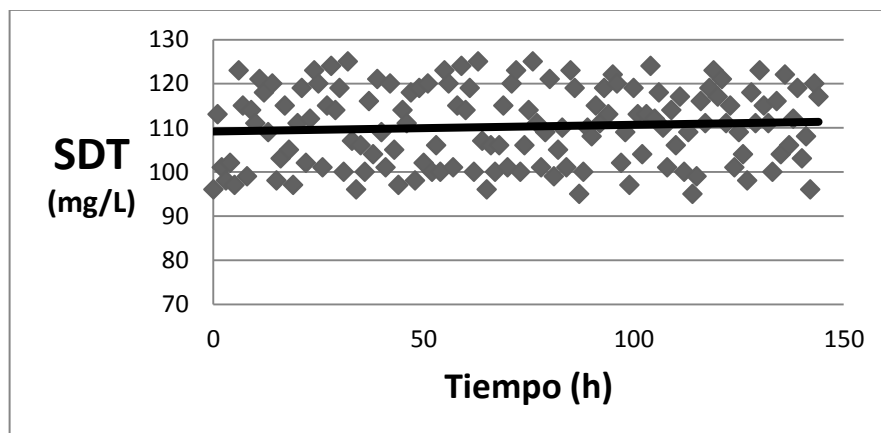


Figura 43. Variación de la concentración de SDT a la salida de MOI.

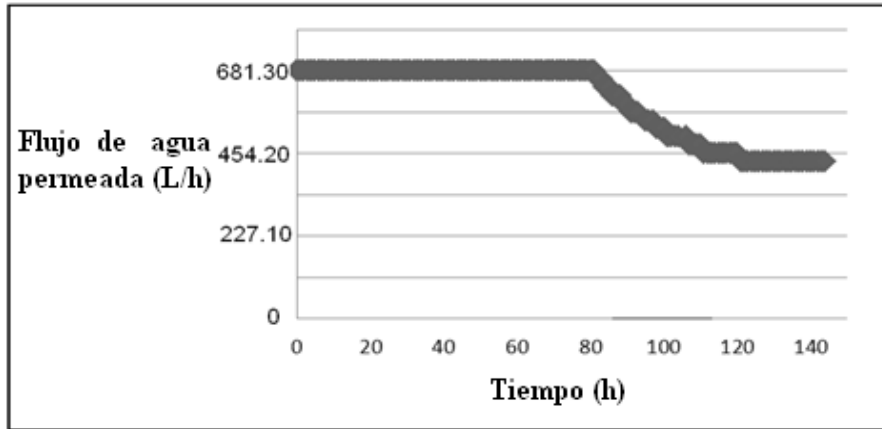


Figura 44. Flujo de agua permeada en MOI.

Como se muestra en la Figura 40, la concentración de SiO_2 a la entrada de MOI en el caso 5, se encuentra en el intervalo de 18 a 22 mg/L y es casi la misma para todas las corridas. La Figura 41, muestra la concentración de SiO_2 a la salida de MOI, la cual se muestra constante en 4.0 mg/L. La Figura 42, muestra la concentración de SDT a la entrada de MOI, la cual se encuentra en el intervalo de 1,280 a 1,400 mg/L y es casi la misma en todas las corridas. La Figura 43, muestra la concentración de SDT a la salida de MOI, la cual se encuentra en el intervalo de 95 a 125 mg/L. La Figura 44, muestra el flujo de agua permeada en MOI, la cual se encuentra en el intervalo de 420.14 a 681.30 L/h con un promedio de 595 L/h. Al igual que en las corridas anteriores, es muy importante mencionar que las concentraciones de SiO_2 y SDT encontradas a la entrada de la membrana, indicaron que los procesos de coagulación, sedimentación y filtración que se encuentran corriente arriba del proceso de MOI no fueron 100% efectivos en la remoción de las mismas, lo cual sugirió la necesidad de utilizar un sistema MOI. Del mismo modo las concentraciones de SiO_2 y SDT a la salida de MOI confirmaron la necesidad del proceso MOI, así como un buen desempeño que mejoró dichas concentraciones.

En el caso del valor de flujo permeado promedio obtenido en esta corrida, junto con los valores obtenidos en las concentraciones de SiO_2 y SDT a la salida de la membrana, fueron comparados entre las nueve corridas para determinar las mejores condiciones de operación en MOI (Tabla 22).

3.2.3.6 Caso 6: pH=4 y concentración de agente anti-incrustante= 3.0 mg/L

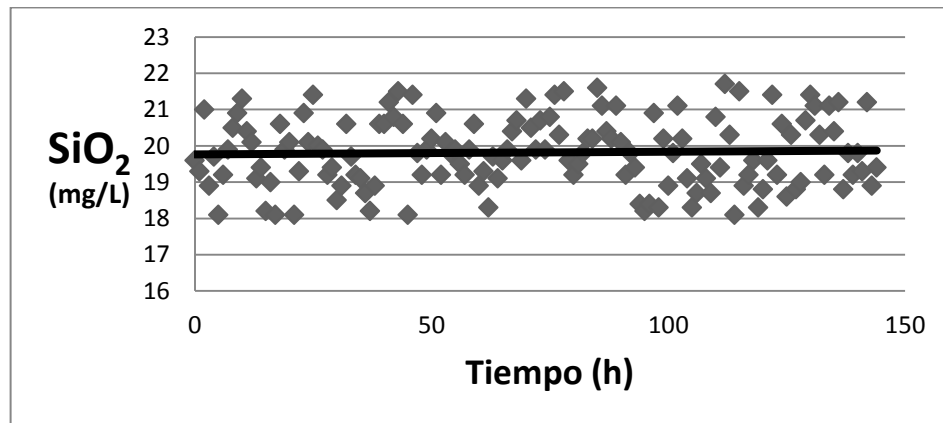


Figura 45. Variación de concentración de SiO_2 a la entrada de MOI.

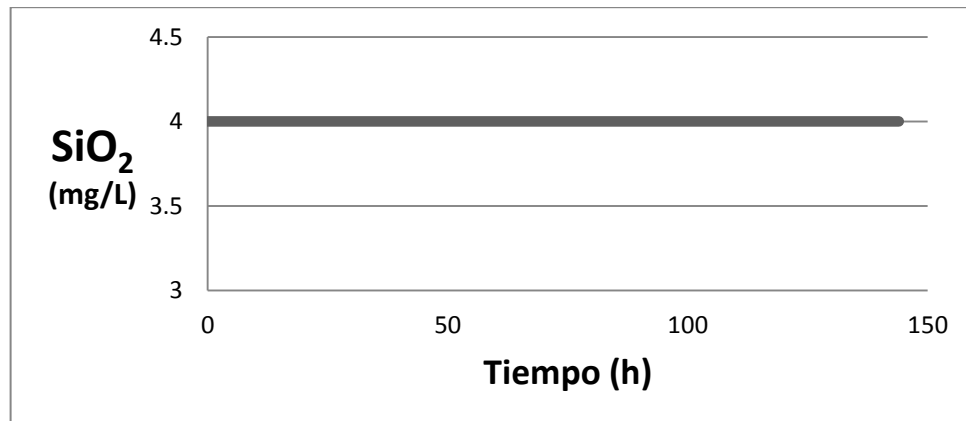


Figura 46. Variación de la concentración de SiO_2 a la salida de MOI.

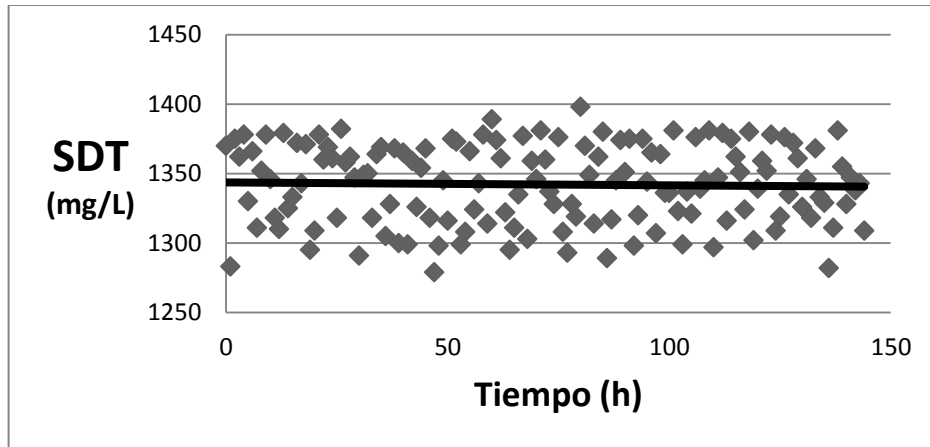


Figura 47. Variación de la concentración de SDT a la entrada de MOI.

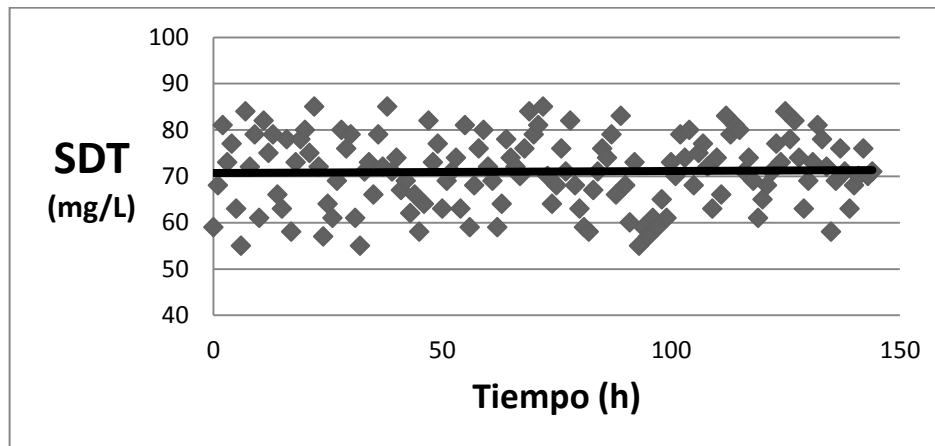


Figura 48. Variación de la concentración de SDT a la salida de MOI.

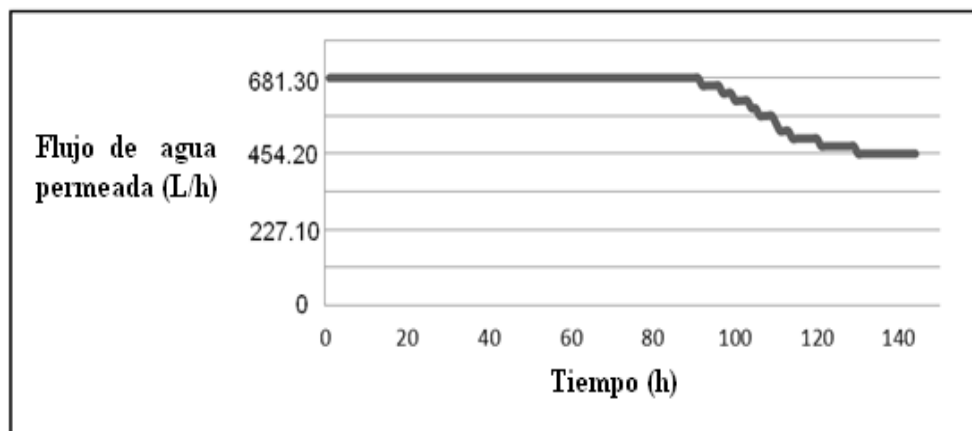


Figura 49. Flujo de agua permeada en MOI.

Como se muestra en la Figura 45, la concentración de SiO_2 a la entrada de MOI en el caso 6, se encuentra en el intervalo de 18 a 22 mg/L y es casi la misma para todas las corridas. La Figura 46, muestra la concentración de SiO_2 a la salida de MOI, la cual se muestra constante en 4.0 mg/L. La Figura 47, muestra la concentración de SDT a la entrada de MOI, la cual se encuentra en el intervalo de 1,280 a 1,400 mg/L y es casi la misma en todas las corridas. La Figura 48, muestra la concentración de SDT a la salida de MOI, la cual se encuentra en el intervalo de 55 a 85 mg/L. La Figura 49, muestra el flujo de agua permeada en MOI, la cual se encuentra en el intervalo de 454.20 a 681.30 L/h con un promedio de 626.80 L/h. Al igual que en las corridas anteriores, es muy importante mencionar que las concentraciones de SiO_2 y SDT encontradas a la entrada de la membrana, indicaron que los procesos de coagulación, sedimentación y filtración que se encuentran corriente arriba del proceso de MOI no fueron 100% efectivos en la remoción de las mismas, lo cual sugirió la necesidad de utilizar un sistema MOI. Del mismo modo las concentraciones de SiO_2 y SDT a la salida de MOI confirmaron la necesidad del proceso MOI, así como un buen desempeño que mejoró dichas concentraciones. En el caso del valor de flujo permeado promedio obtenido en esta corrida, junto con los valores obtenidos en las concentraciones de SiO_2 y SDT a la salida de la membrana, fueron comparados entre las nueve corridas para determinar las mejores condiciones de operación en MOI (Tabla 22).

3.2.3.7 Caso 7: pH=3 y concentración de agente anti-incrustante= 1.0 mg/L

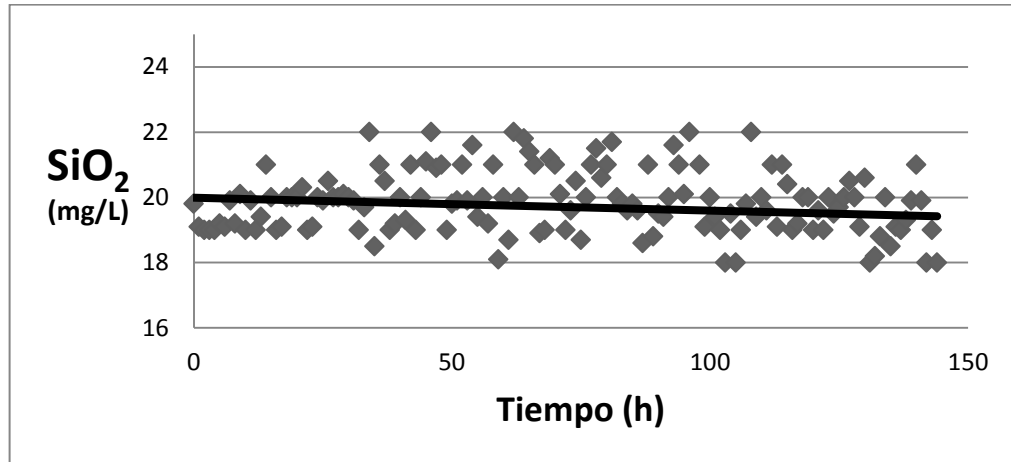


Figura 50. Variación de concentración de SiO_2 a la entrada de MOI.

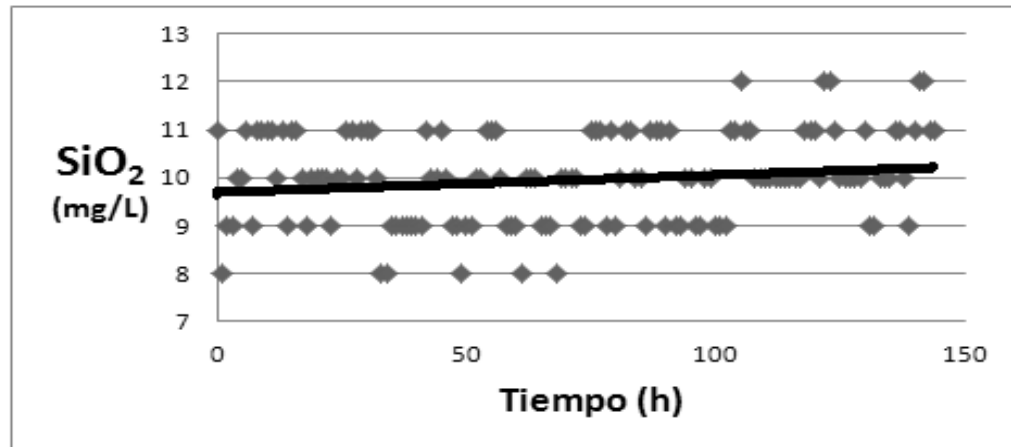


Figura 51. Variación de la concentración de SiO_2 a la salida de MOI.

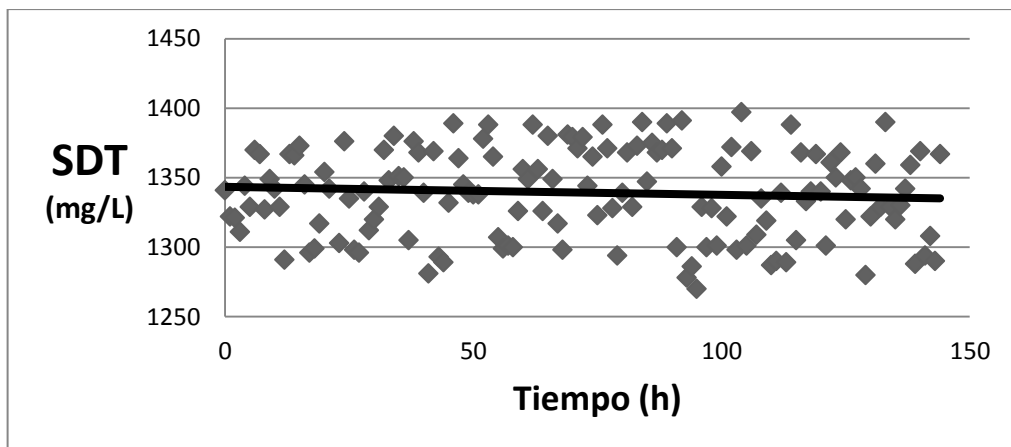


Figura 52. Variación de la concentración de SDT a la entrada de MOI.

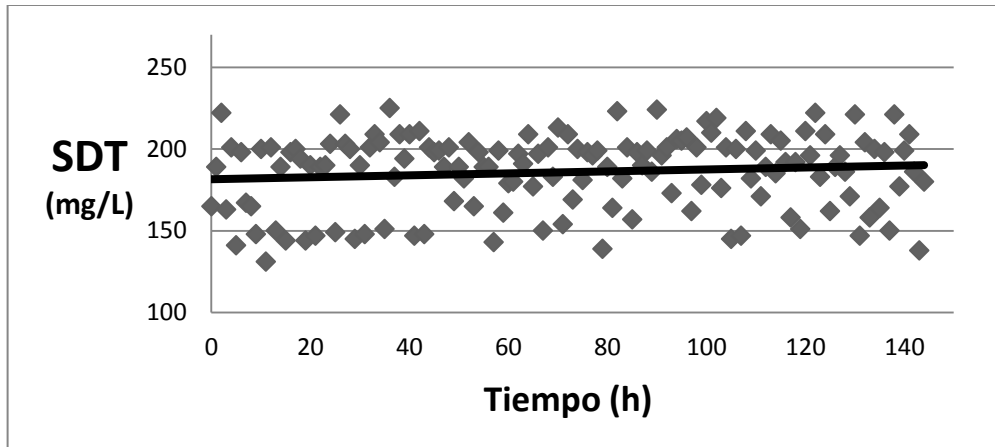


Figura 53. Variación de la concentración de SDT a la salida de MOI.

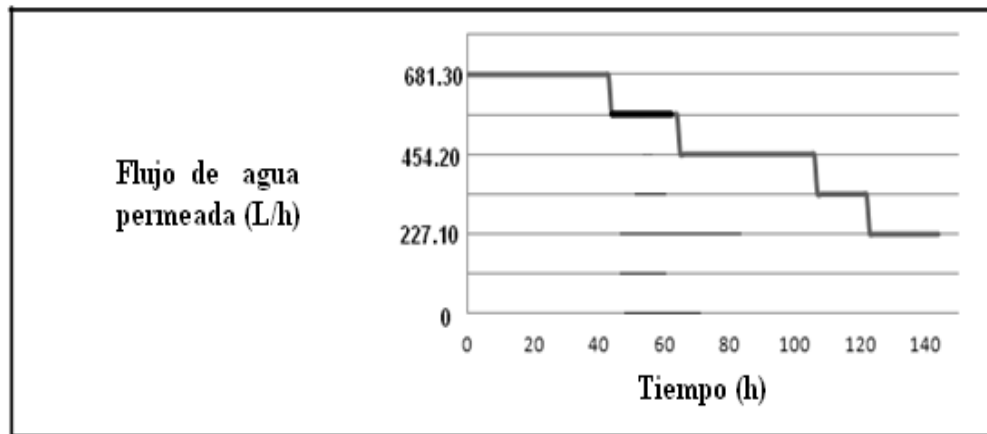


Figura 54. Flujo de agua permeada en MOI.

Como se muestra en la Figura 50, la concentración de SiO_2 a la entrada de MOI en el caso 7, se encuentra en el intervalo de 18 a 22 mg/L y es casi la misma para todas las corridas. La Figura 51, muestra la concentración de SiO_2 a la salida de MOI, la cual se muestra en el intervalo de 8 a 12 mg/L. La Figura 52, muestra la concentración de SDT a la entrada de MOI, la cual se encuentra en el intervalo de 1,280 a 1,400 mg/L y es casi la misma en todas las corridas. La Figura 53, muestra la concentración de SDT a la salida de MOI, la cual se encuentra en el intervalo de 130 a 225 mg/L. La Figura 54, muestra el flujo de agua permeada en MOI, la cual se encuentra en el intervalo de 227.10 a 681.30 L/h con un promedio de 488.26 L/h.

Al igual que en las corridas anteriores, es muy importante mencionar que las concentraciones de SiO_2 y SDT encontradas a la entrada de la membrana, indicaron que los procesos de coagulación, sedimentación y filtración que se encuentran corriente arriba del proceso de MOI no fueron 100% efectivos en la remoción de las mismas, lo cual sugirió la necesidad de utilizar un sistema MOI. Del mismo modo las concentraciones de SiO_2 y SDT a la salida de MOI confirmaron la necesidad del proceso MOI, así como un buen desempeño que mejoró dichas concentraciones. En el caso del valor de flujo permeado promedio obtenido en esta corrida, junto con los valores obtenidos en las concentraciones de SiO_2 y SDT a la salida de la membrana, fueron comparados entre las nueve corridas para determinar las mejores condiciones de operación en MOI (Tabla 22).

3.2.3.8 Caso 8: pH=3 y concentración de agente anti-incrustante= 3.0 mg/L

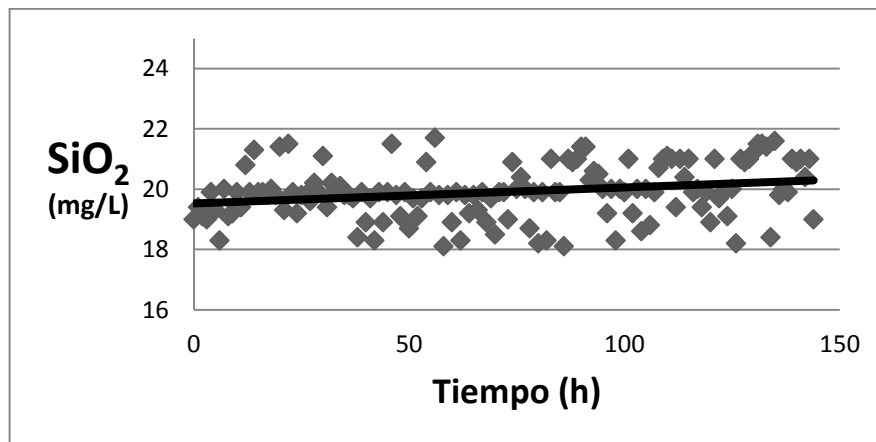


Figura 55. Variación de concentración de SiO_2 a la entrada de MOI.

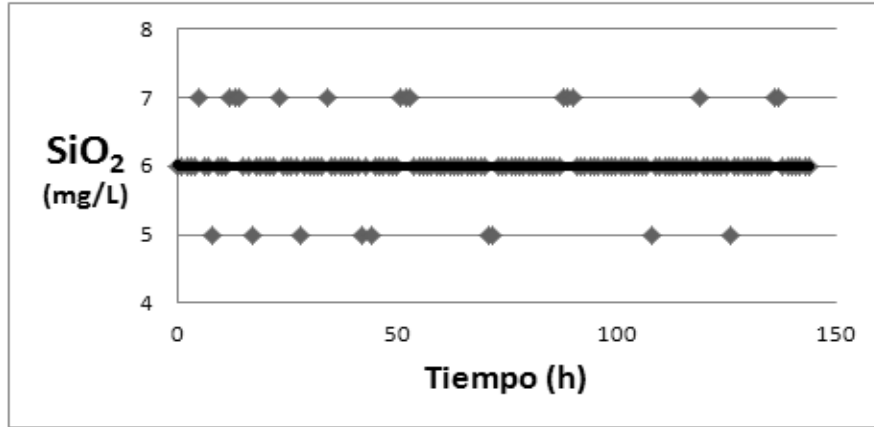


Figura 56. Variación de la concentración de SiO₂ a la salida de MOI.

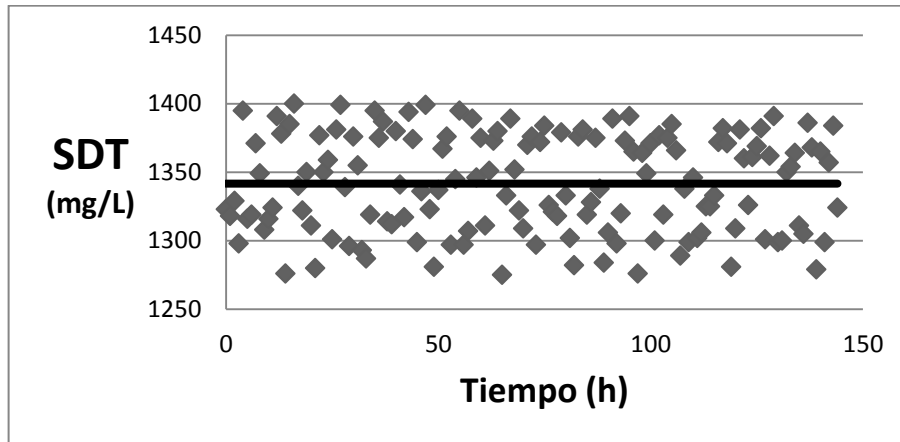


Figura 57. Variación de la concentración de SDT a la entrada de MOI.

