



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de Estudios Superiores

ZARAGOZA

**EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE LOS PROCESOS
DE PRE-OXIDACIÓN-COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN-
SEDIMENTACIÓN UTILIZANDO HIPOCLORITO DE SODIO
Y COAGULANTES POLIMÉRICOS PARA LA REMOCIÓN
DE ALGAS EN AGUA DE PRESA**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A

ROBERTO MENESES ELIZALDE

Tutor:

Dra. Rosa María Ramírez Zamora



MÉXICO, D. F.

AÑO 2011



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente:	I.Q. Gonzalo Rafael Coello García
Secretario:	M en FQ. Balbina Patricia García Aguilar
Vocal:	Dra. Rosa María Ramírez Zamora
1er. Suplente:	I.Q. Ana Lilia Maldonado Arellano
2° suplente:	I.Q. Consuelo Matías Garduño

Sitió donde se desarrolló el tema:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

Dra. Rosa María Ramírez Zamora



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES "ZARAGOZA"

DIRECCIÓN

**JEFE DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACION
ESCOLAR
PRESENTE.**

Comunico a usted que al alumno(a) MENESES ELIZALDE ROBERTO con número de cuenta 405090516 de la carrera Ingeniería Química, se le ha fijado el día 14 del mes de octubre de 2011 a las 16:00 horas para presentar su examen profesional, que tendrá lugar en la sala de exámenes profesionales del Campus II de esta Facultad, con el siguiente jurado:

PRESIDENTE	I. Q. GONZALO RAFAEL COELLO GARCÍA
VOCAL	DRA. ROSA MARÍA RAMÍREZ ZAMORA
SECRETARIO	M. en FQ. BALBINA PATRICIA GARCÍA AGUILAR
SUPLENTE	I. Q. ANA LILIA MALDONADO ARELLANO
SUPLENTE	I. Q. CONSUELO MATÍAS GARDUÑO

El título de la tesis que se presenta es: **EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE LOS PROCESOS DE PRE-OXIDACIÓN-COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN-SEDIMENTACIÓN UTILIZANDO HIPOCLORITO DE SODIO Y COAGULANTES POLIMÉRICOS PARA LA REMOCIÓN DE ALGAS EN AGUA DE PRESA.**

Opción de Titulación: **Tesis profesional**

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
México, D. F. a 20 de septiembre de 2011.

DR. VÍCTOR MANUEL MENDOZA NUÑEZ
DIRECTOR

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES "ZARAGOZA"
DIRECCIÓN

RECIBI
OFICINA DE EXÁMENES PROFESIONALES
Y DE GRADO

Vo Bo

DR. ROBERTO MENDOZA Y SERNA
JEFE DE LA CARRERA DE I. Q.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco la gran oportunidad que me brindo la Universidad Nacional Autónoma de México para ser parte de su familia, a la FES Zaragoza, que me forjo en el aspecto profesional y que apoyó en mi desarrollo personal, a los profesores que fueron parte esencial en el camino del aprendizaje.

Al Instituto de Ingeniería de UNAM por permitirme realizar esta tesis en sus instalaciones y por el apoyo económico que brindó.

A mi director de tesis la Dra. Rosa María Ramírez Zamora, por el apoyo académico recibido, y por el tiempo invertido desinteresadamente, durante casi un año en la preparación de este trabajo, por su paciencia, consejos y confianza, con aprecio y admiración GRACIAS.

Agradezco enormemente a los compañeros del Instituto por el apoyo incondicional: Alejandro, Bertha, Cecy, David, Fabricio, Gaby Ramírez, Jessy, Julián, Kitzia, Miryan, Oscar, Oswaldo, Ricardo y Sergio.

DEDICATORIAS

Primeramente gracias a dios que siempre ha estado a mi lado, dando las fuerzas y guiándome en el camino.

A mis padres Roberto y Rossana, por forjarme como la persona que soy y por su apoyo que siempre me brindan, por sus sabios consejos, por su confianza, paciencia, compañía, dinero y por supuesto, y lo más importante por su amor que me hace salir adelante y enfrentare a nuevos retos. Gracias por su apoyo incondicional, y sobre todo por su amor. Son mi inspiración, los Amo.

A mis hermanos Alberto y Yoana por el apoyo moral y espiritual que han sabido brindarme. Por su amor, paciencia y compañía en mis desvelos, porque siempre han estado a mi lado en los momentos buenos y malos, gracias.

A mis abuelos, que siempre han creído en mí, porque me han apoyado en momentos difíciles. A mis tíos y tías, y a toda la familia, por su ánimo para poder concluir esta importante etapa de mi vida.

A mis amigos que nos apoyamos en nuestra formación profesional, en las buenas y en las malas: Adán, Alan, Beto, Cesar, David, Gilberto, Jorge, Jonás, Raúl y Ricardo.