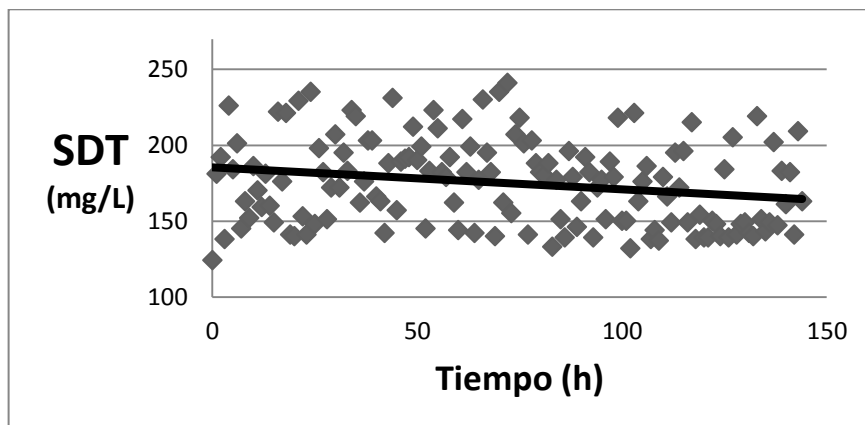


Figura 58. Variación de la concentración de SDT a la salida de MOI.

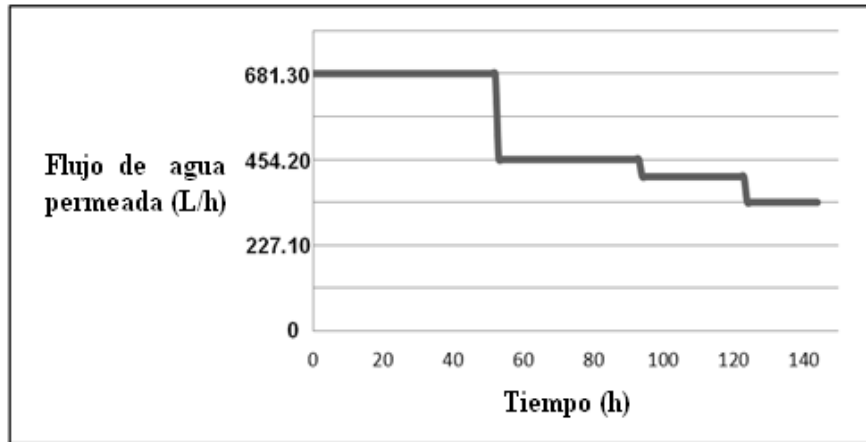


Figura 59. Flujo de agua permeada en MOI.

Como se muestra en la Figura 55, la concentración de SiO_2 a la entrada de MOI en el caso 8, se encuentra en el intervalo de 18 a 22 mg/L y es casi la misma para todas las corridas. La Figura 56, muestra la concentración de SiO_2 a la salida de MOI, la cual se muestra en el intervalo de 5 a 7 mg/L. La Figura 57, muestra la concentración de SDT a la entrada de MOI, la cual se encuentra en el intervalo de 1,280 a 1,400 mg/L y es casi la misma en todas las corridas. La Figura 58, muestra la concentración de SDT a la salida de MOI, la cual se encuentra en el intervalo de 125 a 245 mg/L. La Figura 59, muestra el flujo de agua permeada en MOI, la cual se encuentra en el intervalo de 340.65 a 681.30 L/h con un promedio de 510.98 L/h. Al igual que en las corridas anteriores, es muy importante mencionar que las concentraciones de SiO_2 y SDT encontradas a la entrada de la membrana, indicaron que los procesos de coagulación, sedimentación y filtración que se encuentran corriente arriba del proceso de MOI no fueron 100% efectivos en la remoción de las mismas, lo cual sugirió la necesidad de utilizar un sistema MOI. Del mismo modo las concentraciones de SiO_2 y SDT a la salida de MOI confirmaron la necesidad del proceso MOI, así como un buen desempeño que mejoró dichas concentraciones.

En el caso del valor de flujo permeado promedio obtenido en esta corrida, junto con los valores obtenidos en las concentraciones de SiO_2 y SDT a la salida de la membrana, fueron comparados entre las nueve corridas para determinar las mejores condiciones de operación en MOI (Tabla 22).

3.2.3.9 Caso 9: pH=4 y concentración de agente anti-incrustante= 3.0 mg/L

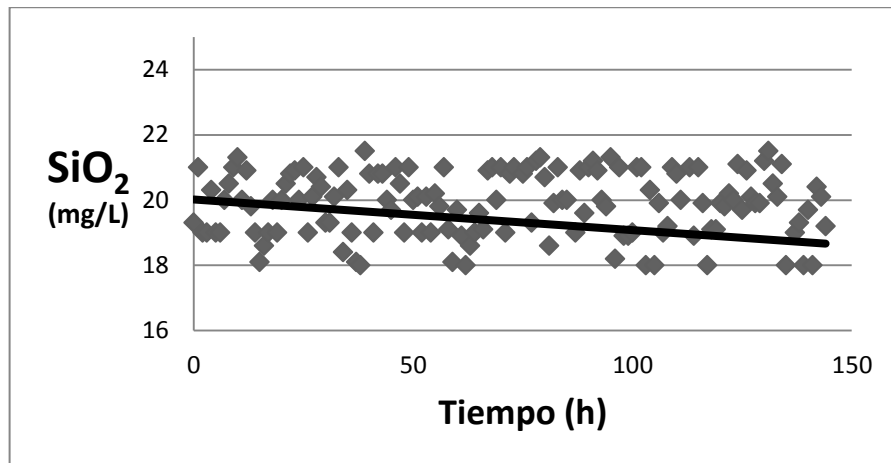


Figura 60. Variación de concentración de SiO_2 a la entrada de MOI.

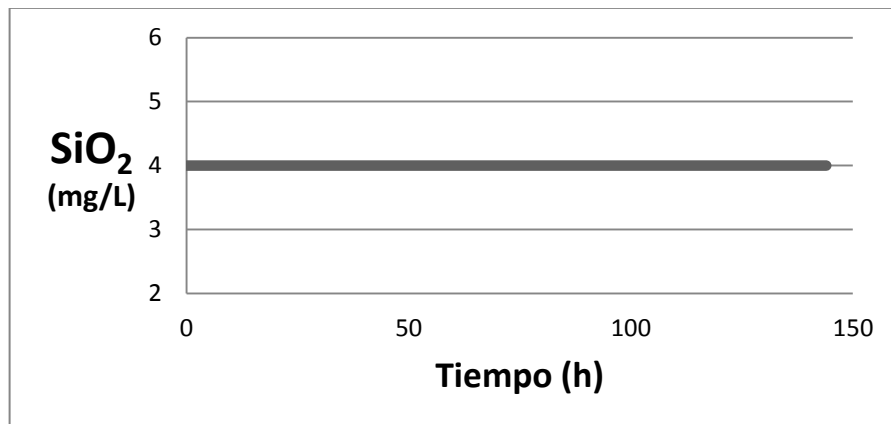


Figura 61. Variación de la concentración de SiO_2 a la salida de MOI.

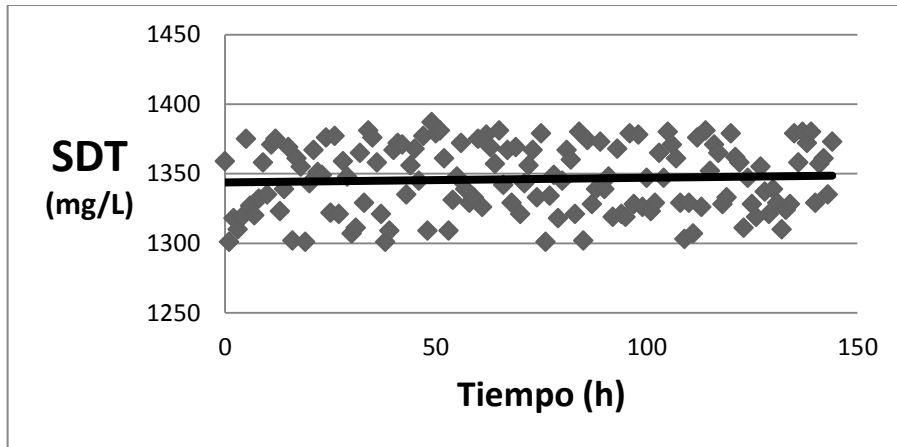


Figura 62. Variación de la concentración de SDT a la entrada de MOI.

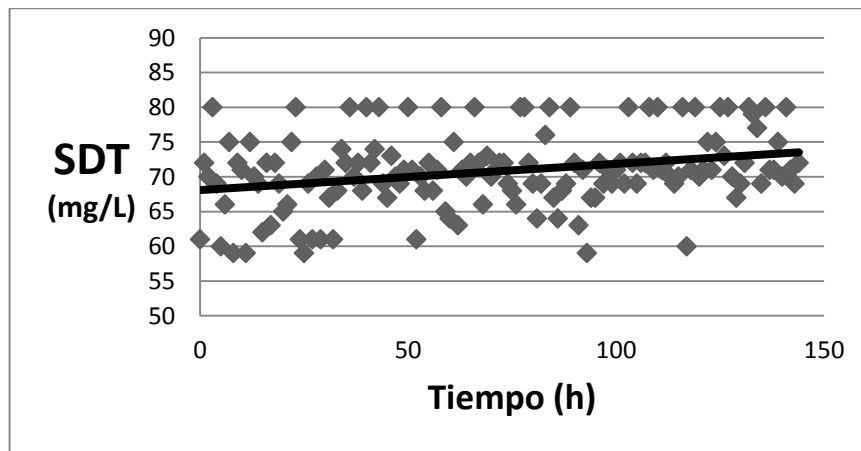


Figura 63. Variación de la concentración de SDT a la salida de MOI.

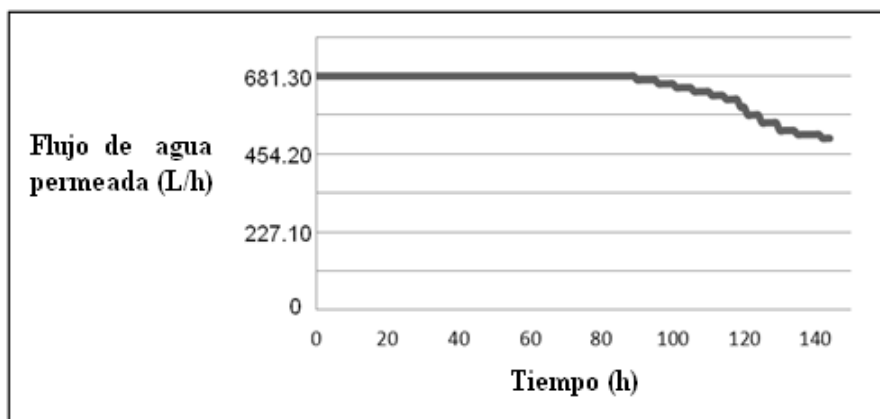


Figura 64. Flujo de agua permeada en MOI.

Como se muestra en la Figura 60, la concentración de SiO_2 a la entrada de MOI en el caso 9, se encuentra en el intervalo de 18 a 22 mg/L y es casi la misma para todas las corridas. La Figura 61, muestra la concentración de SiO_2 a la salida de MOI, la cual se muestra constante en 4.0 mg/L. La Figura 62, muestra la concentración de SDT a la entrada de MOI, la cual se encuentra en el intervalo de 1,280 a 1,400 mg/L y es casi la misma en todas las corridas. La Figura 63, muestra la concentración de SDT a la salida de MOI, la cual se encuentra en el intervalo de 58 a 80 mg/L. La Figura 64, muestra el flujo de agua permeada en MOI, la cual se encuentra en el intervalo de 499.62 a 681.30 L/h con un promedio de 647.24 L/h. Al igual que en las corridas anteriores, es muy importante mencionar que las concentraciones de SiO_2 y SDT encontradas a la entrada de la membrana, indicaron que los procesos de coagulación, sedimentación y filtración que se encuentran corriente arriba del proceso de MOI no fueron 100% efectivos en la remoción de las mismas, lo cual sugirió la necesidad de utilizar un sistema MOI. Del mismo modo las concentraciones de SiO_2 y SDT a la salida de MOI confirmaron la necesidad del proceso MOI, así como un buen desempeño que mejoró dichas concentraciones. En el caso del valor de flujo permeado promedio obtenido en esta corrida, junto con los valores obtenidos en las concentraciones de SiO_2 y SDT a la salida de la membrana, fueron comparados entre las nueve corridas para determinar las mejores condiciones de operación en MOI (Tabla 22).

3.2.3.10 Aplicación de Análisis de Superficie de Respuesta (ASR) en MOI.

La información de los nueve casos fue analizada mediante el programa de análisis de superficie de respuesta (ASR) con la intención de encontrar las mejores condiciones de operación de MOI y compararlas con las encontradas por RNA.

La Figura 65 muestra la variación de la concentración de SiO_2 a la salida de MOI, como una función de la concentración de agente anti-incrustante y del pH. En esta Figura se puede apreciar que el mejor punto de operación en MOI para obtener la más baja concentración de SiO_2 a la salida de MOI es a $\text{pH} = 4$ y a una concentración de agente anti-incrustante de 1.0 mg/L, lo cual es consistente con la información de los resultados obtenidos en las nueve corridas de MOI (diseño factorial) alimentadas en la Tabla 22.

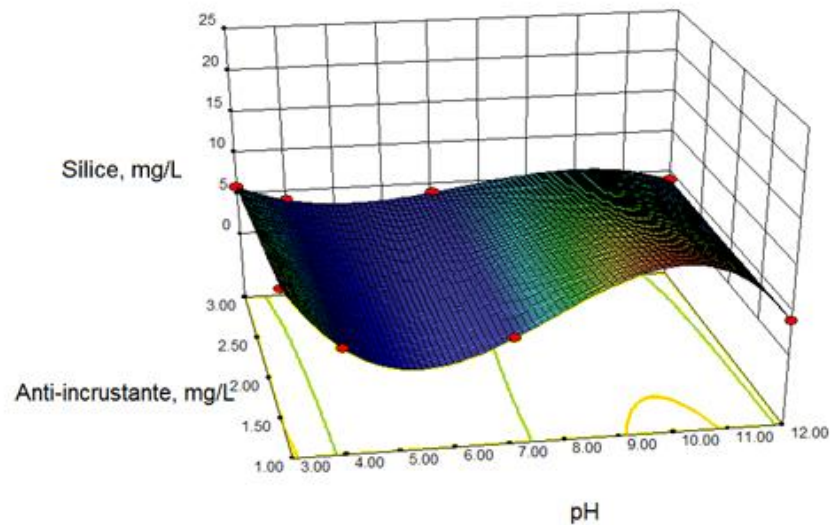


Figura 65. Variación de la concentración de SiO_2 a la salida de MOI como una función de la concentración de agente anti-incrustante y del pH.

La Figura 66 muestra la variación de la concentración de SDT a la salida de MOI, como una función de la concentración de agente anti-incrustante y del pH.

En esta Figura se puede apreciar que el mejor punto de operación en MOI para obtener la más baja concentración de SDT a la salida de MOI es a $\text{pH} = 4$ y a la concentración de agente anti-incrustante de 1.0 mg/L , lo cual es consistente con la información de los resultados obtenidos en las nueve corridas de MOI (diseño factorial) alimentadas en la Tabla 22.

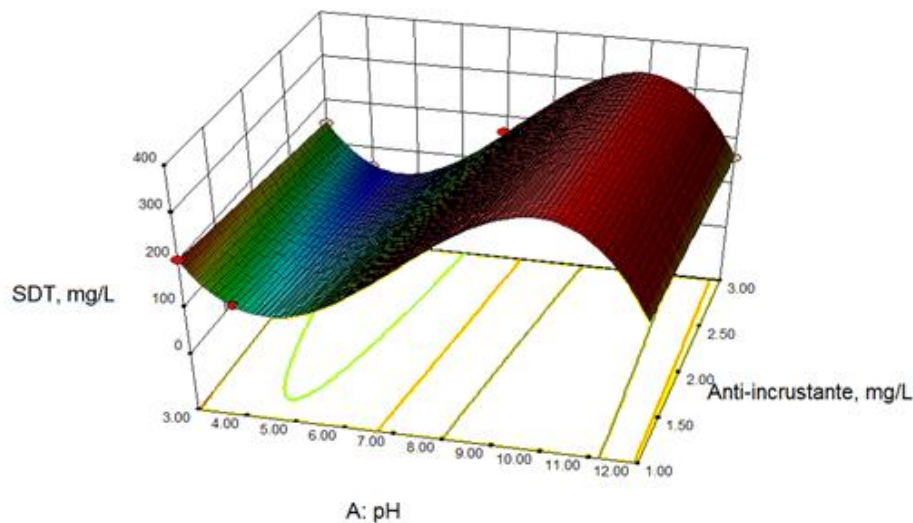


Figura 66. Variación de la concentración de SDT a la salida de MOI como una función de la concentración de agente anti-incrustante y del pH.

La Figura 67 muestra la variación de flujo permeado a la salida de MOI, como una función de la concentración de agente anti-incrustante y del pH. En esta Figura se puede apreciar que el mejor punto de operación en MOI para obtener el flujo permeado de mayor valor es a $\text{pH} = 4$ y a una concentración de agente anti-incrustante de 1.0 mg/L , lo cual es consistente con la información de los resultados obtenidos en las nueve corridas de MOI (diseño factorial) alimentadas en la Tabla 22.

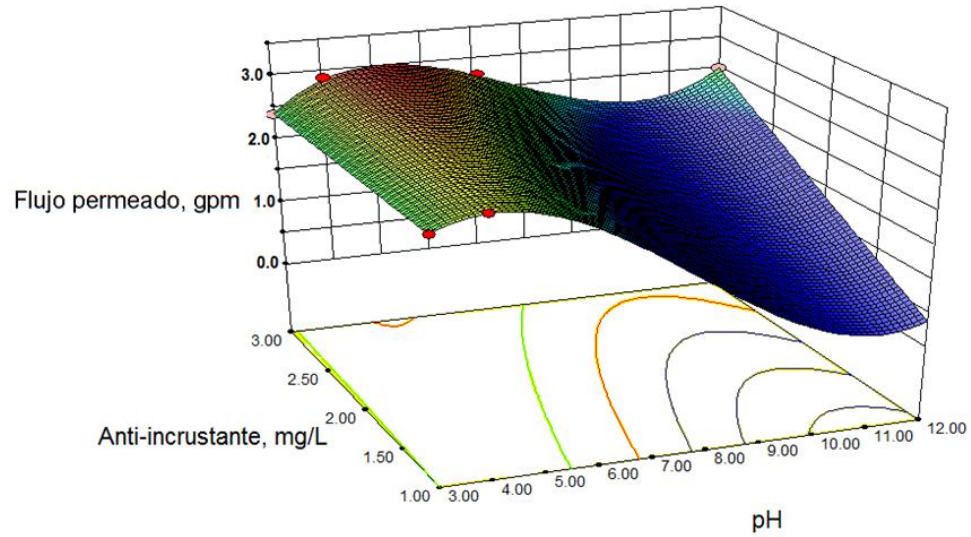


Figura 67. Variación del flujo permeado a la salida de MOI como una función de la concentración de agente anti-incrustante y del pH.

La Tabla 22 muestra el desempeño de MOI después de seis días continuos de operación durante nueve diferentes casos que involucran diferentes valores de pH y diferentes concentraciones de anti-incrustante VIATEC 4000. Cada experimento fue definido por medio del diseño factorial (Tabla 4) y llevado a cabo durante 6 continuos días de operación.

TABLA 22

DESEMPEÑO DEL PROCESO MOI BAJO DIFERENTES CONDICIONES DE OPERACIÓN.

Casos	1	2	3	4	5	6	7	8	9
pH	12	7	12	7	4	4	3	3	4
Concentración de agente anti-incrustante (mg/L)	1	1	3	3	1	3	1	3	3
Concentración de SiO₂ a la entrada (mg/L)	18	20	21	19	20	20	20	20	19
Concentración de SDT a la entrada (mg/L)	1380	1343	1302	1311	1350	1351	1339	1341	1346
Flujo de agua permeada (L/h)	397.43	483.72	501.89	579.11	595.00	626.80	488.26	510.98	647.24
Concentración de SiO₂ a la salida (mg/L)	4	4	4	4	4	4	10	6	4
Concentración de SDT a la salida (mg/L)	165	171	152	156	111	72	185	175	71

Los resultados obtenidos por el caso 9 muestran que el 92.63% y 78.94% del óxido de silicio fue removido en el tratamiento del agua residual a través de varios procesos contenidos en el pre-tratamiento y a través del sistema de MOI, respectivamente, lo cual indica un porcentaje de remoción global del 98.44%. Adicionalmente, los porcentajes de remoción de 25.92% y 94.72% en SDT fueron alcanzados en las mismas etapas de proceso, lo cual resulta en un porcentaje de remoción global del 96.09%.

Estos resultados confirman la contribución del sistema MOI debido a que los SDT y el SiO₂ no fueron removidos en su totalidad por el proceso de coagulación-floculación, lo cual tiene una relación directa con las especies remanentes en el intervalo de pH en el que se está trabajando. Si el coagulante utilizado es el Al₂(SO₄)₃ cuyas especies en solución son altamente activas en el intervalo de pH de 4 a 6 de acuerdo a su diagrama de especiación (Figura 6) y el floculante utilizado es catiónico muy activo en el intervalo de pH de 3 a 7, esto indica que algunas especies no alcanzaron a ser coaguladas y sedimentadas y lograron pasar las unidades de filtración corriente abajo del tanque sedimentador hasta llegar al proceso de MOI. De acuerdo a los análisis químicos efectuados sobre los sólidos retenidos o incrustados en la MOI (Tabla 23) y a los análisis químicos del flujo permeado en caso 9 (Figuras 60 a 63) fueron concluyentes que la especie dominante es SiO₂, así como otros componentes mostrados en la misma Tabla 23.

TABLA 23

COMPOSICIÓN DE SÓLIDOS CONTENIDOS EN MOI

Elemento	Peso, %	Atómico, %
O K	58.17	71.04
Na K	0.65	0.55
Mg K	1.64	1.32
Al K	4.27	3.09
Si K	32.67	22.73
Ca K	2.60	1.27
Total	100.00	100.00

Como se observa en la Tabla 22, el flujo permeado mostró un crecimiento linear con el incremento de la concentración del agente anti-incrustante. Esto fue debido principalmente a la acción del agente anti-incrustante sobre la membrana lo cual permite que esta siga filtrando con buena eficiencia. Adicionalmente, disminuyendo el pH se incrementó el flujo permeado hasta alcanzar un máximo a pH de 4. Esto fue debido a que el pH seleccionado es donde los filtros pulidores y la unidad MOI tienen una máxima eficiencia de contención de SDT y SiO₂. De igual forma, los mismos efectos del agente anti-incrustante y del pH fueron reflejados en los valores obtenidos en la concentración de SDT y por las mismas razones.

El mejor desempeño de la concentración de SDT y SiO₂ fue alcanzado a un pH de 4 y una concentración de agente anti-incrustante de 3 mg/L (caso 9, Tabla 22). Esto fue debido a que aparte de los efectos de la concentración del agente anti-incrustante y del pH seleccionado sobre el flujo permeado, se encontró un efecto muy importante en el uso de una membrana usada y retro-lavada con HCl 1.0 N, lo que indica que este ácido utilizado tuvo un efecto importante en el acondicionamiento de la membrana para filtrar con mayor eficiencia y ayudar a disminuir incrustaciones.

Para el caso 9 de MOI, las Figuras 60 y 62 muestran las concentraciones de óxido de silicio y SDT a la entrada de MOI durante 6 días (144 horas) de operación. Debido a condiciones de operación inestables, las concentraciones de óxido de silicio y SDT a la entrada de MOI se mostraron en los rangos de 18 a 21 mg/L y de 1,300 a 1,380 mg/L, respectivamente.

Para el mismo caso 9 de MOI, la Figura 64 muestra el desempeño del flujo de agua permeada durante el mismo periodo, el cual permaneció constante a 681.30 L/h durante 85.15 horas de operación continua. De cualquier modo, después de este tiempo, el flujo disminuyó hasta 499.62 L/h debido al ensuciamiento de la membrana y el rango de flujo de agua permeada se mantuvo entre 55 y 72% en ese periodo.

Las Figuras 61 y 63 muestran las concentraciones de óxido de silicio y SDT a la salida de MOI durante 6 días (144 h) de operación de la planta piloto. Como se muestra, la concentración de óxido de silicio se mantuvo constante en el periodo estudiado, lo cual confirma la efectividad del sistema MOI en la remoción de este contaminante.

3.2.3.11 Aplicación de Redes Neuronales Artificiales (RNA) en MOI.

La Tabla 24 muestra los resultados de RNA incluyendo el ECM, el número de iteraciones y el coeficiente de determinación, manteniendo 3 neuronas en cada una de las capas ocultas para los datos experimentales en los nueve casos descritos en la Tabla 22 (sección 3.3.3.11) sobre la operación de MOI. Para todos los casos, la red Newff fue entrenada usando el algoritmo de Levenberg-Marquardt. La herramienta de RNA en MATLAB permitió que el 33% de los 144 conjuntos de datos obtenidos para cada caso (o sea 48 conjuntos de datos) fueran usados para entrenamiento, mientras que el 33% fue usado para validación y 33% para prueba.

El objetivo de la etapa de entrenamiento es minimizar el error entre la salida y_k^p , obtenida por la red y la salida deseada (predicción), d_k^p . Esta función error es representada por E^p , es mostrada por la ecuación (17):

$$E^p = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^M (d_k^p - y_k^p)^2, \quad (17)$$

Donde, E^p = función error (ver Figura 75), d_k^p = es la salida esperada (predicción) en la neurona k, y y_k^p = salida real en la neurona k.

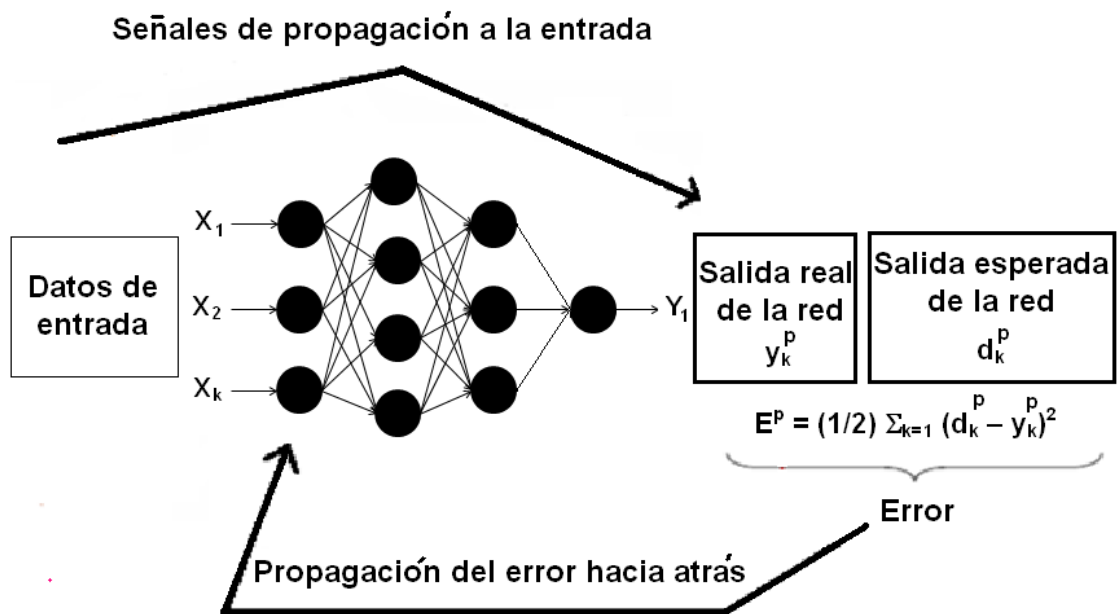


Figura 68. Diseño de la arquitectura de la red usada para obtener los mejores resultados para el caso nueve en MOI.

TABLA 24

**RESULTADOS DE RNA PARA LOS DATOS EXPERIMENTALES
OBTENIDOS DE TODOS LOS CASOS USADOS PARA ESTUDIAR EL
SISTEMA MOI, CON 3 NEURONAS EN CADA CAPA OCULTA.**

Caso	ECM (x 10⁴)	Número de iteraciones	Coefficiente de determinación (R²; x 10¹)
1	72	181	9.87
2	171	143	9.75
3	322	21	9.56
4	7.34	574	9.97
5	5.78	29	9.98
6	2.38	171	9.98
7	242	56	9.86
8	345	55	9.64
9	5.55	27	9.97

Como se muestra en la Tabla 22, el caso 9 obtuvo el mayor flujo permeado y las más bajas concentraciones de óxido de silicio y SDT a la salida de MOI después de 6 días de operación continua. Adicionalmente, de acuerdo a la Tabla 24 el caso 9 obtiene uno de los más bajos ECM y uno de los mayores coeficientes de determinación.

Adicionalmente, diferentes tipos de RNA pero con iguales configuraciones (mismo número de neuronas en las dos capas ocultas que el utilizado en la Tabla 24) fueron probadas y la Tabla 25 muestra los resultados de RNA que incluyen para cada corrida el tipo de red usada, el ECM, el número de iteraciones y el coeficiente de determinación para los datos obtenidos en el caso 9.

TABLA 25

RESULTADOS DE RNA UTILIZANDO DIFERENTES TIPOS DE REDES PARA EVALUAR LOS DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS EN EL CASO 9 DURANTE LA PRUEBA DEL SISTEMA MOI.

Corrida	Red usada	ECM (x 10⁴)	Número de iteraciones	Coefficiente de determinación (R²; x 10¹)
1	Newff	5.64	25	9.98
2	Newfitt	2.38	170	9.75
3	Newlrn	6.29	95	9.79
4	Newpr	2.81	25	No determinado

*El número de neuronas en las dos capas ocultas se mantiene constante en 3.

La Tabla 25 muestra que la red Newff obtiene un valor muy bajo de ECM y el más alto coeficiente de determinación. Aún y cuando todas las redes usadas pueden converger en el resultado esperado, la manera en que cada red trabaja es diferente.

El que la red Newff haya obtenido mejores resultados solo indica que es la mejor red para este sistema, pero su mejor desempeño solo puede ser explicado analizando las diferencias existentes entre cada tipo de red utilizada. La Tabla 26 muestra un análisis comparativo de cada red mostrada en la Tabla 25.

TABLA 26

ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LAS DIFERENTES REDES USADAS

Nombre	Algoritmo utilizado	Función de transferencia	Función de entrenamiento	Medición del desempeño
Newff	Crea una red Alimentada hacia adelante y de propagación hacia atrás	Tansig purelin	Trainlm	ECM
Newfitt	Crea una red para ejercitar con propagación hacia atrás	Tansig purelin	Trainlm	ECM
Newlrm	Crea una red de capas recurrentes y de propagación hacia atrás	Tansig purelin	Trainlm	ECM
Newpr	Crea una red de reconocimiento de patrones y de propagación hacia atrás.	Tansig purelin	Trainscg	No aplica

Como se puede ver en la Tabla 26, las cuatro redes utilizadas tienen las mismas funciones de transferencia y entrenamiento. La principal diferencia entre los cuatro tipos de redes es el algoritmo utilizado, es decir, la manera como converge en la solución.

Por otro lado, el desempeño obtenido con una diferente configuración neuronal en la red Newff (diferente número de neuronas en la primera capa oculta), es mostrado en la Tabla 27.

TABLA 27

RESULTADOS DE RNA UTILIZANDO DIFERENTES CONFIGURACIONES EN LA RED, PARA LA EVALUACIÓN DE LOS DATOS EXPERIMENTALES EN EL CASO 9, DURANTE LA PRUEBA DEL SISTEMA MOI.

Corrida	Red usada	Numero de neuronas en la primera capa oculta	ECM (x 10⁴)	Número de iteraciones	Coefficiente de determinación. (R²; x 10¹)
1	Newff	3	5.64	25	9.98
2	Newff	4	2.83	250	9.98
3	Newff	5	3.45	160	9.98
4	Newff	6	4.54	45	9.98
5	Newff	10	4.975	33	9.98

*El número de neuronas en la segunda capa oculta se mantiene en un valor de 3.

Las Figuras 68 y 69 muestran la red Newff usada para el análisis de datos obtenidos en el caso 9, la cual comprende tres neuronas en la capa de entrada, dos capas ocultas con cuatro y tres neuronas respectivamente (con una función de transferencia tangente-sigmoidea) y una respuesta a la salida (con una función de transferencia logarítmico-sigmoidea). La Tabla 27 muestra que dicha configuración obtuvo los mejores resultados en los valores de ECM y coeficiente de determinación (R²). Aquí es muy importante comentar que otro sistema analizado con la misma red Newff puede encontrar sus mejores resultados con más o con menos neuronas en su primer capa oculta, inclusive, puede tener mejor desempeño con una sola capa oculta, y esto es debido a que cada sistema se comporta de diferente manera y para modelarlo se requiere una red diferente.

La disminución del flujo permeado experimental y esperado (predicción mediante RNA) es mostrada en la Figura 70. La Figura 71 compara los flujos permeados experimental y esperado (predicción mediante RNA), mostrando en ambos casos que la predicción se encuentra extremadamente cerca de los valores reales, con un coeficiente de determinación de 0.99.

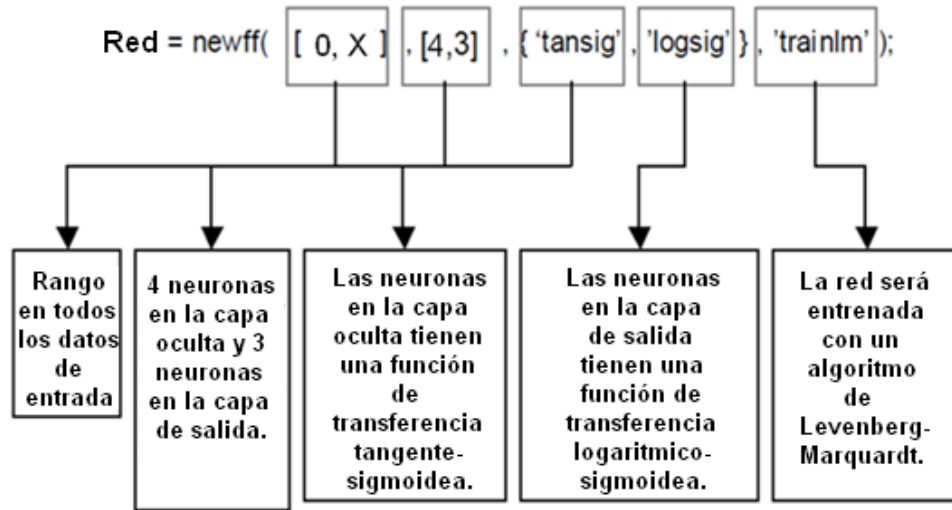


Figure 69. Modelo estructural de una RNA Newff.

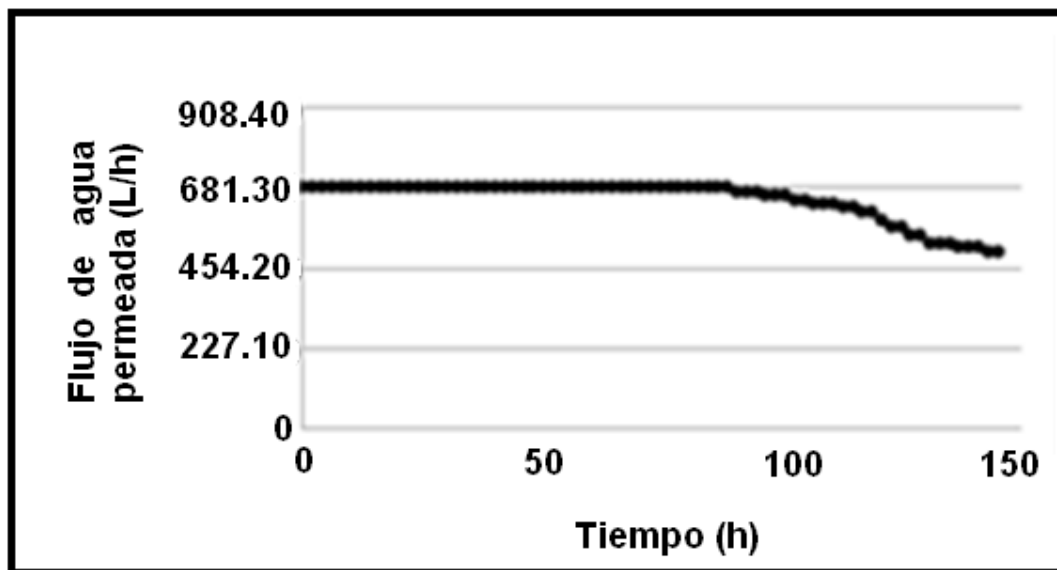


Figura 70. Valores experimentales y esperados (predicción mediante RNA) para el flujo de agua permeado vs. Tiempo en el caso 9 de MOI.

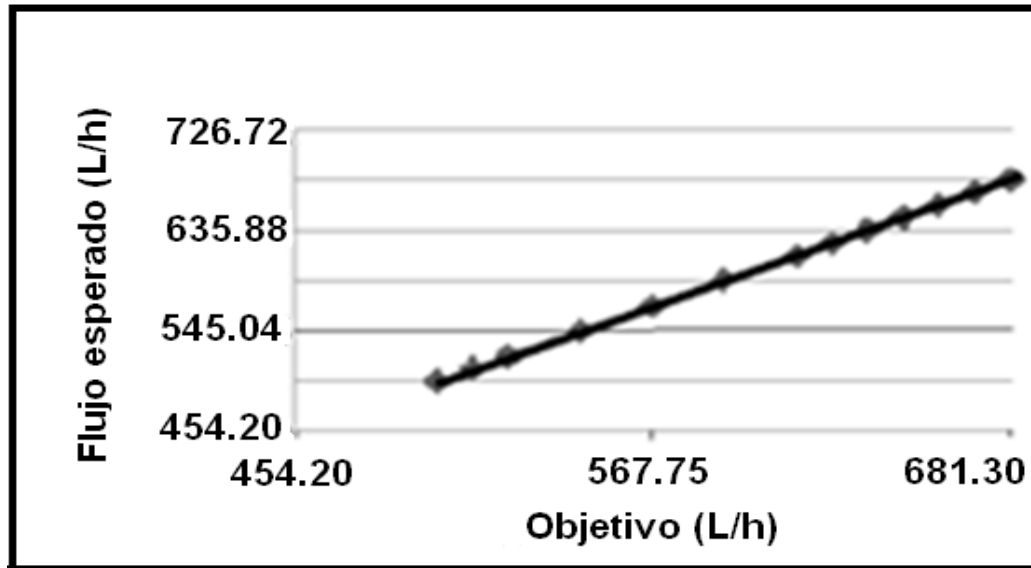


Figura 71. Valores experimentales y esperados (predicción mediante RNA) para el flujo de agua permeado en el caso 9 de MOI.

Los resultados obtenidos mediante la modelación de datos en MOI usando RNA (Figuras 70 y 71), muestran resultados muy satisfactorios al compararse contra los experimentales, manteniendo valores del coeficiente de determinación de 0.998 y de ECM de 2.83×10^{-4} . Esto muestra el efecto de un excelente desempeño en las etapas de entrenamiento, validación y prueba.

3.3 Análisis comparativo entre la planta de tratamiento actual y la propuesta.

En general, la comparación de la completa operación de la planta piloto de TAR (operación propuesta) con la planta de tratamiento físico-químico del tipo de Reynolds and Richards (operación original de la planta de TAR dentro de la operación de manufactura de latas de aluminio) es mostrada en la Tabla 28.

TABLA 28

**COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OPERACIONALES OBTENIDOS
ENTRE LA PLANTA DE TRATAMIENTO ACTUAL (REYNOLS &
RICHARDS) Y LA PROPUESTA.**

Parámetro	Unidades	Proceso original (Reynolds y Richards)	Planta piloto de TAR	Mejora (%)
Conductividad	Micro mho/cm	119.70	65.80	45.02
pH	pH units	7.30	4	-
Dureza total	mg/L as CaCO ₃	30	0	100
Dureza de calcio	mg/L as CaCO ₃	19	0	100
Dureza de magnesio	mg/L as CaCO ₃	11	0	100
Óxido de silicio	mg/L	20	4	80
Sólidos totales (ST)	mg/L	122	71	41.80
Sólidos disueltos totales (SDT)	mg/L	122	71	41.80
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	0	0	0
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L	50	< 10	> 80
Flujo de agua recuperada y reutilizada	%	40	71.25	31.25

La Tabla 28 muestra que la operación de la planta piloto genera mejoras en todos los parámetros reportados. Las principales razones de estas mejoras son las siguientes:

- a. El uso de filtros coalescentes, los cuales maximizaron la eliminación de grasas y aceites, mejorando con ello la remoción de DQO. En la planta original no se usaron este tipo de filtros.

- b. El ajuste de pH en un valor de 4, el cual ayudó a reducir la concentración de SiO_2 en el flujo de agua permeada. En la planta original del tipo de Reynolds & Richards no contaba con un sistema MOI y se trabajaba en un pH de casi 7.
- c. La selección de la mejor combinación de coagulante y floculante utilizando la prueba de jarras, eliminaron todos los tipos de dureza en el flujo de agua permeada.
- d. La inclusión de un proceso MOI al final de la planta piloto, mejoró la filtración del agua residual reflejada en un decremento de las concentraciones de ST, SDT y SiO_2 .
- e. La combinación de filtros pulidores con el uso del agente anti-incrustante VIATEC 4000 mejoró el tiempo de ciclo operacional de MOI debido a una significativa disminución de su ensuciamiento.

Del mismo modo fue efectuado un análisis comparativo de los costos operacionales de ambas plantas durante el año 2012 y los resultados se muestran en la Tabla 29:

TABLA 29**ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS OPERACIONALES ENTRE LA PLANTA DE TRATAMIENTO ACTUAL (REYNOLDS & RICHARDS) Y LA PLANTA PROPUESTA.**

Costos de operación anual (Dólares americanos)	Proceso original de Reynolds & Richards (\$)	Planta piloto de TAR (\$)	Variación %
Confinamiento de lodos	17,500	21,500	+ 22.85
Uso de químicos	15,400	24,000	+ 55.84
Agua no recuperada	650,000	322,300	-50.41
Multas	150,000	0	-100.00
Total	832,900	367,800	-55.84

La Tabla 29 muestra que aún y cuando el costo operativo anual de confinamiento de lodos y uso de productos químicos es mayor en la planta piloto de tratamiento de aguas residuales propuesta, el costo anual del agua no recuperada y el costo de las multas hacen que la operación anual de la planta piloto sea 55.84% menos costosa que la planta de tratamiento actual, con el modelo operativo de Reynolds y Richards.

4.0 CONCLUSIONES

En el presente trabajo fue propuesta una planta piloto de tratamiento de aguas residuales, con un diagrama de flujo orientado a tratar el efluente proveniente de un proceso de manufactura de latas de aluminio. Esta propuesta fue debido a que el proceso original de tratamiento de agua residual existente en dicha manufactura de latas, era incapaz de recuperar más del 40% del flujo de agua utilizada en todos sus procesos. La nueva propuesta incluye el uso de un proceso de separación MOI. Investigaciones experimentales fueron llevadas a cabo para verificar y validar el esquema propuesto y los resultados fueron interpretados utilizando la técnica de RNA. El efluente general de agua residual de esta empresa manufacturera de latas de aluminio fue sometido a varios procesos de pretratamiento incluyendo separación de aceites y grasas, coagulación-floculación, sedimentación, filtración con arena y carbón activado, ajuste de pH y adición de un agente anti-incrustante combinado con filtración de pulimiento.

Las conclusiones sobre los resultados obtenidos en las diferentes corridas efectuadas en esta planta piloto son las siguientes:

La unidad de ósmosis inversa de la planta piloto bajo estudio fue modelada por medio de redes neuronales artificiales (RNA) para encontrar sus condiciones óptimas de operación, lo que permitió incrementar la tasa de reúso de aguas residuales del 40 al 71.25%. Ver figuras 70 y 71, así como Tabla 28.

El modelo óptimo encontrado en el modelo de RNA utilizado en el proceso MOI consistió en una red Newff de cuatro capas, con 3 neuronas en la capa de entrada, 4 neuronas en la primera capa oculta, 3 neuronas en la segunda capa oculta y una neurona en la capa de salida. Este modelo fue capaz de predecir el flujo permeado con el más bajo ECM y con un coeficiente de determinación de 0.99. Es importante mencionar que los resultados de RNA en MOI son consistentes con los resultados de diseño factorial y ASR aplicados al mismo proceso. Ver Figuras 64, 67, 70 y 71.

El uso de las ecuaciones de la Ruta de Diseño para el dimensionamiento de equipos resultó ser muy adecuado para el dimensionamiento básico de los equipos de la planta piloto.

La selección de la pareja óptima de coagulante-floculante incluyendo las dosis óptimas y las mejores condiciones de operación del reactor coagulador fueron definidas utilizando un diseño factorial 2^n . La pareja de coagulante y floculante seleccionada por medio del diseño factorial fue $Al_2(SO_4)_3$ y NALCO 9907.

Las mejores condiciones de operación encontradas en la prueba de jarras, con la pareja de coagulante y floculante antes mencionada son: pH inicial = 5, velocidad de agitación durante la adición del coagulante por 10 minutos = 250 seg^{-1} , concentración del coagulante utilizado = 0.1 mg/L, velocidad de agitación durante la adición de floculante por 45 segundos = 100 seg^{-1} , concentración de floculante utilizado = 1.0 mg/L y temperatura = 22.60 °C.

Estas condiciones de operación son mostradas en las Tablas 15 y 20, corrida 16, y son consistentes con el diagrama de especiación para el aluminio mostrado en la Figura 6, donde se muestran los rangos de actividad (pH) de las diferentes especies del aluminio en solución. Tanto las condiciones de operación como la selección de la mejor pareja de coagulante-floculante efectuada en las pruebas de jarras utilizando el ASR coincidieron perfectamente con la información encontrada en el diseño factorial.

El tiempo de detención de una hora en el tanque sedimentador, demostró ser suficiente dado que la turbidez y transmitancia calculadas al final de la prueba de jarras no mostraron presencia de sólidos suspendidos (Tablas 15 y 20, corrida 16).

Varios experimentos definidos mediante un diseño factorial, fueron llevados a cabo en el proceso MOI para determinar sus condiciones óptimas de operación. Dichas condiciones fueron obtenidas utilizando los parámetros fijados en el caso 9 (Tabla 4): pH = 4, concentración de agente anti-incrustante = 3.0 mg/L, MOI prelavada con HCl 1.0 N y manteniendo una presión de operación en 19.06 kg/cm². El uso de ASR utilizando la información de los nueve casos experimentales en el proceso de MOI, coincidió perfectamente con la información generada utilizando el análisis factorial. Ver Figuras 64 y 67.

Las condiciones de operación usadas en el caso 9 con pH = 4 y concentración de anti-incrustante = 3.0 mg/L, (Tabla 22) lograron un flujo promedio de agua permeada de 647.24 L/h, lo cual representa un 71.25% de recuperación de agua con suficiente calidad para su reúso. Estas condiciones también lograron una reducción del 94.72% de SDT y una reducción del 79% en la concentración de SiO₂.

Los porcentajes de remoción del 92.63% y 78.94% en óxido de silicio fueron alcanzados en el tratamiento del agua residual a través de varios procesos anteriores al proceso de separación de MOI y a través del sistema MOI, respectivamente, lo cual indica un porcentaje de remoción global del 98.44%.

Los porcentajes de remoción del 25.92% y 94.72% en SDT fueron alcanzados en el pretratamiento del agua residual a través de varios procesos anteriores al proceso de separación de MOI y a través del sistema MOI, respectivamente, lo cual indica un porcentaje de remoción global del 96.09%. Con esto se demuestra la importancia del equipo MOI utilizado en la planta piloto.

Los resultados operacionales obtenidos en la planta piloto de tratamiento de aguas residuales demuestran que es mejor en la mayoría de sus indicadores incluyendo costos de operación, cuando se compara contra la planta de tratamiento actual (Reynolds & Richards). Las Tablas 28 y 29 muestran una mejora en la conductividad del 45.02%, una mejora en la dureza del 100%, una mejora de la concentración de SiO₂ a la salida del 80%, una mejora del 41.80% en la concentración de sólidos disueltos totales y sólidos totales, una mejora del DQO del 80% y una mejora de 31.25 puntos porcentuales en la recuperación del agua siendo tratada (tasa de reúso). Del mismo modo la planta piloto muestra una disminución en los costos operativos por año del 55.84% (\$ 465,100 dólares americanos/año), donde el principal elemento de influencia es el flujo de agua recuperada de 239,000 m³/año (71.25%), en comparación con el proceso de tratamiento de aguas actual en la planta de manufactura de latas del tipo de Reynolds & Richards con solo 134,000 m³/año recuperados. Este flujo representa el 40% del flujo de agua tratada que es recuperada.

5.0 RECOMENDACIONES

Las siguientes actividades son recomendables para complementar este trabajo y sobre todo para seguir mejorando la calidad del agua tratada en la presente planta de manufactura de latas de aluminio:

Efectuar pruebas con otro tipo de membranas para el mismo proceso de ósmosis inversa. Esto puede ser llevado a cabo utilizando la misma infraestructura de las instalaciones de la planta piloto existente. Para esto puede ser utilizada el agua del mismo proceso de manufactura de latas.

Efectuar pruebas en el mismo sistema a diferentes presiones antes de la membrana. En los experimentos llevados a cabo en la planta piloto, siempre fue mantenida una presión constante del agua llegando al sistema MOI. Del mismo modo siempre se mantuvo la presión diferencial en la membrana de manera constante. Pero bien pueden ser efectuados experimentos a diferentes presiones en la entrada de la membrana pero manteniendo siempre constante la presión diferencial en MOI.

Utilizar algún otro tipo de agentes anti-incrustantes para tratar de mejorar el desempeño de MOI. Si bien fue demostrada la buena eficiencia del anti-incrustante VIATEC 4000, es importante comparar su desempeño contra otro tipo de reactivos químicos anti-incrustantes a las mismas o a diferentes condiciones de pH.

Con el fin de disminuir los niveles de concentración de SiO_2 y SDT y por lo tanto incrementar el flujo de agua permeada, se recomienda utilizar alguna otra tecnología de filtración adicional a MOI, tal y como la nano-filtración.

BIBLIOGRAFÍA

1. Miller G.W., **Integrated concepts in water reuse: managing global water needs**, Desalination, Water Reuse Association (WRA), 187 (2006) 65-75.
2. Asano, T. and Cotruvo, J.A., **Groundwater recharge with reclaimed municipal wastewater: health and regulatory considerations**, Water Res., 38 (8), (2004) 1941-1951.
3. Saha, P.D. and Dutta, S, **Mathematical modeling of biosorption of safranin onto rice husk in a packed bed column using artificial neural network analysis**, Desalination and Water Treatment, 41(2012) 308-314.
4. Sadrzadeh, M., Mohammadi, T., Ivakpour, J., Kasiri, N., **Neural network modeling of Pb²⁺ removal from wastewater using electro dialysis**, Chem. Eng. Process.: Process Intensification, 48 (2009) 1371-1381.
5. United States Environmental Protection Agency (EPA), **Water Recycling and Reuse: The Environmental Benefits**, Water Division Region IX – EPA 909-F-98-001, Guidelines for Water Reuse, US EPA Office of Technology Transfer and Regulatory Support EPA/625/R-92/004, (September 2004).
6. Henze, M., Harremoës, P., Jansen, J la Cour and Arvin, E., **Wastewater Treatment, Biological and Chemical Processes**, Third Edition, Springer-Verlag (2002).
7. Scott, J.P. and Ollis, D.F., **Integration of Chemical and Biological Oxidation Processes for Water Treatment: Review and Recommendations**, Environ. Prog., AIChE, 14 (1995) 88-103.
8. Lin, S.H. and Lin, C.M., **Treatment of textile waste effluents by ozonation and chemical coagulation**, Water Res., 27 (1993) 1743-1748.
9. Pawlowski, L., **Physicochemical Methods for Water and Wastewater Treatment**, Elsevier Scientific Publishing Company inc., (1982).
10. Pathe, P.P., Biswas, A.K., Rao, N.N., Kaul, S.N., **Physico-chemical Treatment of Wastewater from clusters of Small Scale Cotton Textile Units**, Environ. Technol., 26 (2005) 313-327.
11. Gomez, M., Plaza, F., Garralon, G., Perez, J., Gomez, M.A., **A comparative study of tertiary wastewater treatment by physic-chemical-UV process and macrofiltration-ultrafiltration technologies**, Desalination, 202 (2006), 369-376.