A mis compañeros del IINGEN que me apoyaron a lo largo de mi estancia en estas instalaciones: Alejandro, Ariadna, Bertha, Cecy, David, Fabricio, Gaby Ramírez, Jessy, Julián, Kitzia, Myriam, Oscar, Oswaldo, Ray, Ricardo y Sergio.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	5
ÍNDICE DE TABLAS	8
ÍNDICE DE FIGURAS	9
NOMENCLATURA	10
RESUMEN	12
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	15
1.1 HIPÓTESIS	17
1.2 OBJETIVOS	17
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	17
1.2.1.1 OBJETIVOS PARTICULARES	17
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	19
2.1 GENERALIDADES DE LAS AGUAS NATURALES	19
2.1.1 Definición y tipos de fuentes de abastecimiento de agua	19
2.1.2 Principales diferencias entre las aguas superficiales y subterráneas	19
2.1.3 Principales fuentes de contaminación de aguas superficiales	20
2.1.4 Algas	21
2.2 GENERALIDADES DE LOS PROCESOS CONVENCIONALES DE POTABILIZACIÓN	24
2.2.1 Agua potable.....	24
2.2.2 Definición de potabilización	24
2.2.3 Norma Oficial Mexicana para agua potable	24
2.2.4 Proceso convencional de potabilización de aguas superficiales	26
2.2.4.1 Pre-oxidación (Precloración)	27
2.2.4.2 Coagulación-Floculación	31
2.2.4.3 Clarificación (sedimentación y flotación por aire disuelto).....	48
2.2.4.4 Filtración	49
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	51
3.1 MATERIALES Y REACTIVOS	52
3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL.....	55
SISTEMA Y PROTOCOLOS EXPERIMENTALES	60
3.3 TÉCNICAS ANALÍTICAS	62
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	65
4.1 CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS DE AGUA CRUDA Y AGUA CONCENTRADA DE ALGAS.....	65
4.2 PRUEBAS DE PRE-OXIDACIÓN-COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN-SEDIMENTACIÓN	67
4.2.1 Resultados generales.....	67
4.2.2 Análisis estadístico de resultados.....	72
4.2.2.1 ANOVA	73
4.2.3 Factores de influencia significativa sobre los procesos POx-CF-S	79
4.2.4 Cálculo de los valores óptimos de las variables del proceso de pre-oxidación-coagulación-floculación-sedimentación para la remoción de algas, color y turbiedad	84

4.3 ESTIMACIÓN DE LA PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA: MATRIZ DE DECISIÓN MULTICRITERIO.....	87
CONCLUSIONES.....	97
RECOMENDACIONES.....	99
REFERENCIAS	101
ANEXOS	114
ANEXO I	114
ANEXO II	117
ANEXO III	119
ANEXO IV	122
ANEXO V	127
ANEXO VI	147

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1 DIFERENCIAS ENTRE LAS AGUAS SUPERFICIALES Y LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS (BARRAQUE ET AL., 1979).	20
TABLA 2.2 LÍMITES PERMISIBLES DE CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y ORGANOLÉPTICAS.	25
TABLA 2.3 LÍMITES PERMISIBLES DE CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS.	25
TABLA 2.4 POTENCIALES REDOX DE ALGUNOS AGENTES OXIDANTES.	27
TABLA 2.5 PRINCIPALES REACTIVOS EMPLEADOS PARA COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN EN POTABILIZACIÓN (MATILAINEN ET AL., 2010).	32
TABLA 2.6 REMOCIÓN DE ALGAS MEDIANTE LA DOSIFICACIÓN DE SULFATO DE ALUMINIO.	37
TABLA 2.7 USO DEL SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE EN PLANTAS POTABILIZADORAS.	38
TABLA 2.8 PROPIEDADES PARTICULARES DEL SULFATO DE ALUMINIO SÓLIDO.	39
TABLA 2.9 PROPIEDADES PARTICULARES DEL SULFATO DE ALUMINIO LÍQUIDO.	39
TABLA 2.10 CLASIFICACIÓN Y DESIGNACIÓN DEL SULFATO DE ALUMINIO (NMX-AA-122-SCFI-2006).	40
TABLA 2.11 ESPECIFICACIONES DEL SULFATO DE ALUMINIO (NMX-AA-122-SCFI-2006).	40
TABLA 2.12 CARACTERÍSTICAS DE POLÍMEROS ORGÁNICOS (HENDRICKS, 2006).	42
TABLA 2.13 ESPECIFICACIONES PARA PDADMAC (NMX-AA-136-SCFI-2007).	44
TABLA 2.14 ESPECIFICACIONES PARA PDADMAC (EUROPEAN STANDART EN 1408:1998).	45
TABLA 2.15 ESPECIFICACIONES DEL PDADMAC (NMX-136-SCFI-2007).	45
TABLA 3.1 CARACTERÍSTICAS DEL HIPOCLORITO DE SODIO UTILIZADO COMO PRE-OXIDANTE EN PRUEBAS DE PRE-OXIDACIÓN-COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN-SEDIMENTACIÓN CON AGUA DE PRESA.	53
TABLA 3.2 REACTIVOS COAGULANTES EMPLEADOS EN LAS PRUEBAS DE PRE-OXIDACIÓN-COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN.	54
TABLA 3.3 REACTIVOS COAGULANTES EMPLEADOS EN LAS PRUEBAS DE PRE-OXIDACIÓN-COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN.	54
TABLA 3.4. NÚMERO DE PRUEBAS Y VALOR ALFA PARA EL DISEÑO POX-CF-SEDIMENTACIÓN.	57
TABLA 3.5 INTERVALOS DE DOSIFICACIÓN DE REACTIVOS Y DE CONCENTRACIÓN DE ALGAS PARA LOS EXPERIMENTOS DE POX-CF-S.	58
TABLA 3.6 MATRIZ EXPERIMENTAL CODIFICADA DEL DCC, PARA LAS PRUEBAS DE PRE-OXIDACIÓN-COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN DE AGUA DE PRESA.	59
TABLA 3.7 TIEMPOS Y VELOCIDADES DE AGITACIÓN EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN EN LAS PRUEBAS DE JARRAS.	61
TABLA 3.8 TÉCNICAS ANALÍTICAS UTILIZADAS PARA LAS PRUEBAS DE POX-CF-S.	62
TABLA 4.1 CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA-A PARA EL AGUA CRUDA (A) Y LOS CONCENTRADOS (C) DE ALGAS DE PRESA. ...	65
TABLA 4.2 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA A TRATAR CON LOS NIVELES DE CLOROFILA-A ESTIPULADOS EN LA MATRIZ DE EXPERIMENTOS.	66
TABLA 4.3 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE PRE-OXIDACIÓN-COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN-SEDIMENTACIÓN (POX-C-F-S), COMBINACIÓN; HIPOCLORITO DE SODIO-PDADMAC-PA1-SEDIMENTACIÓN.	67
TABLA 4.4 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE PRE-OXIDACIÓN-COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN-SEDIMENTACIÓN (POX-CF-S), COMBINACIÓN: HIPOCLORITO DE SODIO-SA STD-PA2-SEDIMENTACIÓN.	68
TABLA 4.5 RESUMEN DE PORCENTAJES DE APROBACIÓN RESPECTO A LOS LÍMITES ESTABLECIDOS EN LA MODIFICACIÓN DE LA NOM-127-SSA1-1994 EMITIDA EN EL AÑO 2000, DE LAS COMBINACIONES DE PRE-OXIDANTE-COAGULANTE-FLOCULANTE (POX-CF-S).	71
TABLA 4.6 REPORTE DE ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL CONTENIDO RESIDUAL DE CLOROFILA-A DEL AGUA TRATADA POR POX-CF-S POR LA COMBINACIÓN HIPOCLORITO DE SODIO-PDADMAC-PA1.	74
TABLA 4.7 REPORTE DE ANÁLISIS ESTADISTICO Y DE VARIANZA DE CONTENIDO RESIDUAL DE CLOROFILA-A PARA LA COMBINACION HIPOCLORITO DE SODIO- SA STD.	74
TABLA 4.8 VALORES DE LOS PARÁMETROS DE VALIDEZ ESTADÍSTICA PARA LOS MODELOS ESTADÍSTICOS OBTENIDOS POR EL ANÁLISIS DE VARIANZA, PARA PRE-OXIDACIÓN CON HIPOCLORITO DE SODIO-CF-S.	78
TABLA 4.9 ANOVA DE LAS DOS COMBINACIONES DE REACTIVOS DE LOS PROCESOS DE POX-C-F.	79