12. Melin, T., Jefferson, B., Bixio, D., Thoeye, C., Wilde, W. De, Koning, J. De, Van der Graaf, J., and Wintgens, T., **Membrane bioreactor technology for wastewater treatment and reuse**, *Desalination*, 187 (2006) 271-282.
13. Ahmad, A.L., Ismail, S., Bathia, S., **Optimization of coagulation – flocculation process for a palm oil mill effluent, using RSM**, *Environ. Sci. Technol.*, 39 (2005) 2828- 2834.
14. Xu, Q., Telukdarie, A., Lou, H.H., and Huang, Y., **Integrated electroplating system modeling and simulation for near zero discharge of chemicals and metals**, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 44 (2005) 2156-2164.
15. Pai, T.Y., **Gray and neural network prediction of effluent from the wastewater treatment plant of industrial park, using influent quality**, *Environ. Eng. Sci.*, 25 (2008).
16. Babuna, F.G., Kabdasli, I., Sozen, S., Orhon, D., **Effluent management for a metal finishing industry aiming zero discharge conditions**, *J Environ. Sci. Heal. A Tox. Hazard. Subst. Environ. Eng.* 41 (2006) 1793-1806.
17. Pai, T.Y., Tsai, Y.P., Lo, H.M., Tsai, C.H., and Lin, C.Y., **Grey and neural network prediction of suspended solids and chemical oxygen demand in hospital wastewater treatment plant effluent**; *Comput. Chem. Eng.*, 31 (2007) 1272-1281.
18. Hamed, M.M., Khalafallah, M.G., Hassanien, E.A., **Prediction of waste water treatment plant performance using ANN**, *Environ. Model. Softw.*, 19 (2004) 919-928.
19. Tashaouie, H.R., Gholikandi, G.B., Hazrati, H., **Artificial neural networks modeling for predict performance of pressure filters in a water treatment plant**, *Desalination and Water Treatment*, 39 (2012) 192-198.
20. Hanbay, D., **Prediction of wastewater treatment plant performance based on wavelet packet decomposition and neural networks**, *Science Direct, Expert. Syst. Appl.*, 34 (2008) 1038-1043.
21. Daneshvar, N., Khataee, A.R., Djafarzadeh, N., **The use of artificial neural networks (ANN) for modeling of decolorization of textile dye solution containing C.I. basic yellow 28 by electrocoagulation process**; *Hazard. Mater.*, 137 (2006) 1788-1795.
22. Aleboyeh, A., Kasiri, M.B., Olya, M.E., and Aleboyeh, H., **Prediction of azo dye decolorization by UV/H₂O₂ using artificial neural networks**, *Dyes Pigments*, 77 (2008) 288-294

23. Khataee, A.R., **Photocatalytic removal of C.I. Basic Red 46 on immobilized TiO₂ nanoparticles**: Artificial neural network modeling, *Environ. Technol.*, 30 (2009) 1155-1168.
24. Noghabi, M.S., Ali Razavi, S.M., Mousavi, S.M., **Prediction of permeate flux and ionic compounds rejection of sugar beet press water nanofiltration using artificial neural networks**, *Desalination and Water Treatment*, 44 (2012) 83-91.
25. Abbas, A., and Al-Bastaki, N., **Modeling of an RO water desalination unit using neural networks**, *Chem. Eng.*, 114 (2005) 139-143.
26. Lee, Y.G., Lee, Y.S., Jeon, J.J., Lee, S., Yang, D.R., Kim, I.S., Kim, J.H., **Artificial neural network model for optimizing operation of a seawater reverse osmosis desalination plant**, *Desalination*, 247 (2009) 180-189.
27. Yangali-Quintanilla, V., Verliefde, A., Kim, T.-U., Sadmani, A., Kennedy, M., Amy, G., **Artificial neural network models based on QSAR for predicting rejection of neural organic compounds by polyamide nanofiltration and reverse osmosis membranes**, *Membr. Sci.*, 342 (2009) 251-262.
28. Kardam, A., Rohit Raj, K., Kumar Arora, J., Mohan Srivastava, M., Srivastava, S., **Artificial Neural Network Modeling for Sorption of Cadmium from Aqueous System by Shelled Moringa Oleifera Seed Powder as an Agricultural Waste**, *Water Res. Pr.*, 2 (2010) 339-344.
29. Yetilmezsoy, K., and Demirel, S., **Artificial neural network (ANN) approach for modeling of Pb(II) adsorption from aqueous solution by Antep pistachio (Pistacia Vera L.) shells**, *Hazard. Mater.*, 153 (2008) 1288-1300.
30. Vyas, M., et al, **Performance Forecasting of Common Effluent Treatment Plant Parameters by Artificial Neural Network**, *ARPN, Eng. Appl. Sci.*, 6 (2011) 38-42.
31. Mjalli, F.S., Al-Asheh, S., Alfadala, H.E., **Use of artificial neural network black-box modeling for the prediction of wastewater treatment plants performance**, *Environ. Manage.*, 83 (2007) 329-338.
32. Rao, J.R., Chandrababu, N.K., Muralidharan, C., Nair, B.U., Rao, P.G., Ramasamy, T., **Recouping the wastewater: a way forward for cleaner leather processing**, *Cleaner Prod.* 11 (2003) 591–599.
33. More, S.V., John, S., Rao, B.S., Nair, B.U., Laxman, R.S., **Chromium removal and reduction in COD of tannery effluents by actinomyates**, *Indian Environ. Health*, 43 (3) (2001) 108–113.

34. Cassano, A., Molinari, R., Romano, M., Drioli, E., **Treatment of aqueous effluents of the leather industry by membrane processes: a review**, *Membr. Sci.* 181 (2001) 111–126.
35. Anderson, J.A., **An Introduction to neural networks**. Prentice Hall, (2003).
36. Yusof, K.M., Idris, A., Siong, L.J., Mun, W.H., and Morad, N.A., **Artificial Neural Network Modelling Of Steady State Chemical Engineers Systems**, Malaysia-Japan Seminar on Artificial Intelligence applications in Industry, (2003) Kuala Lumpur.
37. Khataee, A.R., and Kasiri, M.B., **Modeling of Biological Water and Wastewater Treatment Processes Using Artificial Neural Networks**, *Environ. Chem.*, 39-8 (2011) 742-749.
38. Goudart, J., Giusiano, B., and Huiart, L., **Comparison of the performance of multi-layer perceptron and linear regression for epidemiological data**. *Comput. Stat. Data. Anal.*, 44 (2004) 547-70.
39. Peeva, L.G., Gibbins, E., Luthra, S.S., White, L.S., Stateva, R.P., Livingston, A.G., **Effect of concentration polarisation and osmotic pressure on flux in organic solvent nanofiltration**, *Membr. Sci.* 236 (2004) 121–136.
40. Hesampour, M., Krzyzaniak, A. and Nystrom, M., **Treatment of wastewater from metal working by ultrafiltration, considering the effects of operating conditions**, *Desalination* 222 (2012) 212-221.
41. Reynolds, T.D. and Richards, P.A., **Unit operations and processes in environmental engineering**, PWS Publishing Company, (1995).
42. Fair, G.M., Geyer, J.C., and Okun, D.A., **Water and Wastewater Engineering**, 3rd Edition, John Wiley and Sons, (2008).
43. Metcalf & Eddy Inc., **Waste water engineering, treatment and reuse**, Mc Graw Hill, (2003).
44. Anderson, M.J., Withcomb, P.J., **DOE Simplified** (Practical tools for effective experimentation, 2nd edition), Taylor & Framas Inc, (2007).
45. Sajwan, N., Rajesh, K., **Designing Aspects of Artificial Neural Network Controller**, *Int. J. Sci. Eng. Res.*, 2-4 (2011) 1-5.
46. Khayet, M., Cojocar, C., Essalhi, M., **Artificial neural network modeling and response surface methodology of desalination by reverse osmosis**, *Membr. Sci.*, 368 (2011), 202-214.

47. Mathworks, **MATLAB**, Natick, Massachusetts, (2011).
48. Martinez Delgadillo, S.A., Rodríguez Rosalez, M.G., **Wastewater treatment with MATLAB** (Tratamiento de aguas residuales con MATLAB), Editorial Reverté, Barcelona, (2005).
49. Ihme, M., Marsden, A.L., and Pitsch, H., **On the optimization of artificial neural networks for application to the approximation of chemical systems**, Center for turbulence Research, Annual Research Briefs (2006).
50. Del Brío, B.M., Molina, A.S., **Redes Neuronales y sistemas borrosos**, Alfaomega Grupo editor, SA de CV, México, (2007).
51. http://www.imta.gob.mx/cotennser/index.php?option=com_content&view=article&id=94&Itemid=84
52. Prakash, N., Manikandan S.A., Govindarajan, L., Vijayagopal, V., **Prediction of biosorption efficiency for the removal of copper (II) using artificial neural networks**; Hazard. Mater. 152: 1268 - 1275, (2008).
53. Elmolla, E.S., Chaudhuri, M., Eltoukhy, M.M., **The use of artificial neural network (ANN) for modeling of COD removal from antibiotic aqueous solution by the Fenton process**; Hazard. Mater. 179 (2010) 127-134.
54. Preetha, B. and Viruthagiri, P., **Application of response surface methodology for the biosorption of copper using Rhizopus Arrhizus**; Hazard. Mater. 143: 506 - 510, (2007).
55. Yus Azila Y., Mashitah, M.D., Bathia, S., **Process optimization studies of lead (Pb(II)) biosorption onto immobilized cells of pycnopus sanguineus using response surface methodology**; Bioresour. Technol. 99:8549-8552, (2008).
56. Ravikumar, K., **Optimization of batch process parameters using response surface methodology for a dye removal by a novel adsorbent**; Chem. Eng. J. (105): 131-138, (2004).
57. Agrawal, A., Kumari, S., and Sahu, K.K., **Iron and copper recovery/removal from industrial wastes**, a review; Ind. Eng. Chem. Res., 48: 6145-6161, (2009).
58. Gartiser, S., Hafner, C., Hercher, C., Kronenberger-Schafer, K., Paschke, A., **Whole effluent assessment of industrial wastewater for determination of BAT compliance, part 2: Metal surface treatment industry**, Environ. Sci. Pollut. Res. Int. 17-5 (2010) 1149-57.

59. Gartiser, S., et al, **Whole effluent assessment of industrial wastewater for determination of BAT compliance, part 1: Paper manufacturing industry**, Environ. Sci. Pollut. Res. Int. 17-4 (2010) 856-65.
60. ElDefrawy, N.M.H., and Shaalan, H.F., **Integrated membrane solutions for green textile industries**, Desalination 204 (2007) 241-254.
61. Luque, S., Gomez, D., and Alvarez, J.R., **Industrial applications of porous ceramic membranes (pressure driven processes)**, Membr. Sci. Technol. 13 (2008) 177-216.
62. Tang, X., Flint, S.H., Bennett, R.J., and Brooks, J.D., **The efficacy of different cleaners and sanitisers in cleaning biofilms on UF membranes used in the dairy industry**, Membr. Sci. 352 (2010) 71-75.
63. Chayya, Rai, P., Majumdar, G.C., De, S., and DasGupta, S., **Mechanism of permeate flux decline during microfiltration of water melon (Citrullus lanatus) juice**. Food Bioproc.Technol. 3 (2010) 545-553.
64. Qin, J., Wai, M.N., Oo, M.H., and Lee, H., **A pilot study for reclamation of a combined rinse from a nickel-plating operation using dual-membrane UF/RO process**, Desalination 161 (2004) 155-167.
65. Brans, G., Schroen, C.G.P.H., van der Sman, R.G.M., and Boom, R.M., **Membrane fractionation of milk: State of the art and challenges**. Membr. Sci. 352 (2010) 71-75.
66. Rai, P., Majumdar, G.C., DasGupta, S., and De, S., **Effect of various pretreatment methods on permeate flux and quality during ultrafiltration of mosambi juice**. Food Eng. 78 (2007) 561-568.
67. Garcia-Aleman, J., and Dickson, J.M ., **Mathematical modeling of nanofiltration membranes with mixed electrolyte solutions**. Membr. Sci. 235 (2004) 1-13.
68. Wankat, P.C., **Separation process engineering**, New York: Prentice Hall, 2007.
69. Porter, M.C., **Handbook of industrial membrane technology**, New Delhi, Crest Publishing House, 2005.
70. Taylor and Francis Group, **Micellar Enhanced Ultrafiltration, Fundamentals and Applications**, CRC Press, 2012.
71. Vyas, M., Nodhera, B., and Sharma, A.K., **Artificial Neural Network Based Model in Effluent Treatment Process**, Int. J. Adv. Eng. Tech., (2011) 271-275.

72. Griffiths, K.A., and Andrews, R.C., **Application of Artificial Neural Networks for Filtration Optimization**, J. Environ. Eng. 137-11 (2011) 1040-1047.
73. Alsaqqar, A.S., **Filtration modeling using artificial neural network (ANN)**, J. Eng.,17 (2011) 1-13.
74. Crittenden, J.C., Trussel, R.R., Hand, D.W., Howe, K.J., and Tchobanogious, G., **Water Treatment Principles and Design**, (2005).
75. Juahir, H., Zain, S.M., Ekhwan, M., Mokhtar, M., Man, H., **Application of Artificial Neural Network Models for Predicting Water Quality Index**, Kejuruteraan Awam 16-2 (2004) 42-55.
76. Kanani, S., Asadollahfardi, G., **Application of Artificial Neural Network to Predict Total Dissolved Solid in Achechay River Basin**. World Applied Science, 4-5 (2011) 646-654.
77. Memon, N., Unar, M.A., Ansari, A.K., Khaskheli, G.B., and Memon, B.A., **Prediction of Parametric Value of Drinking Water of Hyderabad City by Artificial Neural Networks Modeling**. WSEAS, Transactions on Environment and Development, 8-4 (2011)
78. Sivanandam, S.N., and Paulraj, M., **Introduction to Artificial Neural Networks**, Vikas Publishing House PVT LTD, New Delhi (2004).
79. Myers, R.H., Montgomery, D.C., and Anderson-Cook, C.M., **Response Surface Methodology: Process and Product Optimization using Designed Experiments**, Third Edition, J. Wiley, New Jersey (2009).
80. Khuri, A.I., and Mukhopadhyay, S., **Response Surface Methodology**, J. Wiley & Sons, (2010).
81. Murthy, Z.V.P., and Vora, M.M., **Prediction of reverse osmosis performance using artificial neural network**, Indian Chemical Technology, 11 (2004) 108-115.

APÉNDICES

APÉNDICE A – DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS EN MOI.

TABLA I

CASO 1

(pH = 12 y concentración de agente anti-incrustante = 1.0 mg/L)

Tiempo (h)	[SiO ₂] Entrada (mg/L)	[SDT] Entrada (mg/L)	[SiO ₂] Permeado (mg/L)	[SDT] Permeado (mg/L)	[SiO ₂] Rechazo (mg/L)	[SDT] Rechazo (mg/L)	Flujo Permeado (gpm)
0	19.5	1301	4	145	47.9	3935	3
1	19.1	1322	4	189	47.3	3977	3
2	18.2	1342	4	201	47	4119	3
3	19	1311	4	163	47.7	3998	3
4	18.7	1344	4	198	46.9	3945	3
5	19.2	1329	4	141	47.3	3933	3
6	19	1370	4	155	46.5	4105	3
7	19.9	1339	4	167	48.4	3961	3
8	19.1	1327	4	151	47.2	3923	3
9	20.1	1349	4	148	47.1	3904	3
10	18.7	1301	4	186	46.8	3995	3
11	19.9	1329	4	131	48	4038	3
12	18.5	1291	4	196	47.6	3942	3
13	19.4	1367	4	150	48.4	3901	3
14	20.5	1362	4	173	47.1	3981	3
15	20	1373	4	144	47.5	3992	3
16	18.7	1356	4	179	46.9	3949	3
17	19.1	1296	4	200	47.2	3912	3
18	18.5	1285	4	177	48.1	3948	3
19	19	1317	4	144	48.8	3972	3
20	19.9	1371	4	185	47.7	3964	3
21	20.3	1342	4	147	46.9	3926	3
22	18.3	1357	4	181	48.5	3940	3
23	19.1	1303	4	190	48.1	3938	3
24	19.5	1347	4	185	47.4	3947	3
25	19.9	1335	4	149	47.2	4129	3
26	20.1	1284	4	182	48.3	4102	3
27	20	1296	4	203	47.9	3971	3
28	18.7	1340	4	166	47.6	3977	3
29	18.1	1312	4	145	47.3	3918	2
30	19.9	1337	4	179	47.1	3925	2
31	20.9	1329	4	148	47.1	3986	2
32	18.6	1374	4	192	48.2	3988	2
33	19.7	1348	4	209	48.8	3943	2
34	21	1388	4	193	47.5	3968	2
35	18.5	1351	4	151	46.8	3953	2
36	20.3	1362	4	176	48.1	3996	2
37	20.5	1305	4	183	48.3	4121	2

TABLA I (Continúa)

Tiempo (h)	[SiO ₂] Entrada (mg/L)	[SDT] Entrada (mg/L)	[SiO ₂] Permeado (mg/L)	[SDT] Permeado (mg/L)	[SiO ₂] Rechazo (mg/L)	[SDT] Rechazo (mg/L)	Flujo Permeado (gpm)
38	18.9	1380	4	171	47.1	3926	2
39	19.2	1368	4	194	48.5	3974	2
40	18.1	1330	4	169	47.9	3996	2
41	19.3	1281	4	147	47.4	3982	2
42	20.7	1326	4	182	47.9	3965	2
43	18	1293	4	148	47.1	3928	2
44	18.5	1308	4	173	46.3	3904	2
45	19.1	1332	4	198	48.1	3938	2
46	21	1369	4	164	46.9	4119	2
47	20.9	1364	4	189	46.3	4003	2
48	19.7	1371	4	195	48.1	3975	2
49	19	1339	4	168	47.4	3916	2
50	19.4	1326	4	146	46.8	3945	2
51	19.9	1338	4	182	46.1	3968	2
52	20.1	1329	4	199	47.2	3978	2
53	20.9	1388	4	165	48	3951	2
54	21.2	1376	4	173	46.5	3984	2
55	19.4	1307	4	189	47.8	3972	2
56	19.9	1318	4	148	47.7	3981	2
57	19.2	1301	4	143	48.5	3944	2
58	20.1	1287	4	179	47.6	3939	2
59	18.1	1326	4	161	47.7	3986	2
60	19.6	1375	4	139	47.2	4001	2
61	19.7	1349	4	180	46.9	4104	2
62	21.1	1338	4	164	46.1	3972	2
63	20	1356	4	191	47.9	3991	2
64	21.2	1328	4	205	48.1	3929	2
65	21.4	1380	4	177	48	3941	2
66	19.1	1303	4	162	46.8	3961	2
67	19.9	1317	4	150	47.1	3972	2
68	18.9	1289	4	178	47.4	3948	2
69	21.2	1381	4	183	47.7	3934	2
70	20.8	1391	4	210	46.9	3946	2
71	20.1	1371	4	154	48.2	3980	2
72	18.8	1386	4	176	47.3	3962	2
73	19.6	1344	4	169	47.4	3948	2
74	20.1	1369	4	145	47.8	3967	2
75	18.7	1323	4	181	46.8	3944	2
76	19.9	1382	4	147	48.4	3968	2
77	18.1	1371	4	196	48.8	3985	2
78	21	1319	4	182	47.6	3932	2
79	20.6	1294	4	139	46.8	3918	2
80	20.9	1324	4	171	47.4	3904	2
81	19.7	1368	4	164	47.9	3943	2
82	19.5	1319	4	210	48	3975	2
83	19.8	1373	4	182	46.6	3951	2
84	18	1379	4	144	48.4	3992	2
85	19.8	1347	4	157	47.6	3960	2
86	19	1351	4	148	47.5	3996	1.5

TABLA I (Continúa)

Tiempo (h)	[SiO ₂] Entrada (mg/L)	[SDT] Entrada (mg/L)	[SiO ₂] Permeado (mg/L)	[SDT] Permeado (mg/L)	[SiO ₂] Rechazo (mg/L)	[SDT] Rechazo (mg/L)	Flujo Permeado (gpm)
87	18.6	1368	4	190	47.2	4123	1.5
88	20.2	1321	4	158	47.9	3986	1.5
89	18.8	1389	4	186	48.1	4164	1.5
90	19.1	1371	4	184	48.1	3963	1.5
91	20.4	1318	4	196	47.8	3912	1.5
92	18.9	1391	4	162	47.2	3969	1.5
93	21.6	1298	4	173	48.6	3918	1.5
94	20.9	1286	4	191	47.4	3938	1.5
95	21.1	1304	4	205	47.9	3984	1.5
96	21.8	1329	4	177	47.1	3927	1.5
97	21.1	1345	4	162	48.5	4108	1.5
98	20.5	1328	4	150	47.6	3927	1.5
99	19.1	1338	4	178	47.9	3967	1.5
100	19.9	1358	4	183	47.6	4089	1.5
101	19.4	1372	4	210	47	3972	1.5
102	18.5	1372	4	154	47.5	3958	1.5
103	18	1311	4	176	48,3	3916	1.5
104	19.1	1397	4	169	47.6	3927	1.5
105	18.6	1338	4	145	47.2	3914	1.5
106	18.7	1369	4	181	48.6	3903	1.5
107	19.8	1308	4	147	47.8	3952	1.5
108	21.5	1335	4	196	47.2	3985	1.5
109	20.4	1329	4	182	48.5	3965	1
110	19.9	1287	4	139	47.7	4026	1
111	19.6	1299	4	171	46.9	3998	1
112	20.3	1339	4	164	47.1	3949	1
113	20.9	1346	4	209	47.4	3981	1
114	20	1388	4	182	48.1	3943	1
115	21.4	1373	4	205	48.4	3926	1
116	18.9	1368	4	177	48.6	3919	1
117	19.2	1359	4	158	47.3	3952	1
118	18.5	1340	4	162	47.4	3991	1
119	19.8	1379	4	151	47.9	3982	1
120	20.4	1340	4	184	47.1	3973	1
121	19.6	1312	4	196	48.2	3948	1
122	18.1	1361	4	210	48.4	3940	1
123	19	1382	4	183	48.5	3902	1
124	19.2	1368	4	177	47.1	3982	1
125	19.7	1329	4	162	46.9	3953	1
126	19.9	1348	4	177	47.4	3961	1
127	20.5	1371	4	196	48	3942	1
128	19.6	1342	4	154	47.4	3913	1
129	19.1	1300	4	171	47.9	3919	1
130	20.3	1322	4	209	47.3	3957	1
131	19.1	1385	4	147	47.3	4039	1
132	19	1324	4	139	48.4	3916	1
133	18.8	1319	4	158	47.3	3941	1
134	18.2	1329	4	196	47.3	3928	1
135	18.5	1366	4	164	47.8	3946	1

TABLA I (Continúa)

Tiempo (h)	[SiO ₂] Entrada (mg/L)	[SDT] Entrada (mg/L)	[SiO ₂] Permeado (mg/L)	[SDT] Permeado (mg/L)	[SiO ₂] Rechazo (mg/L)	[SDT] Rechazo (mg/L)	Flujo Permeado (gpm)
136	19	1330	4	162	48.4	3934	1
137	19.6	1355	4	150	48.2	3968	1
138	19.1	1359	4	183	47.9	3961	1
139	19.9	1386	4	177	46.5	3934	1
140	20.4	1369	4	139	47.8	3926	1
141	19.9	1321	4	209	46.8	3997	1
142	19.5	1308	4	161	47.8	3968	1
143	19.7	1290	4	138	46.5	3929	1
144	19.1	1367	4	153	48.4	3926	1

TABLA II**CASO 2****(pH = 7 y concentración de agente anti-incrustante = 1.0 mg/L)**

Tiempo (h)	[SiO ₂] Entrada (mg/L)	[SDT] Entrada (mg/L)	[SiO ₂] Permeado (mg/L)	[SDT] Permeado (mg/L)	[SiO ₂] Rechazo (mg/L)	[SDT] Rechazo (mg/L)	Flujo Permeado (gpm)
0	19.7	1298	4	172	48.2	3958	3
1	19.1	1339	4	136	47.8	3992	3
2	20.5	1311	4	196	47.5	3939	3
3	18.4	1345	4	135	48.2	3953	3
4	18.9	1315	4	197	46.9	3981	3
5	18.3	1377	4	191	47.3	3940	3
6	19.2	1329	4	135	47.9	3901	3
7	19.5	1328	4	148	48.4	3985	3
8	19.9	1342	4	141	46.6	4104	3
9	20.6	1299	4	164	47.2	3966	3
10	20.1	1389	4	196	48.7	3911	3
11	21.1	1326	4	135	47.2	3948	3
12	18.4	1351	4	176	47.9	3931	3
13	18.7	1379	4	136	48.3	3986	3
14	18.2	1325	4	155	47.9	3996	3
15	18.8	1378	4	187	47	3919	3
16	19.1	1326	4	161	47.5	3950	3
17	19.6	1317	4	143	47.2	4167	3
18	21.2	1336	4	152	48.2	4083	3
19	20.8	1364	4	149	47.3	4107	3
20	20.2	1348	4	209	47.8	4148	3
21	19.8	1372	4	186	47.3	4056	3
22	19.4	1352	4	175	47.6	3904	3
23	18.5	1366	4	188	47.8	4001	3
24	19.6	1368	4	206	48.8	3973	3
25	19.2	1392	4	218	48.2	3921	3
26	20.4	1381	4	133	47.2	3949	3
27	20.1	1317	4	177	46.6	3922	3
28	20.9	1333	4	131	46.8	3916	3
29	21.1	1369	4	201	47.7	3989	3
30	20.5	1329	4	143	47.1	3937	3
31	20.2	1316	4	197	47.5	3999	2.5
32	20.4	1378	4	182	47.9	4073	2.5
33	18.4	1362	4	179	48.4	4013	2.5
34	18.2	1375	4	193	48.1	4009	2.5
35	18.8	1318	4	169	47.8	3994	2.5
36	18.4	1299	4	204	48.8	3918	2.5
37	19.7	1377	4	139	47.4	3974	2.5

TABLA II (Continúa)

Tiempo (h)	[SiO ₂] Entrada (mg/L)	[SDT] Entrada (mg/L)	[SiO ₂] Permeado (mg/L)	[SDT] Permeado (mg/L)	[SiO ₂] Rechazo (mg/L)	[SDT] Rechazo (mg/L)	Flujo Permeado (gpm)
38	19.2	1369	4	185	47.9	3986	2.5
39	19.9	1355	4	179	47.6	3928	2.5
40	19.3	1342	4	146	48.4	3983	2.5
41	20.3	1318	4	152	47.6	3918	2.5
42	20.7	1326	4	170	47.2	3900	2.5
43	20.9	1336	4	138	47.9	3898	2.5
44	21	1307	4	172	47	3935	2.5
45	20.2	1323	4	205	47.4	3992	2.5
46	20.7	1311	4	199	47.6	4009	2.5
47	20.1	1336	4	141	48.4	4136	2.5
48	18.9	1321	4	156	47.7	3975	2.5
49	18.4	1364	4	167	46.9	3989	2.5
50	18.5	1359	4	138	46.6	3939	2.5
51	19.9	1342	4	199	47.3	3943	2.5
52	19.4	1339	4	209	47.8	3977	2.5
53	19.6	1370	4	168	48.7	3943	2.5
54	18.5	1358	4	139	47.6	4010	2.5
55	18.9	1342	4	172	47.2	4104	2.5
56	18.2	1329	4	143	47.9	3995	2.5
57	19.4	1330	4	178	48.6	3972	2.5
58	19.1	1314	4	202	47.2	3946	2.5
59	20.9	1328	4	196	46.6	3979	2.5
60	21.3	1351	4	211	47.2	3988	2.5
61	18.2	1320	4	163	46.4	4087	2.5
62	18.8	1300	4	177	47.3	4024	2.5
63	19.4	1317	4	136	47.9	3915	2.5
64	20.1	1364	4	191	47.4	3895	2.5
65	20.9	1351	4	172	47.4	4101	2.5
66	19.5	1324	4	163	48.2	4138	2.5
67	19.2	1312	4	174	46.9	4032	2.5
68	18.8	1331	4	207	47.6	4069	2.5
69	18.4	1359	4	195	47	4177	2.5
70	18.7	1318	4	176	47.8	4035	2.5
71	21.2	1288	4	183	47.2	4022	2.5
72	20.9	1325	4	180	48.1	4105	2.5
73	20.2	1342	4	192	47.3	4008	2.5
74	19.9	1380	4	163	48.5	3993	2.5
75	18.5	1303	4	175	47.8	3930	2.5
76	19.7	1377	4	200	47.4	4045	2
77	18.9	1306	4	139	47.8	4072	2
78	20.3	1286	4	171	47.4	4017	2
79	20.8	1345	4	183	47.1	4004	2
80	20	1377	4	192	47.2	4037	2
81	18.5	1351	4	144	47.9	4079	2
82	18.8	1322	4	149	47.4	3928	2
83	18.2	1334	4	182	48.2	3975	2
84	18	1345	4	162	47.6	3934	2
85	19.6	1305	4	184	47.4	3963	2
86	19.9	1302	4	137	47.8	3949	2

TABLA II (Continúa)

Tiempo (h)	[SiO ₂] Entrada (mg/L)	[SDT] Entrada (mg/L)	[SiO ₂] Permeado (mg/L)	[SDT] Permeado (mg/L)	[SiO ₂] Rechazo (mg/L)	[SDT] Rechazo (mg/L)	Flujo Permeado (gpm)
87	19.2	1342	4	191	46.5	3982	2
88	19	1376	4	135	47.8	3950	2
89	18.6	1311	4	168	47.3	3897	2
90	20.2	1323	4	193	47.1	3936	2
91	20.5	1379	4	148	47.6	3968	2
92	20.2	1357	4	194	47.7	3994	2
93	20.9	1372	4	137	47.5	3941	2
94	20.5	1332	4	159	48.4	3912	2
95	21.3	1298	4	145	47.3	4107	2
96	19.7	1352	4	136	47.1	4119	2
97	19.2	1323	4	143	47.9	4046	2
98	19.8	1341	4	138	47.5	4084	2
99	18.1	1352	4	185	48.2	4075	2
100	18.7	1327	4	162	48.4	4143	2
101	18.3	1332	4	208	48	4056	1.5
102	18.9	1375	4	196	47.8	4081	1.5
103	20.2	1351	4	146	48.5	4125	1.5
104	19.3	1343	4	151	47.2	4106	1.5
105	20.5	1344	4	147	47.4	4166	1.5
106	20.9	1302	4	181	48.2	3946	1.5
107	19.9	1311	4	156	47.1	3983	1.5
108	21.1	1337	4	173	47.8	3991	1.5
109	20.2	1375	4	146	47	4008	1.5
110	20.8	1307	4	183	47.6	4046	1.5
111	19.9	1359	4	199	47.9	4063	1.5
112	19.2	1307	4	142	47.2	4099	1.5
113	19.7	1344	4	166	48.1	4159	1.5
114	20.5	1292	4	181	48.5	4006	1.5
115	18.2	1338	4	158	48.4	3993	1.5
116	18.5	1294	4	182	48.2	3975	1.5
117	18.7	1351	4	188	47.3	4047	1.5
118	19.5	1319	4	167	47.2	4092	1.5
119	19.2	1366	4	181	47.6	4043	1.5
120	19.9	1353	4	142	47.3	4055	1.5
121	20	1350	4	189	46.4	4082	1.5
122	20.6	1318	4	211	46.6	4077	1.5
123	20.1	1323	4	146	46.8	4036	1.5
124	20.2	1354	4	172	48	4000	1.5
125	18.9	1322	4	176	47.4	3985	1.5
126	18.7	1373	4	184	47.2	3914	1.3
127	18	1323	4	141	47.5	3938	1.3
128	19.4	1347	4	184	47.9	3986	1.3
129	19.2	1322	4	173	47.2	4003	1.3
130	18.3	1357	4	163	48.3	4087	1.3
131	18.8	1301	4	192	47.2	4071	1.3
132	19.9	1380	4	183	47.5	4024	1.3
133	21.2	1302	4	142	47.9	4067	1.3
134	20.8	1339	4	167	47.2	4082	1.3
135	20.3	1310	4	135	47.4	3994	1.3

TABLA II (Continúa)

Tiempo (h)	[SiO ₂] Entrada (mg/L)	[SDT] Entrada (mg/L)	[SiO ₂] Permeado (mg/L)	[SDT] Permeado (mg/L)	[SiO ₂] Rechazo (mg/L)	[SDT] Rechazo (mg/L)	Flujo Permeado (gpm)
136	21	1329	4	182	46.9	3990	1.3
137	20.5	1318	4	215	47.1	3927	1.3
138	19.1	1308	4	145	46.6	4072	1.3
139	20.9	1314	4	164	47.8	4069	1.3
140	20.3	1376	4	133	47.2	4017	1.3
141	20.1	1342	4	185	46.8	4034	1.3
142	19.8	1319	4	158	48.1	3978	1.3
143	19.4	1372	4	199	47.9	3937	1.3
144	18.9	1333	4	205	47.4	3981	1.3

TABLA III

CASO 3
(pH = 12 y concentración de agente anti-incrustante = 3.0 mg/L)

Tiempo (h)	[SiO ₂] Entrada (mg/L)	[SDT] Entrada (mg/L)	[SiO ₂] Permeado (mg/L)	[SDT] Permeado (mg/L)	[SiO ₂] Rechazo (mg/L)	[SDT] Rechazo (mg/L)	Flujo Permeado (gpm)
0	19.5	1373	4	144	46.8	3981	3
1	19.2	1318	4	161	47.4	3932	3
2	19.9	1279	4	172	47.9	3945	3
3	20.6	1298	4	139	48.4	3998	3
4	18.9	1345	4	198	48.8	4152	3
5	19.4	1316	4	205	46.5	4108	3
6	18.3	1369	4	182	47.1	3911	3
7	19.7	1371	4	165	47.7	3989	3
8	19.1	1299	4	142	47.2	3897	3
9	19.6	1308	4	174	48.5	4056	3
10	19.9	1366	4	149	46.6	4127	3
11	20.4	1324	4	191	47.8	4077	3
12	20.8	1341	4	138	47.2	3935	3
13	19.6	1378	4	208	48.7	3982	3
14	21.3	1314	4	141	46.9	3923	3
15	20.5	1385	4	172	47.1	3902	3
16	19.9	1374	4	197	47.7	3998	3
17	20.7	1361	4	211	47.9	4081	3
18	20	1322	4	187	48.8	4016	3
19	20.8	1294	4	139	48.2	3944	3
20	21.4	1311	4	176	46.6	4007	3
21	20.3	1335	4	194	48	4039	3
22	21.5	1377	4	146	47.2	4081	3
23	19.6	1303	4	179	47.9	3917	3
24	19.2	1359	4	199	47.6	3972	3
25	19.5	1346	4	154	48.9	3928	3
26	19.8	1381	4	213	46.9	3978	3
27	20.6	1372	4	148	46.5	4087	3
28	20.2	1339	4	176	47.5	4035	3
29	21.6	1328	4	182	47.1	3997	3
30	21.1	1376	4	192	47.4	3898	3
31	20.4	1308	4	217	46.8	4086	3
32	20.2	1293	4	146	48.8	4157	3
33	21.4	1328	4	183	47.3	4123	3
34	20.1	1319	4	195	46.7	4048	3
35	19.2	1398	4	219	48.4	4013	3
36	19.8	1375	4	142	47.3	3992	3
37	19.4	1346	4	176	47.2	3924	3

TABLA III (Continúa)

Tiempo (h)	[SiO ₂] Entrada (mg/L)	[SDT] Entrada (mg/L)	[SiO ₂] Permeado (mg/L)	[SDT] Permeado (mg/L)	[SiO ₂] Rechazo (mg/L)	[SDT] Rechazo (mg/L)	Flujo Permeado (gpm)
38	18.4	1314	4	184	48.4	3972	3
39	18.2	1362	4	203	46.7	3991	3
40	18.9	1380	4	148	48.1	4087	3
41	20.9	1289	4	163	47.3	4003	3
42	18.3	1317	4	135	47.7	4123	3
43	20.2	1345	4	188	48.2	4100	3
44	18.9	1374	4	204	46.7	3984	3
45	19.8	1348	4	157	47.8	3937	3
46	21.5	1336	4	162	48.5	3958	3
47	20.2	1381	4	191	46.4	3921	3
48	19.1	1323	4	143	46.8	3946	3
49	18.3	1295	4	212	48.8	3995	3
50	18.7	1337	4	202	47.3	4049	3
51	19.5	1318	4	199	47.9	4078	3
52	19.1	1376	4	165	47.2	4002	3
53	18.7	1339	4	183	46.9	4174	2
54	20.9	1345	4	196	48.8	3996	2
55	19.4	1381	4	211	46.7	3914	2
56	21.7	1297	4	151	46.8	3947	2
57	20.3	1344	4	179	47.8	3951	2
58	18.1	1389	4	145	47.1	3973	2
59	21.7	1316	4	162	47.9	3982	2
60	18.9	1375	4	184	46.4	3929	2
61	21.2	1362	4	217	48.9	3986	2
62	18.3	1351	4	205	47.7	4041	2
63	19.8	1324	4	199	48.8	4089	2
64	19.2	1380	4	162	47	4067	2
65	19.8	1302	4	177	47.2	4025	2
66	19.3	1333	4	182	48.1	4004	2
67	21.2	1359	4	195	46.5	4153	2
68	18.9	1352	4	207	46.9	4105	2
69	19.7	1378	4	140	48.2	4030	2
70	18.5	1309	4	179	47.3	4069	2
71	19.2	1321	4	162	47.1	4157	2
72	19.9	1376	4	189	47.4	3916	2
73	20.5	1328	4	155	47.9	3897	2
74	20.9	1372	4	187	46.6	3999	2
75	21.1	1361	4	218	47.5	3981	2
76	20.4	1326	4	221	46.5	3914	2
77	20.1	1346	4	141	47.1	3979	2
78	18.7	1318	4	175	47.9	4092	2
79	19.4	1368	4	188	47.7	4069	2
80	18.2	1333	4	172	48.8	4013	2
81	19	1321	4	180	48	4029	2
82	18.3	1282	4	201	47.3	3925	2
83	20.6	1311	4	133	47.8	3977	2
84	19.9	1381	4	178	46.8	3962	2
85	20.5	1355	4	151	47.1	4128	2
86	18.1	1328	4	167	48.7	4075	2

TABLA III (Continúa)

Tiempo (h)	[SiO ₂] Entrada (mg/L)	[SDT] Entrada (mg/L)	[SiO ₂] Permeado (mg/L)	[SDT] Permeado (mg/L)	[SiO ₂] Rechazo (mg/L)	[SDT] Rechazo (mg/L)	Flujo Permeado (gpm)
87	19.3	1347	4	196	46.9	4016	2
88	20.9	1338	4	204	47.3	4172	2
89	20.1	1322	4	146	47.8	3933	2
90	21.4	1306	4	163	47.4	3948	2
91	21.6	1375	4	192	46.7	3980	2
92	20.3	1298	4	200	48.5	3931	2
93	20.9	1320	4	139	47.4	3917	2
94	20.5	1373	4	182	47.9	4052	2
95	19.8	1344	4	177	47.4	4096	2
96	19.2	1365	4	161	47.5	4128	2
97	19.6	1307	4	189	48.8	4063	2
98	18.3	1364	4	209	46.5	4044	2
99	18.8	1336	4	218	46.9	3993	2
100	19.9	1371	4	171	47.3	3972	2
101	21.4	1285	4	150	46.8	3921	2
102	19.2	1377	4	134	48.3	4098	2
103	20.6	1348	4	221	48.9	4027	1.8
104	18.6	1375	4	181	47.9	4035	1.8
105	20.3	1328	4	176	48.4	3994	1.8
106	18.8	1366	4	199	47.9	3925	1.8
107	19.5	1312	4	138	46.8	3919	1.8
108	20.7	1338	4	171	47.5	4008	1.8
109	21.4	1378	4	137	47.2	4078	1.8
110	21.1	1346	4	204	48.4	4157	1.8
111	20.3	1318	4	166	47.1	4102	1.8
112	19.4	1306	4	184	46.9	4009	1.8
113	21.1	1379	4	195	48.4	4074	1.8
114	20.4	1325	4	179	46.6	4083	1.8
115	20.2	1329	4	196	47.9	4124	1.8
116	19.9	1372	4	151	48.2	3918	1.8
117	19.2	1343	4	215	47.6	3979	1.8
118	19.4	1371	4	187	47.8	3985	1.8
119	18.8	1288	4	154	46.8	3895	1.8
120	18.9	1309	4	167	47.8	4083	1.8
121	20.6	1378	4	139	47.4	4063	1.8
122	19.7	1360	4	194	47.5	4021	1.8
123	19.2	1377	4	148	47.9	3976	1.8
124	19.1	1361	4	153	48.5	3998	1.8
125	18.7	1318	4	184	48.9	4057	1.8
126	18.2	1382	4	169	48.2	4031	1.5
127	18.9	1355	4	205	47.2	4089	1.5
128	20.9	1362	4	172	48.1	4175	1.5
129	20.6	1347	4	148	46.7	3944	1.5
130	21.2	1299	4	179	48.9	3912	1.5
131	20.8	1349	4	142	47.2	3907	1.5
132	21.5	1350	4	167	47.8	3976	1.5
133	20.6	1318	4	219	47.5	3943	1.5
134	18.4	1364	4	186	47.8	4082	1.5
135	21.4	1372	4	143	47	4033	1.5

TABLA III (Continúa)

Tiempo (h)	[SiO ₂] Entrada (mg/L)	[SDT] Entrada (mg/L)	[SiO ₂] Permeado (mg/L)	[SDT] Permeado (mg/L)	[SiO ₂] Rechazo (mg/L)	[SDT] Rechazo (mg/L)	Flujo Permeado (gpm)
136	19.8	1305	4	187	46.8	4171	1.5
137	19.2	1328	4	202	48.5	4096	1.5
138	19.9	1368	4	149	48.2	4023	1.5
139	20.2	1300	4	183	47.8	4097	1.5
140	20.9	1365	4	146	47.1	4134	1.5
141	19.2	1292	4	182	48.7	3942	1.5
142	20.4	1357	4	179	46.4	3968	1.5
143	19.8	1326	4	209	47.8	3915	1.5
144	19.9	1354	4	196	48.6	3917	1.5

TABLA IV

CASO 4

(pH = 7 y concentración de agente anti-incrustante = 3.0 mg/L)

Tiempo (h)	[SiO ₂] Entrada (mg/L)	[SDT] Entrada (mg/L)	[SiO ₂] Permeado (mg/L)	[SDT] Permeado (mg/L)	[SiO ₂] Rechazo (mg/L)	[SDT] Rechazo (mg/L)	Flujo Permeado (gpm)
0	20.6	1317	4	175	47	3941	3
1	18.1	1342	4	155	47.4	3905	3
2	19	1311	4	141	48.3	4120	3
3	19.5	1301	4	163	48.9	4012	3
4	18.3	1390	4	149	47.5	4099	3
5	18	1330	4	169	47.1	3895	3
6	18.9	1379	4	150	48.2	3976	3
7	19.2	1395	4	174	48.7	4105	3
8	20.4	1351	4	147	46.9	4011	3
9	21	1295	4	136	47.1	3946	3
10	19.1	1315	4	166	46.5	4123	3
11	20.6	1281	4	151	47.4	4095	3
12	19	1339	4	187	48.1	3899	3
13	18.5	1346	4	161	48.6	4105	3
14	18.9	1379	4	152	47.5	4176	3
15	18.1	1301	4	190	46.9	4101	3
16	19.6	1323	4	181	47.3	3933	3
17	20.1	1286	4	173	47.8	3990	3
18	19.9	1325	4	145	48.5	4075	3
19	20.8	1366	4	180	46.9	4001	3
20	18.7	1308	4	205	47.7	4121	3
21	18.4	1360	4	177	47	4101	3
22	21.3	1293	4	191	48.1	3913	3
23	20.6	1314	4	156	48.4	3990	3
24	18	1342	4	148	47.6	4008	3
25	18.6	1370	4	163	47.1	4118	3
26	18	1385	4	178	46.9	4102	3
27	19.5	1306	4	155	48.6	4004	3
28	20.4	1391	4	197	48.1	3998	3
29	19	1300	4	144	46.9	4170	3
30	18.1	1287	4	160	47.9	4096	3
31	19.7	1311	4	138	47.6	4009	3
32	19.9	1352	4	149	48.1	3998	3
33	18.4	1391	4	188	47.5	4083	3
34	20.2	1311	4	220	48.2	4010	3
35	19.7	1324	4	155	47.2	4131	3
36	21	1366	4	133	47.4	4090	3
37	21.3	1380	4	145	47.9	3919	3

TABLA IV (Continúa)

Tiempo (h)	[SiO ₂] Entrada (mg/L)	[SDT] Entrada (mg/L)	[SiO ₂] Permeado (mg/L)	[SDT] Permeado (mg/L)	[SiO ₂] Rechazo (mg/L)	[SDT] Rechazo (mg/L)	Flujo Permeado (gpm)
38	19.4	1301	4	177	47.1	3985	3
39	20.7	1315	4	161	48.1	4017	3
40	18.1	1290	4	185	48.7	3904	3
41	18.9	1309	4	162	47.1	4116	3
42	21.2	1395	4	153	47.8	4019	3
43	19.4	1361	4	197	48.5	4101	3
44	19.9	1299	4	182	47	3899	3
45	18.5	1338	4	202	47.9	3978	3
46	18	1376	4	149	48.5	4125	3
47	21.7	1359	4	170	47.9	4015	3
48	20	1397	4	151	47.5	4029	3
49	19.2	1315	4	140	47.4	4091	3
50	19.9	1361	4	163	47.9	3920	3
51	19.4	1309	4	170	47.1	3986	3
52	20.5	1323	4	178	48.1	4028	3
53	19.1	1311	4	149	48.7	3914	3
54	19.8	1300	4	155	47.1	4115	3
55	18.3	1347	4	203	47.8	4021	3
56	18.9	1292	4	198	48.5	4111	3
57	18.6	1299	4	183	47.1	3901	3
58	20.7	1360	4	145	47.8	3979	3
59	19.5	1337	4	198	48.3	4120	3
60	19.1	1390	4	159	47.6	4019	3
61	19.1	1381	4	154	47	4030	3
62	19.6	1361	4	139	47.2	4120	3
63	20.9	1301	4	161	46.8	4113	3
64	20.3	1398	4	187	48.5	4014	3
65	21	1333	4	186	48.2	3999	3
66	20.6	1285	4	211	46.9	4175	3
67	20.1	1317	4	160	48	4095	3
68	18.7	1339	4	139	47.6	4010	3
69	19	1362	4	175	48.1	3988	3
70	19.5	1389	4	160	47.6	4085	3
71	19.1	1300	4	146	48.3	4011	3
72	19	1309	4	149	47.3	4131	3
73	19	1330	4	150	47.7	4020	3
74	19.9	1385	4	162	46.9	4031	3
75	19.8	1301	4	169	47.1	4119	2.9
76	19.1	1393	4	177	46.7	4114	2.9
77	20.4	1300	4	150	48.4	4016	2.8
78	18.6	1289	4	199	48.1	4000	2.8
79	19	1351	4	204	47	4176	2.8
80	19.9	1370	4	140	47.9	4091	2.8
81	19.7	1393	4	195	47.5	4019	2.8
82	18.1	1306	4	130	48	3993	2.8
83	20.9	1311	4	185	47.7	4087	2.7
84	20.1	1324	4	209	48.2	4021	2.7
85	19.6	1296	4	199	47.2	4125	2.7
86	19.8	1291	4	169	47.3	4093	2.7

TABLA IV (Continúa)

Tiempo (h)	[SiO ₂] Entrada (mg/L)	[SDT] Entrada (mg/L)	[SiO ₂] Permeado (mg/L)	[SDT] Permeado (mg/L)	[SiO ₂] Rechazo (mg/L)	[SDT] Rechazo (mg/L)	Flujo Permeado (gpm)
87	19.1	1330	4	151	47.8	3929	2.7
88	19.8	1392	4	143	47.2	3987	2.7
89	19.6	1303	4	136	48.2	4029	2.7
90	19	1311	4	171	48.6	3916	2.6
91	20.7	1390	4	185	47.3	4117	2.6
92	20	1346	4	202	47.7	4024	2.6
93	18.5	1381	4	148	48.4	4110	2.6
94	19.4	1322	4	193	47.2	3903	2.6
95	19.8	1289	4	167	47.5	3978	2.5
96	19.6	1362	4	171	48	4119	2.5
97	18.5	1303	4	139	48.1	4023	2.5
98	19.1	1351	4	181	47.1	4124	2.5
99	19.7	1360	4	207	47.4	4094	2.5
100	18.9	1347	4	188	47.1	3929	2.5
101	19.6	1312	4	161	47.9	3988	2.4
102	19	1385	4	145	48.1	4001	2.4
103	18.1	1370	4	151	48.9	3918	2.4
104	18.6	1322	4	140	47.2	4120	2.4
105	19.4	1353	4	182	46.9	4025	2.4
106	20.6	1312	4	200	48.3	4115	2.4
107	20.9	1291	4	135	47.1	3905	2.3
108	20	1309	4	181	47.5	3979	2.3
109	19.7	1363	4	159	48.3	4120	2.3
110	20.3	1315	4	162	47	4025	2.2
111	21.1	1377	4	151	46.7	4035	2.2
112	21	1321	4	169	47.9	4118	2.2
113	19	1366	4	178	46.7	4115	2.2
114	19.8	1300	4	195	48.3	4016	2.2
115	18.6	1324	4	136	48	4005	2.2
116	19.5	1287	4	201	47.3	4179	2.1
117	20.3	1335	4	207	47	4093	2.1
118	21.1	1297	4	145	47.8	4020	2.1
119	19.8	1344	4	198	47.3	3998	2.1
120	19.5	1319	4	160	48	4088	2
121	18.9	1370	4	215	47.6	3981	2
122	19.6	1342	4	161	48	4119	2
123	19.1	1315	4	138	47.5	4027	2
124	19.8	1330	4	151	46.8	4041	2
125	20.7	1303	4	183	47.7	4121	2
126	20	1291	4	170	46.9	4101	2
127	21.3	1351	4	179	48.5	4021	2
128	20.1	1385	4	151	48.1	4026	2
129	19.8	1361	4	192	47.2	4009	1.9
130	19.1	1311	4	138	47	4175	1.9
131	19.9	1297	4	161	47.7	4095	1.9
132	18.6	1392	4	204	47.9	4028	1.9
133	19	1285	4	162	47.2	3995	1.9
134	19.8	1317	4	199	47.9	4081	1.9
135	20.5	1300	4	151	48	4025	1.9

TABLA IV (Continúa)

Tiempo (h)	[SiO ₂] Entrada (mg/L)	[SDT] Entrada (mg/L)	[SiO ₂] Permeado (mg/L)	[SDT] Permeado (mg/L)	[SiO ₂] Rechazo (mg/L)	[SDT] Rechazo (mg/L)	Flujo Permeado (gpm)
136	19.1	1352	4	141	47.5	4119	1.9
137	21	1309	4	169	47.1	4099	1.9
138	20.3	1281	4	171	47.4	3934	1.9
139	19.4	1299	4	149	48.1	3979	1.9
140	19.7	1346	4	135	48.2	4007	1.8
141	18.9	1335	4	161	48.8	3917	1.8
142	19.3	1289	4	178	47.5	4125	1.8
143	18.7	1338	4	139	46.8	4027	1.8
144	20.9	1321	4	196	48.1	3906	1.8

TABLA V

CASO 5

(pH = 4 y concentración de agente anti-incrustante = 1.0 mg/L)

Tiempo (h)	[SiO ₂] Entrada (mg/L)	[SDT] Entrada (mg/L)	[SiO ₂] Permeado (mg/L)	[SDT] Permeado (mg/L)	[SiO ₂] Rechazo (mg/L)	[SDT] Rechazo (mg/L)	Flujo Permeado (gpm)
0	19.4	1370	4	96	46	4071	3
1	21	1339	4	113	49	3960	3
2	20.9	1327	4	101	48	4175	3
3	19.7	1349	4	98	46	4067	3
4	19	1301	4	102	47	4154	3
5	19.2	1329	4	97	46	3950	3
6	19.9	1291	4	123	49	4031	3
7	20.1	1367	4	115	47	4160	3
8	20.9	1362	4	99	46	4066	3
9	21	1373	4	114	48	4001	3
10	19.4	1356	4	111	47	4178	3
11	19.9	1296	4	121	46	4150	3
12	19.2	1285	4	118	48	3954	3
13	20.1	1317	4	109	47	4160	3
14	18.1	1371	4	120	49	4231	3
15	19.6	1342	4	98	46	4156	3
16	19.7	1357	4	103	47	3988	3
17	21.1	1303	4	115	49	4045	3
18	20.2	1347	4	105	46	4130	3
19	21.2	1335	4	97	48	4056	3
20	21.4	1284	4	111	46	4176	3
21	19.1	1296	4	119	47	4156	3
22	19.9	1340	4	102	48	3968	3
23	18.5	1312	4	112	46	4045	3
24	21.2	1337	4	123	47	4071	3
25	20.8	1329	4	120	49	4181	3
26	20.1	1374	4	101	46	4157	3
27	18.8	1348	4	115	48	4067	3
28	19.6	1388	4	124	49	4061	3
29	20.1	1351	4	114	47	4233	3
30	18.2	1362	4	119	46	4159	3
31	19.9	1305	4	100	47	4072	3
32	18.1	1380	4	125	48	4061	3
33	21	1368	4	107	48	4146	3
34	20.6	1330	4	96	46	4073	3
35	20.9	1281	4	106	46	4194	3
36	19.7	1326	4	100	49	4153	3
37	19.5	1293	4	116	48	3982	3

TABLA V (Continúa)