TABLA 4.10 LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA LOS FACTORES DE RESPUESTA O PARÁMETROS DE CALIDAD DE AGUA UTILIZADA PARA LOS CÁLCULOS DE OPTIMIZACIÓN DE LOS PROCESOS POX-CF-S (NOM-127-SSA1-1994)	85
TABLA 4.11 RESULTADOS DE OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE POX-C-F-S UTILIZANDO HIPOCLORITO DE SODIO Y DOS COMBINACIONES DE COAGULANTE-FLOCULANTE (PDAMAC-PA1 Y SA STD-PA2)	85
TABLA 4.12 PONDERACIONES ASIGNADAS A LOS ASPECTOS EVALUADOS EN LA MDM PARA PRE-SELECCIONAR LA OPCIÓN MÁS FACTIBLE DE POX-CF	87
TABLA 4.13 CÁLCULO DE LA PRE-FACTIBILIDAD TÉCNICA, UTILIZANDO LA METODOLOGÍA DE LA MATRIZ DE DECISIÓN MULTICRITERIO (MDM), PARA EL PROCESO DE PRE-OXIDACIÓN-COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN-SEDIMENTACIÓN.	93
TABLA 4.14 CÁLCULO DE LA PRE-FACTIBILIDAD ECONÓMICA Y EL TOTAL SUMANDO LA PRE-FACTIBILIDAD TÉCNICA, UTILIZANDO LA METODOLOGÍA DE LA MATRIZ DE DECISIÓN MULTICRITERIO (MDM), PARA EL PROCESO DE PRE-OXIDACIÓN-COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN-SEDIMENTACIÓN.....	94
TABLA 4.15 CALIFICACIÓN DE LA PRE-FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DEL PROCESO DE PRE-OXIDACIÓN-COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN-SEDIMENTACIÓN PARA REMOCIÓN DE AGUA DE PRESA.	95