Tiempo (h)	[SiO ₂] Entrada (mg/L)	[SDT] Entrada (mg/L)	[SiO ₂] Permeado (mg/L)	[SDT] Permeado (mg/L)	[SiO ₂] Rechazo (mg/L)	[SDT] Rechazo (mg/L)	Flujo Permeado (gpm)
38	19.8	1308	4	104	47	4048	3
39	18.9	1332	4	121	46	4080	3
40	19.8	1369	4	109	49	3967	3
41	19	1364	4	101	46	4179	3
42	18.6	1371	4	120	46	4082	3
43	20.2	1339	4	105	47	4164	3
44	18.8	1326	4	97	48	3962	3
45	19.1	1338	4	114	49	4041	3
46	20.4	1329	4	111	46	4188	3
47	18.3	1388	4	118	47	4078	3
48	21.6	1376	4	98	47	4092	3
49	20.9	1307	4	119	46	4150	3
50	21.1	1301	4	102	49	3979	3
51	19.9	1322	4	120	48	4045	3
52	20.1	1342	4	100	46	4087	3
53	20.9	1311	4	106	48	3973	3
54	21.2	1344	4	100	48	4174	3
55	19.4	1329	4	123	46	4076	3
56	19.9	1373	4	120	47	4170	3
57	19	1379	4	101	46	3960	3
58	20.1	1347	4	115	49	4038	3
59	18.1	1351	4	124	46	4179	3
60	19.6	1368	4	114	47	4078	3
61	19.7	1321	4	119	48	4089	3
62	21.1	1389	4	100	49	4179	3
63	20	1371	4	125	46	4172	3
64	20.8	1318	4	107	48	4073	3
65	21.4	1391	4	96	47	4058	3
66	19.1	1298	4	106	46	4234	3
67	19.9	1286	4	100	47	4154	3
68	18.9	1304	4	106	48	4069	3
69	21.2	1329	4	115	46	4047	3
70	20.8	1345	4	101	47	4144	3
71	20.1	1328	4	120	46	4070	3
72	18.4	1338	4	123	47	4192	3
73	19.6	1358	4	100	46	4081	3
74	20.1	1372	4	106	48	4092	3
75	18.7	1372	4	114	49	4180	3
76	19.9	1311	4	125	46	4175	3
77	18.1	1397	4	111	48	4077	3
78	21	1338	4	101	46	4061	3
79	20.6	1369	4	109	47	4237	3
80	20.9	1308	4	121	46	4152	3
81	19.7	1335	4	99	48	4080	3
82	19.5	1329	4	105	49	4054	2.9
83	19.4	1287	4	110	46	4148	2.9
84	18	1299	4	101	47	4082	2.8
85	19.8	1339	4	123	48	4186	2.8
86	19	1346	4	119	46	4154	2.7

TABLA V (Continúa)

Tiempo (h)	[SiO ₂] Entrada (mg/L)	[SDT] Entrada (mg/L)	[SiO ₂] Permeado (mg/L)	[SDT] Permeado (mg/L)	[SiO ₂] Rechazo (mg/L)	[SDT] Rechazo (mg/L)	Flujo Permeado (gpm)
87	18.6	1388	4	95	47	3990	2.7
88	20.2	1373	4	100	48	4048	2.7
89	18.7	1368	4	110	47	4090	2.6
90	19.1	1359	4	108	48	3977	2.6
91	20.2	1340	4	115	46	4178	2.5
92	18.9	1379	4	111	49	4085	2.5
93	21.6	1340	4	119	47	4171	2.5
94	20.9	1312	4	113	46	3964	2.4
95	21.1	1361	4	122	48	4039	2.4
96	21.8	1382	4	120	49	4174	2.4
97	21.3	1368	4	102	46	4078	2.4
98	20.4	1329	4	109	46	4179	2.3
99	19.1	1348	4	97	47	4149	2.3
100	19.9	1371	4	119	47	3984	2.3
101	19.4	1342	4	113	47	4043	2.2
102	18.5	1300	4	104	48	4056	2.2
103	18	1322	4	113	47	3973	2.2
104	19.1	1385	4	124	46	4175	2.2
105	19.2	1324	4	112	47	4080	2.2
106	19.1	1319	4	118	47	4170	2.2
107	18.2	1329	4	110	48	3960	2.1
108	19	1366	4	101	49	4034	2.1
109	18.7	1330	4	114	46	4175	2.1
110	19.2	1355	4	106	47	4080	2.1
111	19	1359	4	117	48	4090	2
112	19.9	1386	4	100	48	4173	2
113	19.1	1369	4	109	46	4170	2
114	20.1	1321	4	95	47	4071	2
115	18.1	1308	4	99	48	4060	2
116	19.9	1290	4	116	49	4234	2
117	18.5	1367	4	111	46	4148	2
118	19.4	1318	4	119	47	4075	2
119	20.2	1301	4	123	49	4053	2
120	20	1287	4	117	46	4146	2
121	18.7	1326	4	121	46	4039	1.9
122	19.1	1375	4	111	46	4177	1.9
123	18.5	1349	4	115	47	4085	1.9
124	19	1338	4	101	47	4099	1.9
125	19.9	1356	4	109	48	4179	1.9
126	20.7	1328	4	104	46	4159	1.9
127	18.3	1380	4	98	47	4079	1.9
128	19.1	1303	4	118	47	4084	1.9
129	19.5	1317	4	111	46	4067	1.9
130	19.9	1289	4	123	46	4233	1.9
131	20.1	1381	4	115	47	4153	1.9
132	20	1391	4	111	47	4086	1.9
133	18.7	1371	4	100	48	4053	1.9
134	18.1	1386	4	116	47	4139	1.9
135	19.9	1344	4	104	47	4083	1.9

TABLA V (Continúa)

Tiempo (h)	[SiO ₂] Entrada (mg/L)	[SDT] Entrada (mg/L)	[SiO ₂] Permeado (mg/L)	[SDT] Permeado (mg/L)	[SiO ₂] Rechazo (mg/L)	[SDT] Rechazo (mg/L)	Flujo Permeado (gpm)
136	19.9	1369	4	122	46	4177	1.9
137	20.5	1323	4	106	48	4157	1.9
138	18.6	1382	4	112	49	3992	1.9
139	19.7	1371	4	119	49	4037	1.9
140	21	1319	4	103	49	4065	1.9
141	18.5	1294	4	108	49	3975	1.9
142	20.1	1324	4	96	49	4183	1.9
143	20.5	1368	4	120	46	4085	1.9
144	18.3	1319	4	117	47	3964	1.9

TABLA VI

CASO 6

(pH = 4 y concentración de agente anti-incrustante = 3.0 mg/L)

Tiempo (h)	[SiO ₂] Entrada (mg/L)	[SDT] Entrada (mg/L)	[SiO ₂] Permeado (mg/L)	[SDT] Permeado (mg/L)	[SiO ₂] Rechazo (mg/L)	[SDT] Rechazo (mg/L)	Flujo Permeado (gpm)
0	19.6	1370	4	59	49	4054	3
1	19.3	1283	4	68	48	4028	3
2	21	1375	4	81	49	4233	3
3	18.9	1362	4	73	50	4129	3
4	19.7	1378	4	77	49	4204	3
5	18.1	1330	4	63	49	4040	3
6	19.2	1366	4	55	49	4111	3
7	19.9	1311	4	84	50	4212	3
8	20.5	1352	4	72	49	4116	3
9	20.9	1378	4	79	49	4091	3
10	21.3	1346	4	61	49	4217	3
11	20.4	1318	4	82	49	4200	3
12	20.1	1310	4	75	50	4034	3
13	19.1	1379	4	79	50	4215	3
14	19.4	1325	4	66	50	4261	3
15	18.2	1333	4	63	49	4206	3
16	19	1372	4	78	50	4078	3
17	18.1	1343	4	58	50	4125	3
18	20.6	1371	4	73	51	4170	3
19	19.9	1295	4	78	49	4136	3
20	20.1	1309	4	80	50	4206	3
21	18.1	1378	4	75	49	4226	3
22	19.3	1360	4	85	50	4025	3
23	20.9	1369	4	72	50	4114	3
24	20.1	1361	4	57	50	4121	3
25	21.4	1318	4	64	49	4213	3
26	20	1382	4	61	49	4207	3
27	19.9	1358	4	69	51	4108	3
28	19.2	1362	4	80	50	4123	3
29	19.4	1347	4	76	49	4265	3
30	18.5	1291	4	79	50	4231	3
31	18.9	1349	4	61	50	4107	3
32	20.6	1350	4	55	50	4125	3
33	19.7	1318	4	71	50	4168	3
34	19.2	1364	4	73	50	4106	3
35	19.1	1369	4	66	49	4222	3
36	18.7	1305	4	79	49	4216	3
37	18.2	1328	4	72	50	4066	3

TABLA VI (Continúa)

Tiempo (h)	[SiO ₂] Entrada (mg/L)	[SDT] Entrada (mg/L)	[SiO ₂] Permeado (mg/L)	[SDT] Permeado (mg/L)	[SiO ₂] Rechazo (mg/L)	[SDT] Rechazo (mg/L)	Flujo Permeado (gpm)
38	18.9	1368	4	85	49	4123	3
39	20.6	1300	4	71	50	4115	3
40	20.6	1365	4	74	51	4027	3
41	21.2	1299	4	67	49	4217	3
42	20.8	1359	4	69	50	4111	3
43	21.5	1326	4	62	51	4225	3
44	20.6	1354	4	66	49	4023	3
45	18.1	1368	4	58	50	4102	3
46	21.4	1318	4	64	51	4229	3
47	19.8	1279	4	82	50	4145	3
48	19.2	1298	4	73	50	4122	3
49	19.9	1345	4	77	49	4214	3
50	20.2	1316	4	63	50	4046	3
51	20.9	1375	4	69	49	4119	3
52	19.2	1373	4	71	50	4158	3
53	20.1	1299	4	74	51	4036	3
54	19.8	1308	4	63	49	4220	3
55	19.9	1366	4	81	50	4145	3
56	19.5	1324	4	59	51	4212	3
57	19.2	1343	4	68	49	4024	3
58	19.9	1378	4	76	49	4113	3
59	20.6	1314	4	80	50	4231	3
60	18.9	1389	4	72	49	4137	3
61	19.3	1374	4	69	48	4157	3
62	18.3	1361	4	59	49	4206	3
63	19.7	1322	4	64	49	4214	3
64	19.1	1295	4	78	51	4150	3
65	19.6	1311	4	74	51	4123	3
66	19.9	1335	4	72	50	4271	3
67	20.4	1377	4	70	51	4233	3
68	20.7	1303	4	76	50	4147	3
69	19.6	1359	4	84	51	4121	3
70	21.3	1346	4	79	49	4178	3
71	20.5	1381	4	81	51	4135	3
72	19.9	1360	4	85	49	4223	3
73	20.7	1337	4	70	49	4149	3
74	19.9	1328	4	64	50	4132	3
75	20.8	1376	4	68	49	4227	3
76	21.4	1308	4	76	49	4155	3
77	20.3	1293	4	71	51	4138	3
78	21.5	1328	4	82	51	4119	3
79	19.6	1319	4	68	48	4233	3
80	19.2	1398	4	63	50	4219	3
81	19.5	1370	4	59	50	4157	3
82	19.8	1349	4	58	51	4137	3
83	20.2	1314	4	67	49	4213	3
84	20.2	1362	4	71	49	4167	3
85	21.6	1380	4	76	50	4219	3
86	21.1	1289	4	74	50	4236	3

TABLA VI (Continúa)

Tiempo (h)	[SiO ₂] Entrada (mg/L)	[SDT] Entrada (mg/L)	[SiO ₂] Permeado (mg/L)	[SDT] Permeado (mg/L)	[SiO ₂] Rechazo (mg/L)	[SDT] Rechazo (mg/L)	Flujo Permeado (gpm)
87	20.4	1317	4	79	49	4065	3
88	20.2	1345	4	66	50	4196	3
89	21.1	1374	4	83	50	4161	3
90	20.1	1351	4	68	50	4072	3
91	19.2	1375	4	60	50	4219	2.9
92	19.8	1298	4	73	51	4187	2.9
93	19.4	1320	4	55	50	4237	2.9
94	18.4	1375	4	59	50	4096	2.9
95	18.2	1344	4	57	50	4108	2.9
96	18.4	1365	4	61	51	4227	2.8
97	20.9	1307	4	59	50	4172	2.8
98	18.3	1364	4	65	49	4219	2.8
99	20.2	1336	4	61	50	4248	2.7
100	18.9	1336	4	73	49	4086	2.7
101	19.8	1381	4	70	51	4134	2.7
102	21.1	1323	4	79	50	4177	2.7
103	20.2	1299	4	74	51	4085	2.6
104	19.1	1337	4	80	51	4208	2.6
105	18.3	1321	4	68	49	4193	2.5
106	18.7	1376	4	75	51	4214	2.5
107	19.5	1339	4	77	50	4070	2.5
108	19.1	1345	4	72	50	4121	2.5
109	18.7	1381	4	63	50	4222	2.4
110	20.8	1297	4	74	49	4173	2.3
111	19.4	1347	4	66	49	4178	2.3
112	21.7	1379	4	83	51	4225	2.3
113	20.3	1316	4	79	49	4239	2.2
114	18.1	1375	4	81	51	4142	2.2
115	21.5	1362	4	80	51	4164	2.2
116	18.9	1351	4	71	50	4274	2.2
117	19.2	1324	4	74	49	4211	2.2
118	19.6	1380	4	69	51	4148	2.2
119	18.3	1302	4	61	50	4144	2.2
120	18.8	1339	4	65	51	4225	2.1
121	19.6	1359	4	68	50	4117	2.1
122	21.4	1352	4	71	50	4203	2.1
123	19.2	1378	4	77	50	4194	2.1
124	20.6	1309	4	73	49	4167	2.1
125	18.6	1319	4	84	51	4231	2.1
126	20.3	1376	4	78	49	4249	2.1
127	18.8	1335	4	82	51	4169	2.1
128	19	1372	4	74	51	4146	2.1
129	20.7	1361	4	63	50	4172	2
130	21.4	1326	4	69	50	4249	2
131	21.1	1346	4	73	50	4213	2
132	20.3	1318	4	81	51	4185	2
133	19.2	1368	4	78	50	4123	2
134	21.1	1333	4	72	50	4199	2
135	20.4	1329	4	58	50	4162	2

TABLA VI (Continúa)

Tiempo (h)	[SiO ₂] Entrada (mg/L)	[SDT] Entrada (mg/L)	[SiO ₂] Permeado (mg/L)	[SDT] Permeado (mg/L)	[SiO ₂] Rechazo (mg/L)	[SDT] Rechazo (mg/L)	Flujo Permeado (gpm)
136	21.2	1282	4	69	49	4203	2
137	18.8	1311	4	76	49	4229	2
138	19.8	1381	4	71	50	4102	2
139	19.2	1355	4	63	51	4125	2
140	19.8	1328	4	68	50	4136	2
141	19.3	1347	4	70	51	4064	2
142	21.2	1338	4	76	50	4254	2
143	18.9	1343	4	70	49	4186	2
144	19.4	1309	4	71	50	4094	2

TABLA VII

CASO 7

(pH = 3 y concentración de agente anti-incrustante = 1.0 mg/L)

Tiempo (h)	[SiO ₂] Entrada (mg/L)	[SDT] Entrada (mg/L)	[SiO ₂] Permeado (mg/L)	[SDT] Permeado (mg/L)	[SiO ₂] Rechazo (mg/L)	[SDT] Rechazo (mg/L)	Flujo Permeado (gpm)
0	19.8	1341	11	165	52.8	2256	3
1	19.1	1322	8	189	58.8	4298	3
2	19	1321	9	222	52.9	4219	3
3	19	1311	9	163	54.2	4229	3
4	19	1344	10	201	54	3945	3
5	19.2	1329	10	141	55	4367	3
6	19.1	1370	11	198	54.9	4238	3
7	19.9	1367	9	167	52	4267	3
8	19.2	1327	11	165	58.9	3923	3
9	20.1	1349	11	148	52.1	4266	3
10	19	1342	11	200	50.7	4299	3
11	19.9	1329	11	131	54.9	4328	3
12	19	1291	10	201	53	4211	3
13	19.4	1367	11	150	50.9	4276	3
14	21	1366	9	189	52	4266	3
15	20	1373	11	144	52.5	4302	3
16	19	1345	11	198	52	4231	3
17	19.1	1296	10	200	57.9	4271	3
18	20	1299	9	194	52	3948	3
19	20	1317	10	144	55.9	4370	3
20	20	1354	10	190	53	3964	3
21	20.3	1342	10	147	54.3	4334	3
22	19	1469	10	189	51	3940	3
23	19.1	1303	9	190	51.9	4371	3
24	20	1376	10	203	53	3947	3
25	19.9	1335	10	149	57.9	4379	3
26	20.5	1298	11	221	51	4302	3
27	20	1296	11	203	49.8	4312	3
28	20	1340	10	200	50	3977	3
29	20.1	1312	11	145	51	4335	3
30	20	1320	11	190	52	3925	3
31	19.9	1329	11	148	52	4369	3
32	19	1370	10	201	50.2	3988	3
33	19.7	1348	8	209	50	4375	3
34	22	1380	8	204	53	3968	3
35	18.5	1351	9	151	49.8	4334	3
36	21	1350	9	225	58.1	3996	3
37	20.5	1305	9	183	50.1	4371	3

TABLA VII (Continúa)

Tiempo (h)	[SiO ₂] Entrada (mg/L)	[SDT] Entrada (mg/L)	[SiO ₂] Permeado (mg/L)	[SDT] Permeado (mg/L)	[SiO ₂] Rechazo (mg/L)	[SDT] Rechazo (mg/L)	Flujo Permeado (gpm)
38	19	1376	9	209	53.8	3926	3
39	19.2	1368	9	194	54.5	4311	3
40	20	1339	9	209	52	4386	3
41	19.3	1281	9	147	50	3982	3
42	21	1369	11	211	50.2	4344	3
43	19	1293	10	148	51	3928	3
44	20	1289	10	201	50.9	4376	2.5
45	21.1	1332	11	198	52	3938	2.5
46	22	1389	10	199	54.9	4388	2.5
47	20.9	1364	9	189	54	4003	2.5
48	21	1345	9	201	52.8	4365	2.5
49	19	1339	8	168	52	3916	2.5
50	19.8	1338	9	189	51.9	4336	2.5
51	19.9	1338	9	182	58.4	3968	2.5
52	21	1378	10	204	50.3	4378	2.5
53	19.9	1388	10	165	52.3	3951	2.5
54	21.6	1365	11	198	52.9	4355	2.5
55	19.4	1307	11	189	53	3972	2.5
56	20	1299	11	189	51.1	4319	2.5
57	19.2	1301	10	143	52	3944	2.5
58	21	1300	9	199	54.8	4392	2.5
59	18.1	1326	9	161	55	3986	2.5
60	20	1356	9	179	50.9	4361	2.5
61	18.7	1349	8	180	54	4303	2.5
62	22	1388	10	197	54.9	4381	2.5
63	20	1356	10	191	52	3991	2.5
64	21.8	1326	10	209	54.3	4399	2.5
65	21.4	1380	9	177	51	3941	2
66	21	1349	9	197	52.8	4380	2
67	18.9	1317	9	150	54	3972	2
68	19	1298	8	201	53.9	4390	2
69	21.2	1381	10	183	52	4201	2
70	21	1379	10	213	52.1	4331	2
71	20.1	1371	10	154	54.2	4109	2
72	19	1379	10	209	53.9	4278	2
73	19.6	1344	9	169	55	3948	2
74	20.5	1365	9	200	53.1	4245	2
75	18.7	1323	11	181	51	3944	2
76	20	1388	11	198	52.9	4319	2
77	21	1371	11	196	50	3985	2
78	21.5	1328	9	199	54.1	4389	2
79	20.6	1294	11	139	51	3918	2
80	21	1339	9	189	55.1	4360	2
81	21.7	1368	10	164	54.9	3943	2
82	20	1329	11	223	52	4338	2
83	19.8	1373	11	182	49	3951	2
84	19.6	1390	10	201	57.8	4355	2
85	19.8	1347	10	157	54.2	4230	2
86	19.6	1375	9	198	52.7	4372	2

TABLA VII (Continúa)

Tiempo (h)	[SiO ₂] Entrada (mg/L)	[SDT] Entrada (mg/L)	[SiO ₂] Permeado (mg/L)	[SDT] Permeado (mg/L)	[SiO ₂] Rechazo (mg/L)	[SDT] Rechazo (mg/L)	Flujo Permeado (gpm)
87	18.6	1368	11	190	50	4323	2
88	21	1370	11	199	53.2	4391	2
89	18.8	1389	11	186	52	4376	2
90	19.5	1371	9	224	53.1	4319	2
91	19.4	1300	11	196	54.9	4278	2
92	20	1391	9	201	55.1	4317	2
93	21.6	1278	9	173	50	4231	2
94	21	1286	10	206	52.7	4369	2
95	20.1	1270	10	205	53	3984	2
96	22	1329	9	207	52.6	4384	2
97	20,1	1300	9	162	50	4108	2
98	21	1328	10	201	53.7	4390	2
99	19.1	1301	10	178	51	3967	2
100	20	1358	9	217	54.1	4321	2
101	19.4	1322	9	210	52	4307	2
102	19	1372	9	219	52	4346	2
103	18	1298	11	176	57.9	4299	2
104	19.5	1397	11	201	51.9	4318	2
105	18	1301	12	145	53	4178	2
106	19	1369	11	200	52.8	4376	2
107	19.8	1309	11	147	55	3952	1.5
108	22	1335	10	211	53.1	4387	1.5
109	19.4	1319	10	182	53	4234	1.5
110	20	1287	10	199	52.3	4387	1.5
111	19.6	1290	10	171	54	4224	1.5
112	21	1339	10	189	51.1	4392	1.5
113	19.1	1289	10	209	55.6	4331	1.5
114	21	1388	10	185	53.3	4370	1.5
115	20.4	1305	10	205	51	4222	1.5
116	19	1368	10	192	52	4287	1.5
117	19.2	1333	10	158	52	4309	1.5
118	20	1340	11	192	53.9	4290	1.5
119	20	1367	11	151	53	4321	1.5
120	19	1340	11	211	53.1	4270	1.5
121	19.6	1301	10	196	50	3948	1.5
122	19	1361	12	222	54.2	4264	1.5
123	20	1350	12	183	52	4321	1
124	19.5	1368	11	209	55	4300	1
125	19.7	1320	10	162	52	4371	1
126	20	1348	10	189	51.9	4377	1
127	20.5	1350	10	196	54	4392	1
128	20	1342	10	186	52.2	4377	1
129	19.1	1280	10	171	51	4289	1
130	20.6	1322	11	221	53.2	4300	1
131	18	1360	9	147	50	4284	1
132	18.2	1329	9	204	51.9	4386	1
133	18.8	1390	10	158	52	4338	1
134	20	1329	10	200	52.1	4327	1
135	18.5	1320	10	164	49	4329	1

TABLA VII (Continúa)

Tiempo (h)	[SiO ₂] Entrada (mg/L)	[SDT] Entrada (mg/L)	[SiO ₂] Permeado (mg/L)	[SDT] Permeado (mg/L)	[SiO ₂] Rechazo (mg/L)	[SDT] Rechazo (mg/L)	Flujo Permeado (gpm)
136	19.1	1330	11	198	52.9	4300	1
137	19	1342	11	150	49	4381	1
138	19.3	1359	10	221	54.8	4387	1
139	19.9	1288	9	177	49.4	4378	1
140	21	1369	11	199	53.7	4321	1
141	19.9	1294	12	209	57	4388	1
142	18	1308	12	186	52.9	4362	1
143	19	1290	11	138	51.2	4381	1
144	18	1367	11	180	50.7	4388	1

TABLA VIII

CASO 8

(pH = 3 y concentración de agente anti-incrustante = 3.0 mg/L)

Tiempo (h)	[SiO ₂] Entrada (mg/L)	[SDT] Entrada (mg/L)	[SiO ₂] Permeado (mg/L)	[SDT] Permeado (mg/L)	[SiO ₂] Rechazo (mg/L)	[SDT] Rechazo (mg/L)	Flujo Permeado (gpm)
0	19	1323	6	124	48.9	4185	3
1	19.4	1318	6	181	49	4256	3
2	19.1	1329	6	192	50.6	4116	3
3	19	1298	6	138	50.1	4290	3
4	19.9	1395	6	226	49.9	4152	3
5	19.3	1316	7	184	51.5	4215	3
6	18.3	1319	6	201	49	4198	3
7	20	1371	6	145	52	4289	3
8	19.1	1349	5	163	49.8	4195	3
9	19.2	1308	6	152	51	4234	3
10	19.9	1316	6	186	51.3	4127	3
11	19.4	1324	6	170	50	4269	3
12	20.8	1391	7	159	51.5	4132	3
13	19.9	1378	7	181	50.5	4121	3
14	21.3	1276	7	160	51.8	4129	3
15	19.9	1385	6	149	50.3	4267	3
16	19.9	1400	6	222	50.3	4122	3
17	19.8	1340	5	176	49.9	4289	3
18	20	1322	6	221	50	4016	3
19	19.8	1350	6	141	51.5	4300	3
20	21.4	1311	6	140	49.8	4007	3
21	19.3	1280	6	229	51.1	4213	3
22	21.5	1377	6	153	50.9	4081	3
23	19.9	1350	7	141	51.7	4285	3
24	19.2	1359	6	235	48	4122	3
25	19.8	1301	6	148	50.2	4296	3
26	19.8	1381	6	198	48	3978	3
27	19.6	1399	6	182	50.7	4279	3
28	20.2	1339	5	151	49	4035	3
29	19.9	1296	6	172	50.6	4164	3
30	21.1	1376	6	207	50.1	4127	3
31	19.4	1355	6	172	50.4	4239	3
32	20.2	1293	6	195	50.6	4157	3
33	19.9	1287	6	183	50.9	4218	3
34	20.1	1319	7	223	51.2	4048	3
35	19.8	1395	6	219	49	4297	3
36	19.8	1375	6	162	51.7	3992	3
37	19.7	1387	6	176	49.5	4284	3

TABLA VIII (Continúa)

Tiempo (h)	[SiO ₂] Entrada (mg/L)	[SDT] Entrada (mg/L)	[SiO ₂] Permeado (mg/L)	[SDT] Permeado (mg/L)	[SiO ₂] Rechazo (mg/L)	[SDT] Rechazo (mg/L)	Flujo Permeado (gpm)
38	18.4	1314	6	203	51.5	3972	3
39	19.9	1312	6	203	50.9	4305	3
40	18.9	1380	6	166	51.8	4087	3
41	19.7	1341	6	163	51	4296	3
42	18.3	1317	5	142	51.2	4123	3
43	19.9	1394	6	188	52	4277	3
44	18.9	1374	5	231	50.9	4139	3
45	19.9	1299	6	157	50.7	4258	3
46	21.5	1336	6	189	50.2	3958	3
47	19.8	1399	6	191	50.4	4275	3
48	19.1	1323	6	192	50.5	3946	3
49	19.9	1281	6	212	51.3	4299	3
50	18.7	1337	6	190	48	4049	3
51	19.7	1367	7	199	50.7	4218	3
52	19.1	1376	7	145	48	4002	3
53	19.7	1297	7	183	51.2	4275	2
54	20.9	1345	6	223	50.9	4116	2
55	19.9	1395	6	211	52	4214	2
56	21.7	1297	6	182	47	4238	2
57	19.8	1307	6	179	50	4253	2
58	18.1	1389	6	192	50.5	3973	2
59	19.8	1346	6	162	51.3	4281	2
60	18.9	1375	6	144	47	3929	2
61	19.9	1311	6	217	49.5	4268	2
62	18.3	1351	6	182	50.4	4041	2
63	19.8	1373	6	199	49.1	4249	2
64	19.2	1380	6	142	51.5	4067	2
65	19.8	1275	6	177	51.5	4229	2
66	19.3	1333	6	230	49	4004	2
67	19.9	1389	6	195	50.1	4259	2
68	18.9	1352	6	182	50	4105	2
69	19.7	1322	6	140	49.1	4238	2
70	18.5	1309	6	235	51.3	4069	2
71	19.9	1370	5	162	48.2	4227	2
72	19.9	1376	5	241	51	3916	2
73	19	1297	6	155	49.1	4277	2
74	20.9	1372	6	207	50.9	4121	2
75	20	1384	6	218	48.3	4288	2
76	20.4	1326	6	201	48	3914	2
77	20	1321	6	141	49.9	4282	2
78	18.7	1318	6	203	50.3	4092	2
79	19.9	1379	6	188	51.3	4265	2
80	18.2	1333	6	182	49	4013	2
81	19.9	1302	6	180	50.2	4238	2
82	18.3	1282	6	188	49	4138	2
83	21	1376	6	133	51.3	4266	2
84	19.9	1381	6	177	47	4301	2
85	19.9	1319	6	151	49.9	4225	2
86	18.1	1328	6	139	49	4075	2

TABLA VIII (Continúa)

Tiempo (h)	[SiO ₂] Entrada (mg/L)	[SDT] Entrada (mg/L)	[SiO ₂] Permeado (mg/L)	[SDT] Permeado (mg/L)	[SiO ₂] Rechazo (mg/L)	[SDT] Rechazo (mg/L)	Flujo Permeado (gpm)
87	21	1375	6	196	48.1	4276	2
88	20.9	1338	7	179	50.5	4288	2
89	21	1284	7	146	48.3	4271	2
90	21.4	1306	7	163	48	4199	2
91	21.4	1389	6	192	48.7	4276	2
92	20.3	1298	6	182	49	3931	2
93	20.6	1320	6	139	50.9	4246	2
94	20.5	1373	6	172	48	4052	1.8
95	20	1391	6	177	49.3	4275	1.8
96	19.2	1365	6	151	48	4303	1.8
97	20	1276	6	189	51.5	4265	1.8
98	18.3	1364	6	179	47	4044	1.8
99	20	1349	6	218	50.7	4284	1.8
100	19.9	1371	6	150	51.4	3972	1.8
101	21	1300	6	150	50.3	4226	1.8
102	19.2	1377	6	132	49	4098	1.8
103	20	1319	6	221	49.2	4229	1.8
104	18.6	1375	6	163	50.2	4035	1.8
105	20	1385	6	176	49.5	4273	1.8
106	18.8	1366	6	186	51.9	4136	1.8
107	19.9	1289	6	138	51.3	4217	1.8
108	20.7	1338	5	144	49.3	4008	1.8
109	21	1299	6	137	51.5	4258	1.8
110	21.1	1346	6	179	49.9	4296	1.8
111	21	1302	6	166	50	4239	1.8
112	19.4	1306	6	149	49.3	4009	1.8
113	21	1325	6	195	50.3	4253	1.8
114	20.4	1325	6	172	49.9	4083	1.8
115	21	1333	6	196	50.9	4229	1.8
116	19.9	1372	6	149	52	3918	1.8
117	20	1382	6	215	50.3	4275	1.8
118	19.4	1371	6	138	50.1	4276	1.8
119	19.9	1281	7	154	49.9	4260	1.8
120	18.9	1309	6	139	50.2	4083	1.8
121	21	1381	6	139	49.7	4287	1.8
122	19.7	1360	6	150	50.1	4021	1.8
123	19.9	1326	6	148	49.9	4271	1.8
124	19.1	1361	6	140	50.8	4239	1.5
125	20	1369	6	184	51.7	4255	1.5
126	18.2	1382	5	139	50.1	4031	1.5
127	21	1301	6	205	49.1	4298	1.5
128	20.9	1362	6	141	51.3	4200	1.5
129	21	1391	6	148	50.6	4285	1.5
130	21.2	1299	6	149	50.1	4281	1.5
131	21.5	1300	6	142	49.5	4269	1.5
132	21.5	1350	6	140	50.3	4301	1.5
133	21.4	1354	6	219	49.4	4276	1.5
134	18.4	1364	6	151	51.7	4082	1.5
135	21.6	1311	6	143	49.3	4291	1.5

TABLA VIII (Continúa)

Tiempo (h)	[SiO ₂] Entrada (mg/L)	[SDT] Entrada (mg/L)	[SiO ₂] Permeado (mg/L)	[SDT] Permeado (mg/L)	[SiO ₂] Rechazo (mg/L)	[SDT] Rechazo (mg/L)	Flujo Permeado (gpm)
136	19.8	1305	7	149	50.3	4287	1.5
137	20	1386	7	202	49.5	4288	1.5
138	19.9	1368	6	147	50.5	4282	1.5
139	21	1279	6	183	49.3	4291	1.5
140	20.9	1365	6	161	50.8	4299	1.5
141	21	1299	6	182	49.9	4222	1.5
142	20.4	1357	6	141	51.9	4278	1.5
143	21	1384	6	209	50.7	4219	1.5
144	19	1324	6	163	50.2	4210	1.5

TABLA IX

CASO 9 (*)

(pH = 4 y concentración de agente anti-incrustante = 3.0 mg/L)

Tiempo (h)	[SiO ₂] Entrada (mg/L)	[SDT] Entrada (mg/L)	[SiO ₂] Permeado (mg/L)	[SDT] Permeado (mg/L)	[SiO ₂] Rechazo (mg/L)	[SDT] Rechazo (mg/L)	Flujo Permeado (gpm)
0	19.3	1359	4	61	50	4057	3
1	21	1301	4	72	49	4021	3
2	19	1318	4	70	51	4139	3
3	19	1310	4	80	51	4120	3
4	20.3	1319	4	69	49	4100	3
5	19	1375	4	60	51	4049	3
6	19	1327	4	66	50	4118	3
7	20	1320	4	75	51	4112	3
8	20.5	1332	4	59	50	4121	3
9	21	1358	4	72	50	4075	3
10	21.3	1335	4	71	50	4150	3
11	20	1371	4	59	50	4221	3
12	20.9	1375	4	75	51	4123	3
13	19.8	1323	4	70	49	4130	3
14	19	1339	4	69	50	4150	3
15	18.1	1369	4	62	50	4115	3
16	18.6	1302	4	72	51	4267	3
17	19	1361	4	63	50	4159	3
18	20	1355	4	72	50	4089	3
19	19	1301	4	69	50	4101	3
20	20	1343	4	65	49	4117	3
21	20.5	1367	4	66	49	4191	3
22	20.8	1351	4	75	50	4222	3
23	20.9	1349	4	80	51	4187	3
24	20	1376	4	61	51	4121	3
25	21	1322	4	59	49	4209	3
26	19	1377	4	69	50	4199	3
27	20.1	1321	4	61	50	4135	3
28	20.7	1359	4	70	51	4278	3
29	20.4	1348	4	61	50	4129	3
30	19.3	1307	4	71	51	4207	3
31	19.3	1311	4	67	51	4163	3
32	20.1	1365	4	61	51	4231	3
33	21	1329	4	68	49	4194	3
34	18.4	1381	4	74	49	4181	3
35	20.3	1376	4	72	49	4106	3
36	19	1358	4	80	49	4255	3
37	18.1	1321	4	70	50	4172	3

TABLA IX (Continúa)

Tiempo (h)	[SiO ₂] Entrada (mg/L)	[SDT] Entrada (mg/L)	[SiO ₂] Permeado (mg/L)	[SDT] Permeado (mg/L)	[SiO ₂] Rechazo (mg/L)	[SDT] Rechazo (mg/L)	Flujo Permeado (gpm)
38	18	1301	4	72	50	4196	3
39	21.5	1309	4	68	51	4161	3
40	20.8	1367	4	80	50	4195	3
41	19	1372	4	72	50	4189	3
42	20.8	1371	4	74	51	4216	3
43	20.8	1335	4	80	50	4151	3
44	20	1356	4	69	50	4233	3
45	19.7	1368	4	67	50	4103	3
46	21	1345	4	73	49	4209	3
47	20.5	1377	4	70	49	4190	3
48	19	1309	4	69	50	4178	3
49	21	1387	4	71	50	4188	3
50	20	1379	4	80	50	4214	3
51	20.1	1381	4	71	50	4137	3
52	19	1361	4	61	49	4205	3
53	20.1	1309	4	70	49	4192	3
54	19	1331	4	68	49	4185	3
55	20.2	1348	4	72	51	4173	3
56	19.8	1372	4	68	50	4122	3
57	21	1339	4	71	50	4111	3
58	19.1	1329	4	80	51	4174	3
59	18.1	1333	4	65	50	4161	3
60	19.7	1375	4	64	50	4201	3
61	18.9	1326	4	75	50	4127	3
62	18	1378	4	63	49	4244	3
63	18.6	1369	4	71	49	4191	3
64	19	1357	4	70	49	4115	3
65	19.6	1381	4	72	50	4176	3
66	19.1	1342	4	80	50	4169	3
67	20.9	1367	4	72	51	4231	3
68	21	1329	4	66	50	4125	3
69	20	1369	4	73	51	4243	3
70	21	1321	4	70	50	4119	3
71	19	1343	4	71	49	4117	3
72	20.8	1356	4	72	49	4149	3
73	21	1367	4	72	50	4182	3
74	19,8	1333	4	69	50	4201	3
75	20.8	1379	4	68	50	4111	3
76	21	1301	4	66	51	4196	3
77	19.3	1334	4	80	51	4165	3
78	21.2	1349	4	80	51	4224	3
79	21.3	1318	4	72	50	4148	3
80	20.7	1345	4	69	50	4221	3
81	18.6	1367	4	64	51	4173	3
82	19.9	1360	4	69	50	4124	3
83	21	1321	4	76	50	4184	3
84	20	1380	4	80	50	4115	3
85	20	1302	4	67	49	4239	3
86	21,1	1374	4	64	49	4172	3

TABLA IX (Continúa)

Tiempo (h)	[SiO ₂] Entrada (mg/L)	[SDT] Entrada (mg/L)	[SiO ₂] Permeado (mg/L)	[SDT] Permeado (mg/L)	[SiO ₂] Rechazo (mg/L)	[SDT] Rechazo (mg/L)	Flujo Permeado (gpm)
87	19	1328	4	68	49	4095	3
88	20.9	1339	4	69	49	4123	3
89	19.6	1373	4	80	50	4102	3
90	21	1339	4	72	49	4229	2.95
91	21.2	1348	4	63	49	4153	2.95
92	20.9	1319	4	71	50	4093	2.95
93	20	1368	4	59	50	4175	2.95
94	19.8	1321	4	67	51	4168	2.95
95	21.3	1319	4	67	51	4190	2.95
96	18.2	1379	4	72	51	4089	2.9
97	21	1328	4	69	50	4115	2.9
98	18.9	1378	4	71	50	4255	2.9
99	18.9	1326	4	69	50	4137	2.9
100	19	1347	4	71	49	4182	2.9
101	21	1323	4	72	49	4126	2.85
102	21	1329	4	69	49	4195	2.85
103	18	1365	4	80	50	4176	2.85
104	20.3	1347	4	72	50	4093	2.85
105	18	1380	4	69	50	4138	2.85
106	19.9	1371	4	72	51	4266	2.8
107	19	1361	4	72	51	4171	2.8
108	19.2	1329	4	80	51	4182	2.8
109	21	1303	4	71	50	4095	2.8
110	20.8	1329	4	80	50	4133	2.8
111	20	1307	4	71	49	4144	2.75
112	21.8	1376	4	72	49	4177	2.75
113	21	1326	4	70	49	4196	2.75
114	18.9	1381	4	69	49	4103	2.75
115	21	1352	4	70	50	4126	2.7
116	19.9	1371	4	80	50	4225	2.7
117	18	1365	4	60	51	4157	2.7
118	19.1	1328	4	71	51	4090	2.7
119	19.1	1333	4	80	50	4137	2.6
120	19.9	1379	4	70	50	4188	2.6
121	19.8	1362	4	71	49	4120	2.5
122	20.2	1358	4	75	49	4174	2.5
123	20	1311	4	71	49	4101	2.5
124	21.1	1347	4	75	49	4172	2.5
125	19.7	1328	4	80	49	4131	2.4
126	20.9	1319	4	73	50	4169	2.4
127	20.1	1355	4	80	50	4090	2.4
128	19.9	1337	4	70	50	4116	2.4
129	19.9	1321	4	67	51	4183	2.4
130	21.2	1339	4	69	51	4135	2.3
131	21.5	1329	4	72	51	4110	2.3
132	20.5	1310	4	80	50	4192	2.3
133	20.1	1324	4	79	50	4194	2.3
134	21.1	1328	4	77	49	4178	2.3
135	18	1379	4	69	49	4175	2.25

TABLA IX (Continúa)

Tiempo (h)	[SiO ₂] Entrada (mg/L)	[SDT] Entrada (mg/L)	[SiO ₂] Permeado (mg/L)	[SDT] Permeado (mg/L)	[SiO ₂] Rechazo (mg/L)	[SDT] Rechazo (mg/L)	Flujo Permeado (gpm)
136	21,6	1358	4	80	49	4208	2.25
137	19	1380	4	71	49	4159	2.25
138	19.3	1372	4	71	50	4183	2.25
139	18	1380	4	75	50	4138	2.25
140	19.7	1329	4	70	50	4266	2.25
141	18	1357	4	80	49	4171	2.25
142	20.4	1361	4	71	50	4159	2.2
143	20.1	1335	4	69	50	4095	2.2
144	19.2	1373	4	72	51	4191	2.2

(*) Para este caso particular, la unidad de MOI fue prelavada con una solución de HCl para reducir la caída de presión e incrementar el flujo permeado.

APÉNDICE B – DESEMPEÑO DE LA RED NEURONAL PARA TODOS LOS CASOS EXPERIMENTALES EN MOI.

La Figura I siguiente muestra el desempeño de la red neuronal Newff para el caso 1, en función del ECM.

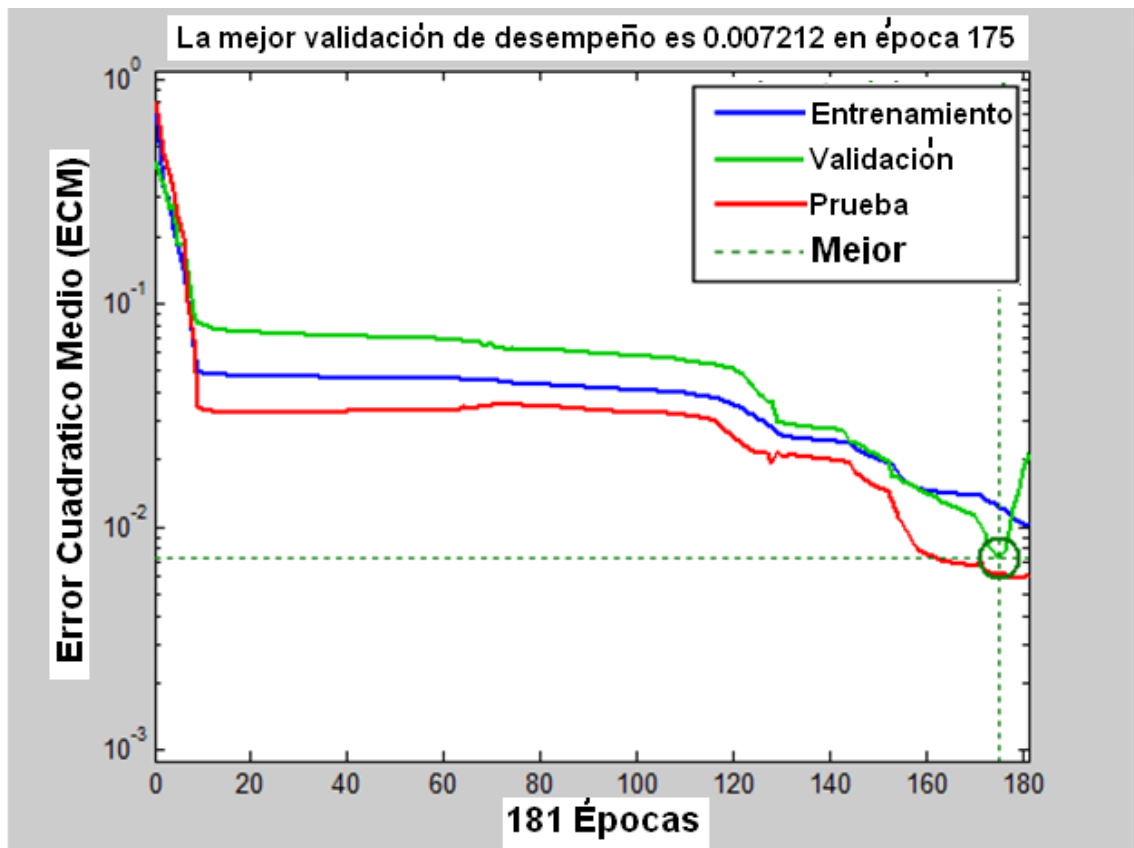


Figura I. Desempeño de la red neuronal Newff en el caso 1, pH =12 y concentración de anti-incrustante VIATEC = 1.0 mg/L.

La Figura II siguiente muestra el desempeño de la red neuronal Newff para el caso 2, en función del ECM.

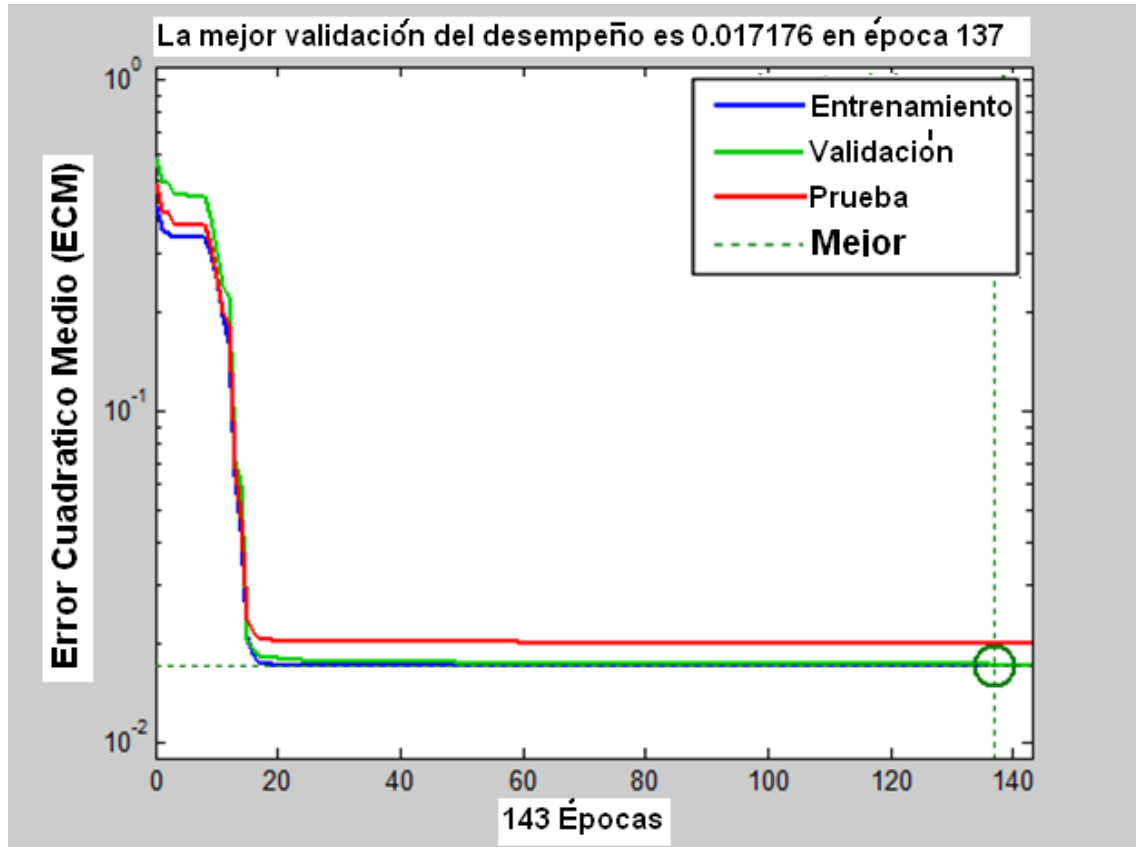


Figura II. Desempeño de la red neuronal Newff en el caso 2, pH =7 y concentración de anti-incrustante VIATEC = 1.0 mg/L.

La Figura III siguiente muestra el desempeño de la red neuronal Newff para el caso 3, en función del ECM.

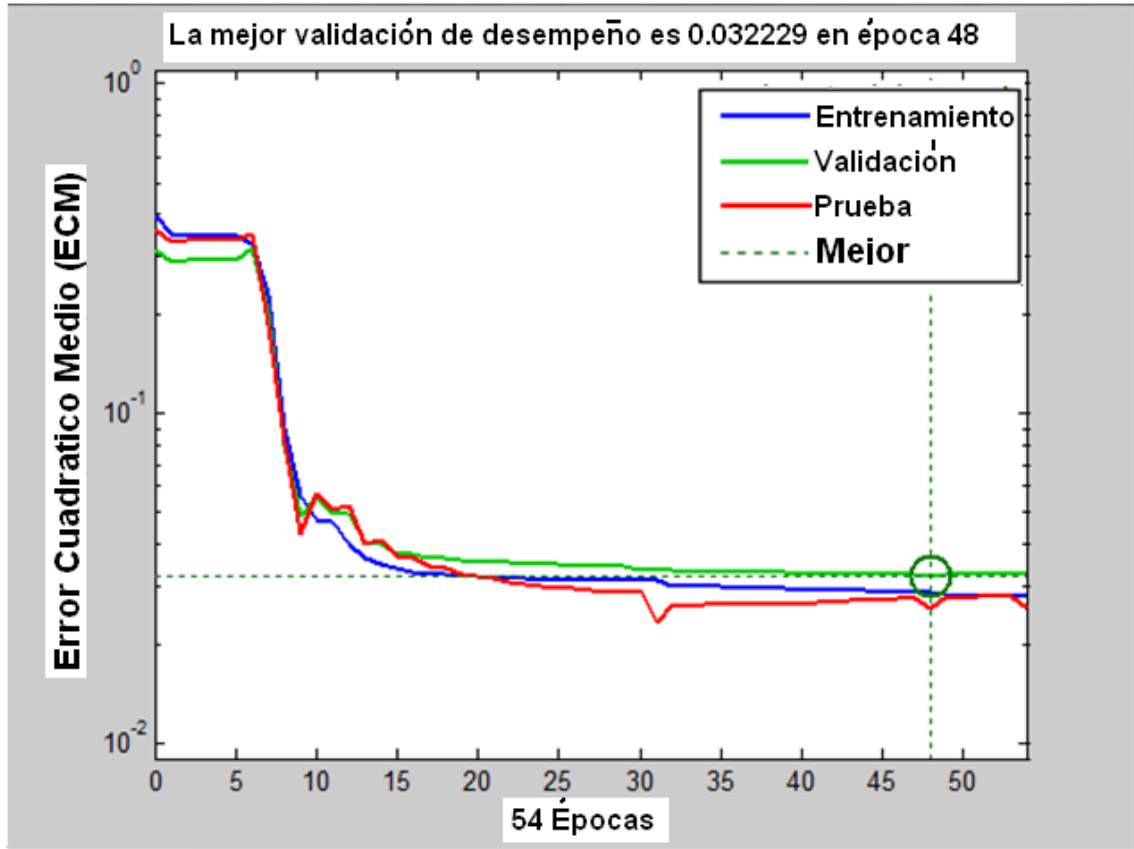


Figura III. Desempeño de la red neuronal Newff en el caso 3, pH =12 y concentración de anti-incrustante VIATEC = 3.0 mg/L.

La Figura IV siguiente muestra el desempeño de la red neuronal Newff para el caso 4, en función del ECM.

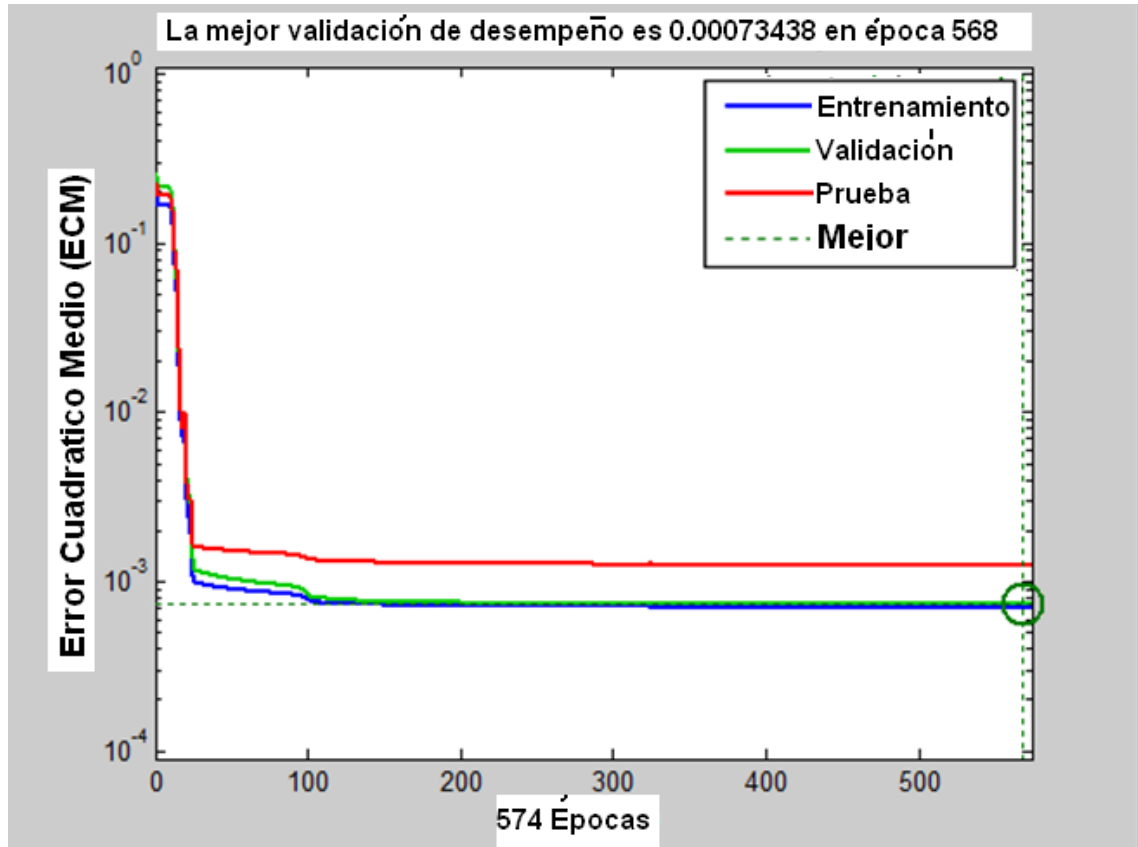


Figura IV. Desempeño de la red neuronal Newff en el caso 4, pH =7 y concentración de anti-incrustante VIATEC = 3.0 mg/L.