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 TREN DE CONVENCIONAL DE PLANTAS POTABILIZADORAS DE AGUA SUPERFICIAL.	26
FIGURA 2.2 CANTIDADES RELATIVAS DEL ÁCIDO HIPOCLOROSO Y EL ION HIPOCLORITO EN FUNCIÓN DEL PH DEL AGUA.	29
FIGURA 2.3 DEMANDA EN CLORO DE UN AGUA NATURAL.	29
FIGURA 2.4 MECANISMO DE REMOCIÓN DE PARTÍCULAS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE COAGULANTE Y FLOCULANTE.....	34
FIGURA 2.5 EFECTO DE LA DOSIFICACIÓN DEL COAGULANTE SOBRE LAS LIMITACIONES EN EL INTERVALO DE PH.	41
FIGURA 2.6 ESTRUCTURA QUÍMICA DE UN POLÍMERO CATIONICO.....	43
FIGURA 2.7 ESTRUCTURA BASE DE UN POLÍMERO ANIÓNICO.	43
FIGURA 2.8 ESTRUCTURA BASE DE UN POLÍMERO NO IÓNICO.	43
FIGURA 2.9 ESTRUCTURA QUÍMICA DEL POLI-CLORURO DE DIALILDIMETILAMONIO PDADMAC.....	44
FIGURA 3.1 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS PUNTOS DE DCC PARA LOS EXPERIMENTOS DE POX-CF-SEDIMENTACIÓN. .	57
FIGURA 4.1 COLOR RESIDUAL COMPARANDO LOS DOS COAGULANTES EMPLEADOS CON HIPOCLORITO DE SODIO COMO PRE-OXIDANTE.....	69
FIGURA 4.2 CLOROFILA-A RESIDUAL COMPARANDO LOS DOS COAGULANTES EMPLEADOS CON HIPOCLORITO DE SODIO COMO PRE-OXIDANTE.....	69
FIGURA 4.3 TURBIEDAD RESIDUAL COMPARANDO LOS DOS COAGULANTES EMPLEADOS CON HIPOCLORITO DE SODIO COMO PRE-OXIDANTE.....	70
FIGURA 4.4 PRODUCCIÓN DE LODOS COMPARANDO LOS DOS COAGULANTES EMPLEADOS CON HIPOCLORITO DE SODIO COMO PRE-OXIDANTE.....	70
FIGURA 4.5 SUPERFICIE DE RESPUESTA ESTIMADA FACTOR A: CLOROFILA INICIAL=0.00 (45µg/L) DEL CONTENIDO RESIDUAL DE CLOROFILA-A EN FUNCIÓN DE LA DOSIS DE PRE-OXIDANTE (HIPOCLORITO DE SODIO) Y DE COAGULANTE (PDADMAC).	82
FIGURA 4.6 SUPERFICIE DE RESPUESTA ESTIMADA FACTOR A: CLOROFILA INICIAL=0.00 (45µg/L) DEL CONTENIDO RESIDUAL DE CLOROFILA-A EN FUNCIÓN DE LA DOSIS DE PRE-OXIDANTE (HIPOCLORITO DE SODIO) Y DE COAGULANTE (SA STD). 83	

NOMENCLATURA

ANOVA	Análisis de varianza
APHA American	Asociación Americana de la salud pública del inglés <i>American Public Health Association</i>
APM	Alto peso molecular
BPM	Bajo peso molecular
Clorf-a	Clorofila-a inicial
COT	Carbono Orgánico Total
COD	Carbono Orgánico Disuelto
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
DCC	Diseño central compuesto
Fe	Hierro
g	Gramos
h	Horas
HAA	Ácidos haloacéticos
HAN	Haloacetnitrilos
HK	Haloacetonas
IUPAC	Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (del inglés <i>International Union of Pure and Applied Chemistry</i>)
L	Litros
MON	Materia orgánica natural
m ²	Metros cuadrados
mg	miligramos
Máx.	Máximo
Mín.	Mínimo
NOM	Norma Oficial Mexicana
PA1	Poliamina de carga catiónica / PM Alto
PA2	Poliamina de carga catiónica / PM Bajo
PACI	Policloruro de aluminio
pDADMAC	Cloruro de polidialilmetilamonio
PM	Peso molecular
POx-C-F-S	Proceso de pre-oxidación-coagulación-floculación-sedimentación
P.L	Producción de lodos
pH	pH final
rT	Turbiedad residual
rC	Color residual
rClorf-a	Clorofila- a residual
rFe	Hierro residual
rAl	Aluminio residual
SA STD	Sulfato de aluminio estándar

SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
THMs	Trihalometanos
THMT	Trihalometanos totales
UNT	Unidades nefelométricas de turbiedad
UV	Ultra violeta
WHO	Organización Mundial de la Salud (del inglés <i>World Health Organization</i>)
μL	Microlitros (10^{-6} litros)
μg	Microgramos (10^{-6} gramos)

Resumen

En este estudio se evalúa la prefactibilidad técnico-económica de los procesos de pre-oxidación-coagulación-floculación-sedimentación (POx-C-F-S) utilizando hipoclorito de sodio como pre-oxidante, cloruro de polidialilmetilamonio (pDADMAC) como coagulante y PA1 [poliamina de carga catiónica/ de alto peso molecular (APM)] como floculante para la remoción de algas. Cabe mencionar que estos reactivos se compararon con la combinación de hipoclorito de sodio-sulfato de aluminio estándar (SA STD) y PA2 [poliamina de carga catiónica / de bajo peso molecular (BPM)] los cuales son los reactivos que más se utilizan en plantas potabilizadoras.

Este manuscrito está conformado por cuatro capítulos y conclusiones:

- Capítulo I, Introducción.
- Capítulo II, Marco Teórico.
- Capítulo III, Metodología Experimental.
- Capítulo IV, Análisis y discusión de resultados.
- Conclusiones.

El primer capítulo presenta la introducción y los objetivos a alcanzar de este estudio. En este apartado se plantea la problemática relacionada con la presencia de algas en cuerpos de abastecimiento de agua, y su remoción por pre-oxidación-coagulación-floculación-sedimentación.

En el capítulo II se presenta información detallada de los problemas que representan las algas en aguas de presa; debido a que los crecimientos masivos de algas causan problemas principalmente en el tratamiento de agua, ocasionando un olor desagradable, problemas en el proceso de filtración, acortando las corridas de filtración (40%) dado que pueden penetrar en el filtro lo que conlleva al deterioro de calidad de agua potable. Las algas pueden liberar compuestos que son precursores de los subproductos de la desinfección. La remoción se logra combinando los procesos de pre-oxidación con coagulación-floculación-sedimentación, estos procesos son los más accesibles desde el punto de vista económico, y los que más se utilizan en plantas potabilizadoras. Se seleccionó el proceso de pre-oxidación-coagulación-floculación-sedimentación para la remoción de algas presentes en agua de presa. Por lo que se planteó utilizar hipoclorito de sodio como pre-oxidante, pDADMAC como coagulante y PA1 como floculante comparado a la combinación de hipoclorito de sodio-SA STD-PA2 con el fin de determinar el coagulante más eficiente.

En el Capítulo III, se describe la metodología experimental desarrollada en este trabajo de investigación. Las pruebas se realizaron a nivel de laboratorio, con base en la técnica de prueba de jarras y siguiendo un diseño experimental central compuesto (DCC). Para este caso, los factores experimentales (o factores de diseño) fueron: contenido inicial de Clorofila-a, dosis de Pre-oxidante y dosis de Coagulante. Como variables de respuesta, se seleccionaron: Color residual (rC), Turbiedad residual (rT), Clorofila-a residual (rClor-a), pH final (pH-f), oxidante residual (rPOx), producción de lodos (P.L), hierro residual (rFe) y aluminio residual (rAl).

Los resultados obtenidos con base en diseños experimentales, así como el análisis estadístico de estos se presentan en el Capítulo IV, el análisis estadístico de los resultados permitieron conocer los factores de influencia estadísticamente significativos (95% de nivel de confianza) sobre el proceso de remoción de algas que fueron: A-Clorofila-a inicial, B-dosis de oxidante, C-dosis de coagulante así como las interacciones AB Y BC. Los resultados de estas pruebas permitieron desarrollar modelos matemáticos en función de las variables, los cuales con un método iterativo permitieron estimar los valores óptimos de esas variables para los dos grupos de reactivos de coagulación-floculación. Bajo condiciones óptimas, se realizó un estudio de prefactibilidad técnica-económica, utilizando el método de matriz de decisión multicriterio (MDM), con la finalidad de definir la mejor combinación de pre-oxidante-coagulante-floculante de las dos evaluadas.

Dentro de las principales conclusiones se determinó que los procesos de POx-C-F-S presentaron una mejor prefactibilidad técnico-económica utilizando hipoclorito de sodio-pDADMAC-PA1-Sedimentación, con una calificación de 86.25/100, respecto a la combinación hipoclorito de sodio-SA STD-PA2 con calificación de 52.5/100. Los valores óptimos de dosis de la mejor combinación de POx-CF calculados, a adicionar a una agua cruda [con concentraciones iniciales de clorofila-a comprendidas entre 10 y 80 $\mu\text{g/L}$ (parámetro indirecto de contenido de algas), 84 a 195 U Pt-Co de color y de 12 a 21 UNT de turbiedad], fueron de; 0.12 mg/L a 2.50 mg/L de hipoclorito de sodio, de 2.68 mg/L a 3.00 mg/L de pDADMAC y 0.1 mg/L de PA1 (poliamina de carga catiónica / de alto peso molecular). Con estas dosis óptimas fue posible remover eficientemente algas (cuantificadas de manera indirecta como clorofila-a, color y turbiedad) por pre-oxidación-coagulación-floculación-sedimentación (efluente: de 0 a 0.24 $\mu\text{g/L}$ de clorofila-a residual, de 0 a 11.4 U Pt-Co de color y de 0 a 2.19 UNT de turbiedad) con un costo de reactivo para el tratamiento agua estimado en USD/ m^3 de (0.0090 y 0.0145 USD/ m^3) y en USD/año (283,532.04 y 456,195.11 USD/año) respectivamente para cada dosis de POx-CF.

1 INTRODUCCIÓN

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

En México, como en la mayoría de los países del mundo, la problemática del abastecimiento de agua es de una magnitud equivalente al tamaño de cada país en cuestión. Por otra parte, los reglamentos institucionales vigentes no son lo suficientemente apropiados para detener y revertir la situación de la escasez y contaminación (Benez *et al.*, 2010).

En México, principalmente en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), el aumento descontrolado y vertiginoso de la población y el gran desarrollo industrial, ejercen grandes presiones sobre el abasto de agua para la población. Esto ha obligado al uso de diversas fuentes de abastecimiento de agua, para su potabilización con el fin de dar un agua de calidad a la población.

A partir de la década de los años setenta, ha aumentado sustancialmente el número de acuíferos sobreexplotados. Las fuentes de abastecimiento, de agua subterránea o acuíferos, ubicados en el territorio nacional ascienden a 653. Alrededor de 100 acuíferos están sometidos a sobreexplotación. Estos suministran aproximadamente el 53.6% del agua subterránea destinada para cualquier uso. Debido a la sobreexplotación, se limita su utilización ya que se sobrepasa su capacidad de recarga. Por tal motivo se pretende utilizar en mayor proporción agua superficial para su potabilización.

Las fuentes de agua superficial pueden contener diversos compuestos, tanto de origen natural como antropogénico. Estos pueden ser metales, materia orgánica disuelta, microorganismos, como algas, virus, bacterias, parásitos, etc., y compuestos que impartan olor, color y sabor al agua (origen inorgánico y orgánico), por mencionar algunos. Aunque existen muchos compuestos en el agua, son pocos los regulados para obtener un agua apta para consumo humano.

Para eliminar los contaminantes presentes en el agua, se implementan principalmente tratamientos físicoquímicos. La potabilización de agua comprende una serie de procesos cuya finalidad es transformar la materia prima inicial (agua cruda) en un producto final (agua potable) que esté de acuerdo con las características impuestas por las normas vigentes (Abramovich *et al.*, 2004).

En México, 631 plantas potabilizadoras están en funcionamiento con una capacidad instalada de 133 m³/s y un caudal potabilizado de 90,000 m³/s (CONAGUA, 2011). El 31% de las plantas potabilizadoras actualmente utilizan el proceso de clarificación convencional, con 69.2% del gasto producido, es decir, producen un caudal potabilizado de 62.29 m³/s del total de las plantas potabilizadoras por otro proceso (CONAGUA, 2011).