La Figura V siguiente muestra el desempeño de la red neuronal Newff para el caso 5, en función del ECM.

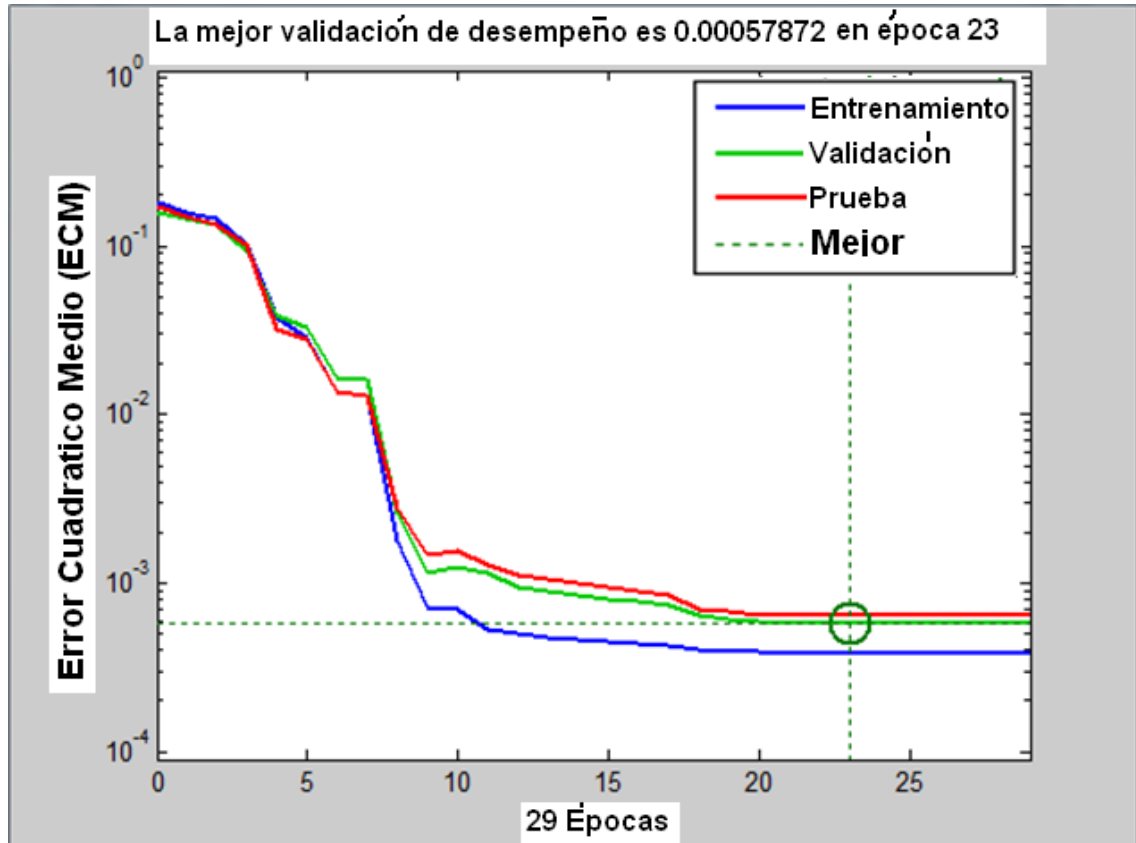


Figura V. Desempeño de la red neuronal Newff en el caso 5, pH =4 y concentración de anti-incrustante VIATEC = 1.0 mg/L.

La Figura VI siguiente muestra el desempeño de la red neuronal Newff para el caso 6, en función del ECM.

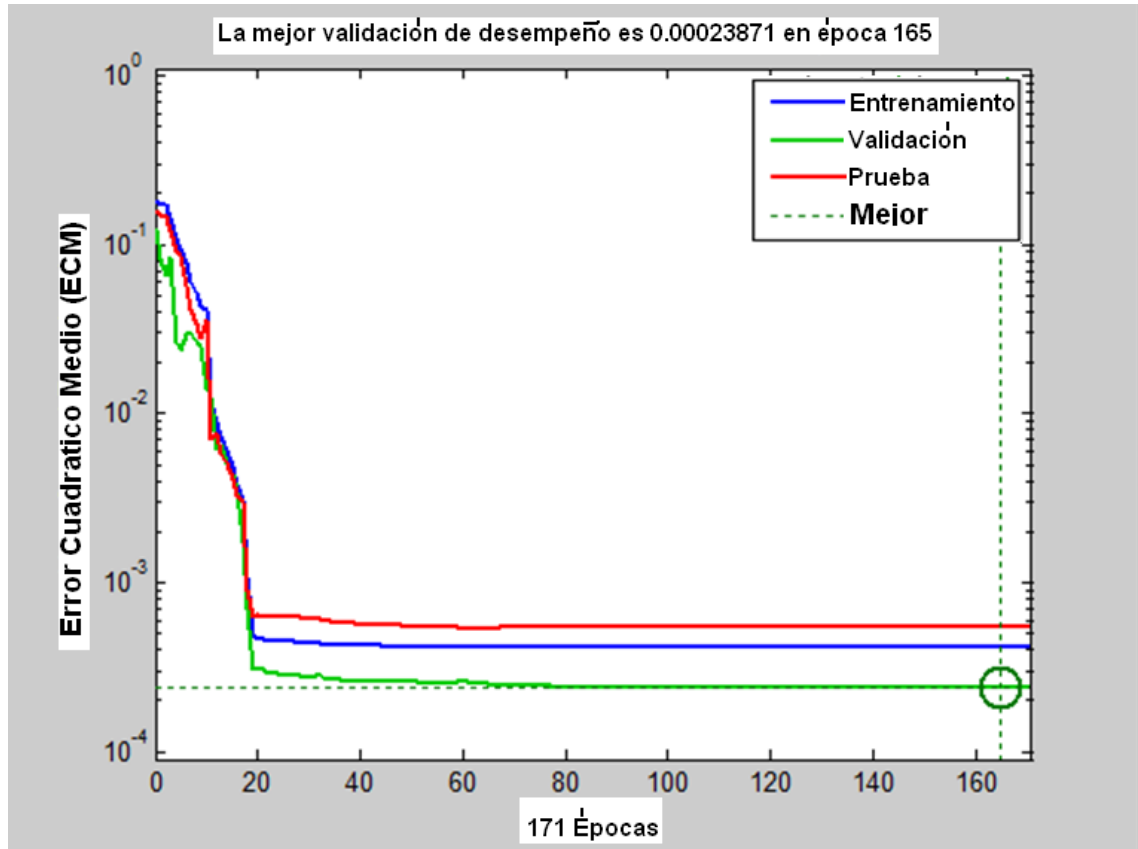


Figura VI. Desempeño de la red neuronal Newff en el caso 6, pH =4 y concentración de anti-incrustante VIATEC = 3.0 mg/L.

La Figura VII siguiente muestra el desempeño de la red neuronal Newff para el caso 7, en función del ECM.

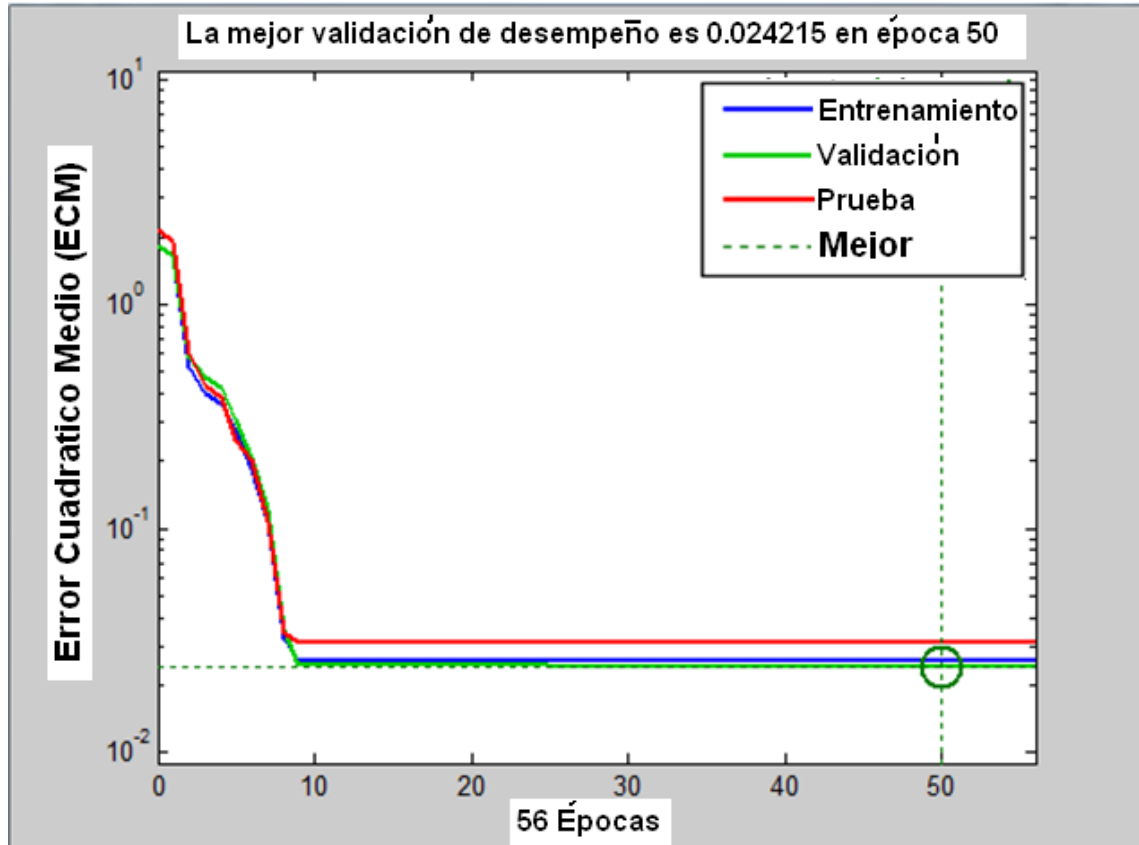


Figura VII. Desempeño de la red neuronal Newff en el caso 7, pH =3 y concentración de anti-incrustante VIATEC = 1.0 mg/L.

La Figura VIII siguiente muestra el desempeño de la red neuronal Newff para el caso 8, en función del ECM.

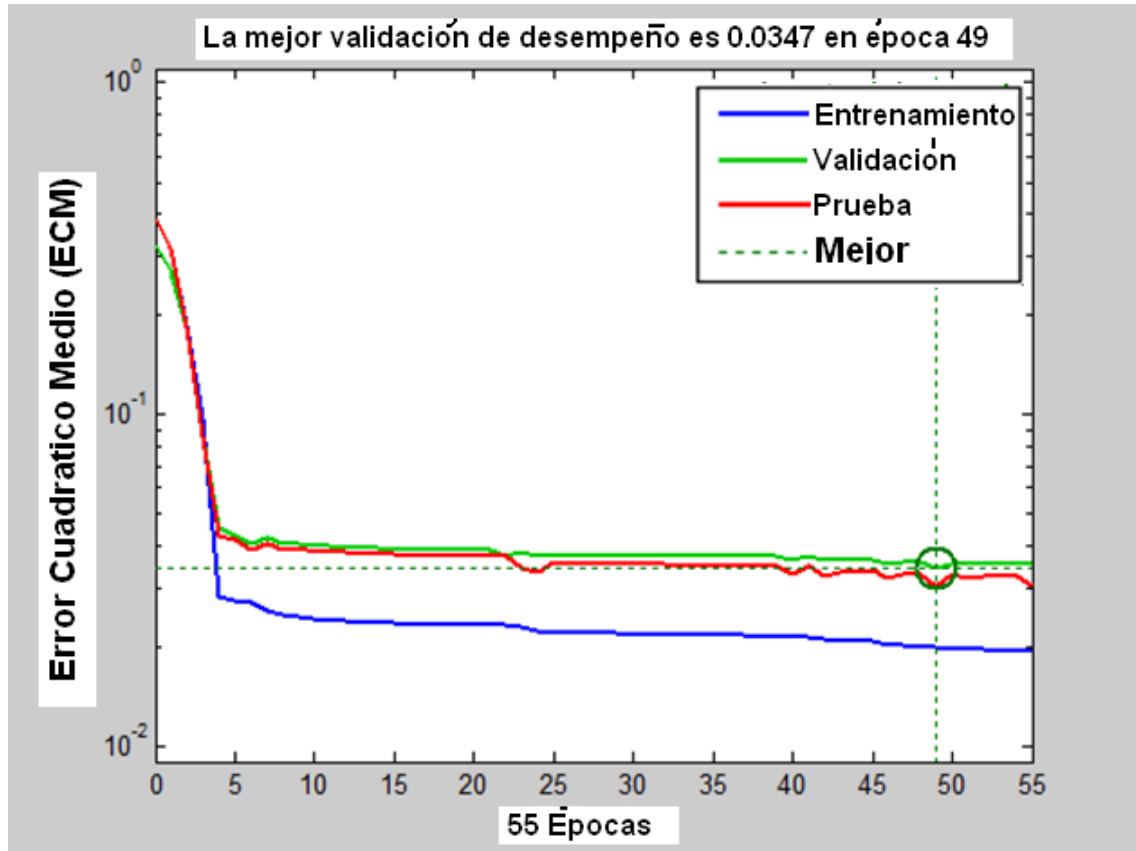


Figura VIII. Desempeño de la red neuronal Newff en el caso 8, pH =3 y concentración de anti-incrustante VIATEC = 3.0 mg/L.

La Figura IX siguiente muestra el desempeño de la red neuronal Newff para el caso 9, en función del ECM.

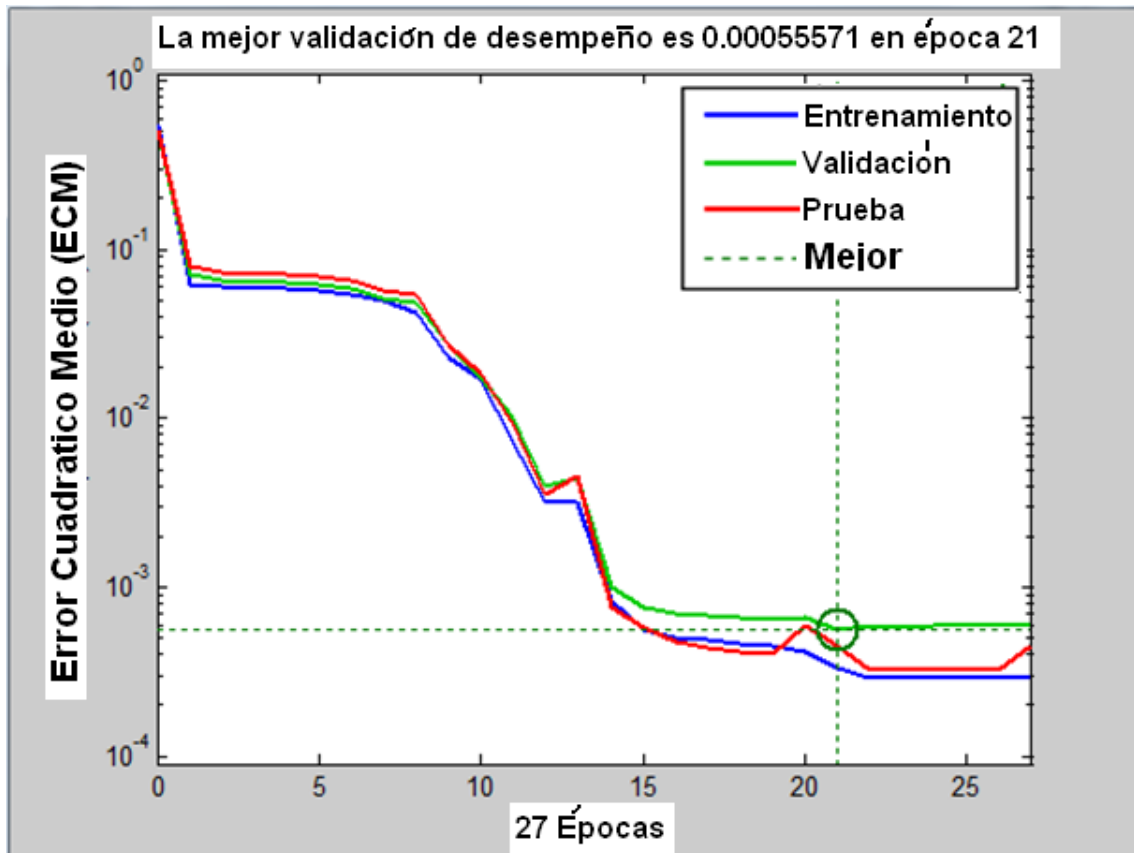


Figura IX. Desempeño de la red neuronal Newff en el caso 9, pH =4 y concentración de anti-incrustante VIATEC = 3.0 mg/L.

APÉNDICE C – DESEMPEÑO DE LA RED NEURONAL PARA EL CASO 9 (MEJOR) EN FUNCIÓN DE UN DIFERENTE NÚMERO DE NEURONAS EN LA CAPA OCULTA.

La Figuras X, XI y XII siguientes muestran el desempeño de la red neuronal Newff para el caso 9, con cuatro e neuronas en la capa oculta.

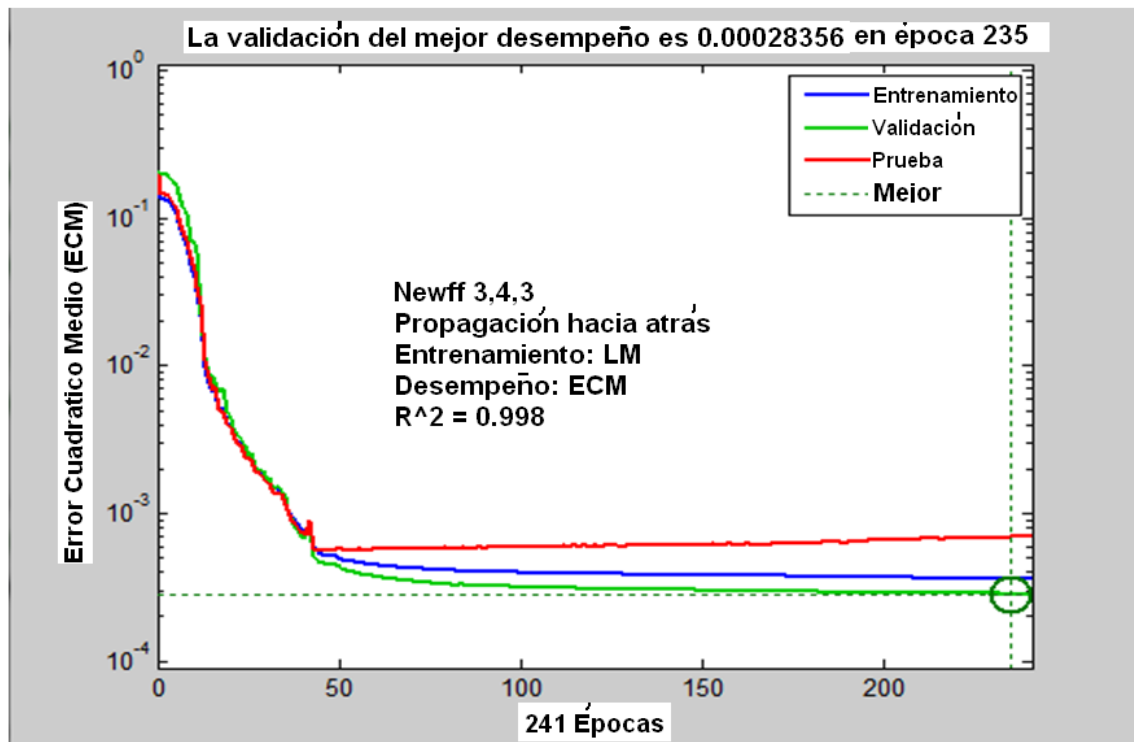


Figura X. Desempeño de la red neuronal Newff para el caso 9, para 4 neuronas en la capa oculta.

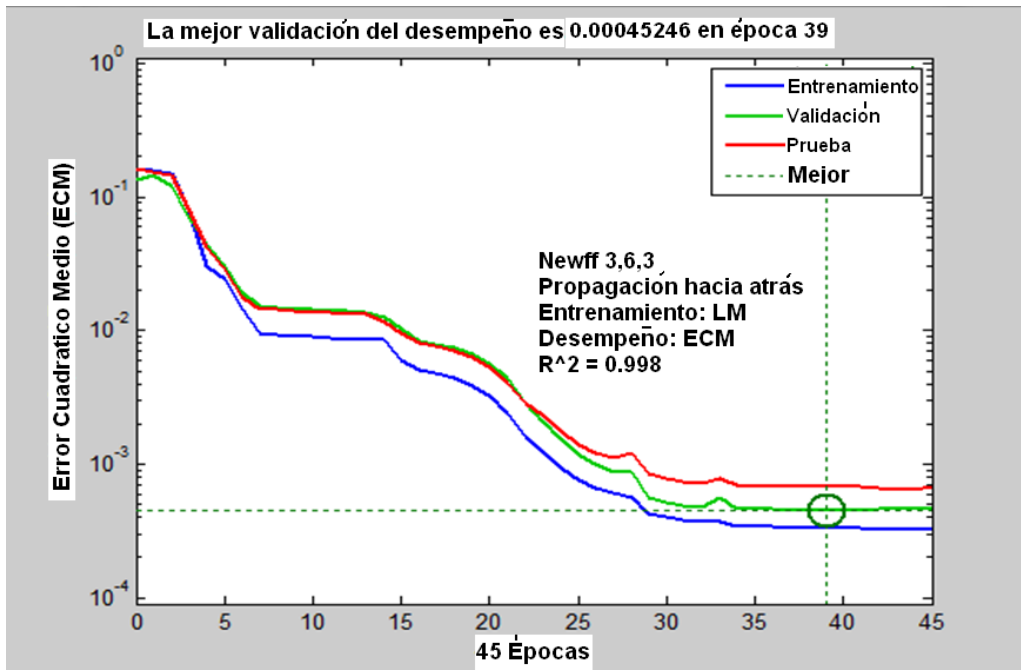


Figura XI. Desempeño de la red neuronal Newff para el caso 9, para 6 neuronas en la capa oculta.

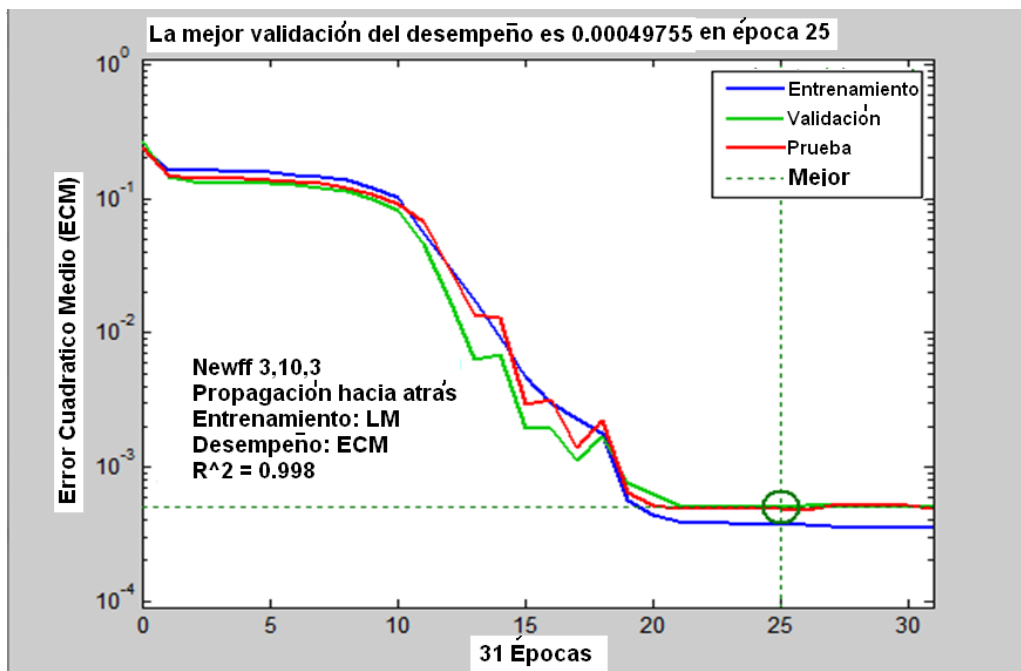


Figura XII. Desempeño de la red neuronal Newff para el caso 9, para 10 neuronas en la capa oculta.

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

ALEJANDRO SALGADO REYNA

Candidato para el Grado de

Doctorado en Ciencias con Orientación en Procesos Sustentables

Tesis: USO DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES (RNA) PARA LA MODELACIÓN DE UNA UNIDAD DE ÓSMOSIS INVERSA EN UNA PLANTA PILOTO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.

Campo de Estudios: Procesos Sustentables

Biografía: Nacido en Monterrey, Nuevo León, México, el 23 de Diciembre de 1959, hijo de Alfonso Salgado Orozco y Esther Reyna Garza.

Educación: Egresado como Ingeniero Químico en Diciembre de 1980.
Egresado de la Maestría en Ciencias en Junio de 1986.

Experiencia Profesional: Por más de 30 años en diferentes procesos industriales como; Industria Siderúrgica, industria del hule, industria automotriz, industria cerámica, e Industria del Plástico. Profesor durante los últimos 30 años de diferentes cursos en la Licenciatura y Maestría de la carrera de Ingeniería Química, de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Nuevo León.