La presencia de las algas en las aguas superficiales, generalmente no representan problema para los procesos de tratamiento de agua cuando se presentan en bajas concentraciones (Ramírez, 2008). Sin embargo, hay crecimientos drásticos estacionales, que afectan la eficacia del proceso de tratamiento de agua (Henderson *et al.*, 2008), la baja remoción de estos organismos provoca la obstrucción de los filtros de arena, reduciendo de manera importante (40%) la duración de las corridas de filtración (Ramírez, 2008). Para disminuir la presencia de algas, la coagulación-floculación es de las tecnologías más aplicadas y, económicamente viables, sobre todo si se combina con pre-oxidantes (Matilainen, 2002). Dentro de los coagulantes más utilizados se tienen a las sales de aluminio, las cuales pueden generar grandes volúmenes de lodos, aunado que el costo de este coagulante incrementa constantemente. Debido a lo anterior, es importante evaluar nuevos reactivos como los polímeros orgánicos para la remoción de algas y para disminuir el volumen generado de lodos, ya que el manejo y disposición de estos residuos impacta también en los costos (Ramírez, 2008).

En este estudio se evalúa la prefactibilidad técnico-económica de los procesos de pre-oxidación-coagulación-floculación-sedimentación utilizando hipoclorito de sodio como pre-oxidante, pDADMAC como coagulante y PA1 como floculante comparado a la combinación hipoclorito de sodio, SA STD y PA2 con el fin de obtener la mejor combinación de POx-CF para la remoción de algas de un agua de presa.

1.1 HIPÓTESIS

La utilización de hipoclorito de sodio y coagulantes poliméricos hará más eficiente los procesos de pre-oxidación-coagulación-floculación-sedimentación respecto al uso del hipoclorito de sodio y el sulfato de aluminio para remover algas en agua de presa.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la prefactibilidad técnico-económica de los procesos de pre-oxidación-coagulación-floculación-sedimentación utilizando hipoclorito de sodio y coagulantes poliméricos para la remoción de algas en agua de presa.

1.2.1.1 OBJETIVOS PARTICULARES

- Identificar los factores evaluados de influencia significativa (95% de nivel de confianza) sobre los procesos estudiados, mediante pruebas realizadas con base en un diseño experimental.
- Calcular los valores óptimos de las variables evaluadas en este estudio para producción de un efluente tratado por POx-C-F-S, con cinco valores o niveles de clorofila-a (algas) comprendidos en un intervalo de 10 a 80 $\mu\text{g/L}$.
- Estimar los costos de reactivos para el tratamiento de agua de los procesos estudiados, utilizando los valores óptimos mínimos y máximos que se calcularon a partir de las variables evaluadas.
- Establecer la mejor combinación de pre-oxidante-coagulante-floculante para la remoción de clorofila-a, color y turbiedad del agua tratada, con base en los valores óptimos calculados de las variables evaluadas y los costos estimados de reactivos para el tratamiento de agua de los procesos estudiados.

2 MARCO TEÓRICO

Capítulo 2. MARCO TEÓRICO

2.1 GENERALIDADES DE LAS AGUAS NATURALES

2.1.1 Definición y tipos de fuentes de abastecimiento de agua

De acuerdo a la forma en que se encuentran en la naturaleza, las distintas fuentes de provisión de agua, son las siguientes (Vera, 2007):

- **Aguas superficiales;** son aguas que escurren o se almacenan sobre la superficie terrestre tales como: ríos, arroyos, lagos, embalses, mares. Al escurrir por la superficie estas corrientes naturales están sujetas a la contaminación generada por el hombre y sus actividades, transformándolas en muchos casos en nocivas o impropias para la salud. Su calidad depende del tipo de suelo y vegetación.
- **Aguas subterráneas;** son las que penetran por las porosidades del suelo mediante el proceso denominado infiltración.
- **Aguas meteóricas;** pueden encontrarse en estado vapor, como líquido suspendido en nubes, o cayendo en forma de granizo, lluvia o nieve. Es prácticamente pura, se caracteriza por su carencia de sales minerales, es blanda, saturada de oxígeno, con alto contenido de CO₂ y por consiguiente corrosiva.

En nuestro país debido a la precipitación tan irregular que se presenta, no es muy común aprovechar las aguas meteóricas (Vera, 2007).

2.1.2 Principales diferencias entre las aguas superficiales y subterráneas

Debido a que actualmente existe una gran sobreexplotación en agua subterránea, se usa actualmente en mayor proporción el agua superficial para su potabilización. En México, datos de la INEGI en el 2011 dieron a conocer que el 63% de la extracción bruta de agua fue de origen superficial y 37% de origen subterráneo.

En la Tabla 2.1 se presentan las diferencias que existen entre las aguas superficiales y las aguas subterráneas. Se puede observar que existen diferencias significativas, para ambos tipos de agua, debido a la exposición del agua (Barraque et al., 1979).

TABLA 2.1 Diferencias entre las aguas superficiales y las aguas subterráneas (Barraque et al., 1979).

Parámetros	Aguas superficiales	Aguas subterráneas
Temperatura	Variables según la época del año	Relativamente constante
Turbiedad (materia en suspensión)	Variable en función de los terrenos, precipitación, vertidos, etc.	En las aguas subterráneas es mayor el contenido de sólidos disueltos que suspendidos.
Mineralización	Generalmente ausentes, salvo en el fondo de cuerpos de agua en estado de eutroficación	Generalmente presentes
Hierro y manganeso divalentes en estado disuelto	Generalmente ausente	Normalmente presentes en gran cantidad
Dióxido de carbono	Normalmente próximo a la saturación	Ausencia total en la mayoría de los casos presencia frecuentemente, sin ser un índice sistemático de contaminación.
Amonio	En los peces e invertebrados acuáticos se excreta directamente en el agua contaminando el agua	Presencia frecuentemente, sin ser un índice sistemático de contaminación
Ácido sulfúrico	Ausente	Normalmente presente
Sílice	Contenido moderado	Contenido normalmente elevado
Nitratos	Poco abundante en general	Contenido a veces elevado, riesgo de metahemoglobinemia
Microorganismos	Bacterias, virus, plancton.	Bacterias principalmente ferrobacterias

2.1.3 Principales fuentes de contaminación de aguas superficiales

Del total el agua disponible en el mundo, el 97.5% es agua salada y solo el 2.5% es agua dulce. De esta cantidad, el 70% no está disponible para consumo humano ya que se encuentra en glaciares, en nieve y hielo. Del agua para consumo humano, sólo una pequeña porción se encuentra en lagos, ríos, humedad del suelo y depósitos subterráneos relativamente poco profundos, que se renuevan por la infiltración. A nivel mundial el agua con características aptas para consumo humano se encuentra en zonas alejadas, lo cual dificulta en gran medida su uso (CNA, 2008).

La contaminación de los recursos hídricos superficiales es un problema cada vez más grave debido a que estos se usan como destino final de residuos domésticos e industriales. El origen de la contaminación de estas puede ser de dos tipos: natural (materia orgánica) y la producida por actividades humanas o antropogénica (industrial, vertidos urbanos, etc.). En los últimos años, la contaminación de agua superficial por medio de algas se ha convertido en un problema mundial, causando varios problemas en el tratamiento de agua de tipo convencional, causan problemas de color y sabor y son subproductos de la desinfección como los trihalometanos además incluye el taponamiento de los filtros, etc. (Shen et al., 2010).

2.1.4 Algas

Todos los organismos que se encuentran en el agua son importantes para el control de la calidad de ésta, algunos de estos organismos son las algas. En muchos sistemas de aguas superficiales, la productividad de algas es una fuente importante de la materia orgánica natural (Akhlaq *et al.*, 1990). Las características más importantes de las algas, es la fotosíntesis autótrofa como vía principal de nutrición y síntesis de nueva materia orgánica para el organismo (Hammer, 1996; Rojo, 2006). El término alga se refiere a un grupo de organismos, de una diversidad morfológica y fisiológica, que contienen clorofila y que llevan a cabo la producción de oxígeno por medio de la fotosíntesis (Rojo, 2006). Las algas son uno de los contaminantes que afecta de manera significativa la calidad del agua y su tratamiento de potabilización (Matilainen, 2002; Chen *et al.*, 2007).

La presencia de las algas causadas por la eutrofización de las aguas superficiales es el problema actual y creciente en la producción de agua potable (Ju Ma, 2001), causando problemas de color, olor y sabor (Shanshan *et al.*, 2009).

En determinadas épocas del año (época de estiaje y de lluvias) en que las condiciones de temperatura y concentración de nutrientes son favorables, presentan un crecimiento excesivo las algas, lo cual deteriora la calidad del agua, debido a la variación de pH, color, turbiedad, olor y sabor; provocando un mal funcionamiento de los trenes de tratamiento de las plantas potabilizadoras, sobre todo en el proceso de filtración (Jun *et al.*, 2001).

Las algas son organismos acuáticos fotosintéticos (fitoplancton) que poseen tamaños variados, desde 2 μm hasta formar colonias mayores que pueden verse a simple vista (Parsons y Jefferson, 2006). Existen diferentes especies de algas, pero durante los periodos de eutroficación, se ha detectado que las especies dominantes son las diatomeas, algas verdes y cianobacterias (Jun *et al.*, 2001; Parsons y Jefferson, 2006). Los pigmentos fitoplancton se han analizado desde hace cerca de 50 años por métodos espectrofotométricos (Richard y Thompson, 1952), lo que permitió discernir tres tipos de clorofila (a, b y c), donde la clorofila-a es determinante como marcador de todas las algas presentes en el agua (Rojo, 2006). Una característica en particular es que todas las especies de algas pueden ser cuantificadas indirectamente, mediante la detección del pigmento clorofila-a (Gregor y Maršálek, 2004).

Las algas generalmente no representan problema para los procesos de tratamiento de agua cuando se presentan en bajas concentraciones. Sin embargo, puede haber crecimientos drásticos estacionales, que afectan la eficacia de estos procesos (Parsons y Jefferson, 2006; Henderson *et al.*, 2008). Las algas y la materia orgánica asociada a ellas, pueden tener efectos sobre la calidad del agua, como la impartición de color, sabor

y olor, formación de subproductos de desinfección (SPDs), así como la presencia de toxinas, principalmente asociadas a cianobacterias identificadas como precursores de trihalometanos, además de que imprimen olor y sabor en el agua (Henderson *et al.*, 2008).

La coagulación-floculación es de las tecnologías mayormente aplicadas para la remoción de algas debido a que es de los procesos más utilizados en plantas de tratamiento de agua (Matilainen, 2002). El típico tren de tratamiento de una planta de tratamiento de agua es el siguiente: coagulación-floculación, clarificación [sedimentación o flotación con aire disuelto (DAF)] y filtración en medio granular. Para obtener porcentajes de remoción de algas de 70-90%, se requiere que las algas sean removidas, preferentemente en las etapas iniciales del tren de tratamiento, con la finalidad de causar menos impacto en las etapas subsecuentes (Henderson *et al.*, 2008). Por lo que la oxidación previa al proceso de coagulación-floculación-sedimentación es una alternativa razonable a la coagulación mejorada y reforzada para la remoción de algas (Chen *et al.*; 2007). La pre-oxidación se utiliza antes del proceso de coagulación-floculación para facilitar la remoción de algas, materia orgánica, color, olores y sabores, y partículas disueltas (Yan *et al.*, 2007).

En particular, para la remoción de algas, existen pocos tratamientos. A continuación se muestran algunos estudios que han sido publicados respecto al desempeño de diferentes procesos para potabilización de agua para la remoción de algas:

La eliminación de las algas por el proceso de electro-coagulación-flotación (ECF), está en función del tiempo de tratamiento de la muestra; con el electrodo de hierro se observó que eran menos eficientes en comparación con el electrodo de aluminio, llegando a remociones de 78.9% y 100% respectivamente. Los parámetros óptimos con el electrodo de aluminio son: la densidad de corriente = $1\text{mA}/\text{cm}^2$, pH = 4.7, la temperatura del agua = 18-36 °C, la densidad de algas = 0.55×10^9 a 1.55×10^9 células/L. Bajo las condiciones óptimas, el 100% de eliminación de las algas se logró con el consumo de energía tan bajo como $0.4\text{kWh}/\text{m}^3$. En general, los resultados indicaron que la tecnología de ECF fue efectiva para eliminar las algas, desde el punto de vista técnico-económico (Shanshan *et al.*, 2009).

Para eliminar eficazmente las algas de agua potable, se utilizan procesos combinados como el de cloración y coagulación y con una dosis de permanganato de potasio de 0.3mg/L. Los resultados muestran que la densidad de algas aumenta con un incremento de la temperatura de agua (5°C, 10×10^6 células/L – 30°C, 50×10^6 células/L). Cuando la densidad de algas en el agua cruda es inferior a 1.0×10^6 células/L, más del 98% de las algas se pueden remover con una dosis de coagulante de 13 mg/L. Cuando la densidad de algas se incrementa a más de 10×10^6 células/L, es decir, las células de las algas durante el periodo de brote, el 96% o más de las algas se pueden eliminar con el

coagulante y el cloro de las dosis de aproximadamente 20 mg/L y 4.0 mg/L respectivamente ([Shen et al., 2010](#)).

La aplicación de carbón activado en polvo en plantas potabilizadoras para la remoción de metabolitos de algas no ha permitido eliminar de manera significativa el problema de olor y sabor atribuido a estos compuestos. Por lo que es necesario evaluar alternativas viables desde el punto de vista técnico-económico para la eliminación de algas presentes en agua de presa ([Ramírez et al., 2006](#)).

2.2 GENERALIDADES DE LOS PROCESOS CONVENCIONALES DE POTABILIZACIÓN

2.2.1 Agua potable

Se denomina como agua potable a aquella agua que no contiene contaminantes objetables, ya sean químicos o agentes infecciosos y que no causa efectos nocivos para la salud (NOM-127-SSA-1994).

2.2.2 Definición de potabilización

Al conjunto de operaciones y procesos, físicos y/o químicos que se le aplican al agua, a fin de hacerla apta para uso y consumo humano, se le conoce como potabilización. La potabilización comprende una serie de procesos cuya finalidad es transformar la materia prima inicial (agua cruda) en un producto final (agua potable) que cumpla con las características impuestas por las normas vigentes.

2.2.3 Norma Oficial Mexicana para agua potable

El abastecimiento de agua para uso y consumo humano con calidad adecuada es fundamental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades gastrointestinales (Diarrea, colitis, gastritis, reflujo, agruras), estas enfermedades ocupan una de las primeras causas de consulta médica y son también una de las primeras causas de muerte en México y en el mundo (Sola, 2011). Para lo cual se requiere establecer límites permisibles en cuanto a sus características bacteriológicas, organolépticas, físicas y químicas, para el uso y consumo humano.

Como se ha dicho anteriormente el agua tal como se encuentra en la naturaleza, no es aceptada para el consumo humano. Para convertir un agua cruda en agua apta para consumo humano, es necesario eliminar microorganismos presentes y reducir las concentraciones de todos los elementos que puedan suponer un riesgo para la salud a corto, medio o largo plazo. Además la calificación de agua apta para consumo, exige unos niveles de calidad establecidos por la ley que deberán ser estrictamente respetados. Así el objetivo final de todo tratamiento de potabilización es conseguir un agua tratada con una calidad de acuerdo a la modificación de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 emitida en el año 2000 (denominada NOM-127 por facilidad).

Esta Norma Oficial Mexicana (NOM) establece los límites permisibles de calidad del agua para uso y consumo humano, que deben cumplir los sistemas de abastecimiento públicos y privados o cualquier persona física o moral que la distribuya, en todo el territorio nacional.

Las características físicas y organolépticas deberán ajustarse a lo establecido en la Tabla 2.2 El contenido de constituyentes químicos deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla 2.3. Los límites se expresan en mg/L, excepto cuando se indique otra unidad.

TABLA 2.2 Límites permisibles de características físicas y organolépticas.

Características	Límites permisibles
Color	20 unidades de color verdadero (platino-cobalto).
Olor y sabor	Agradable (se aceptan aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores. Siempre que no sean resultados de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico).
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro métodos.

TABLA 2.3 Límites permisibles de características químicas.

Características	Límites permisibles
Aluminio (mg/L)	0.20
Arsénico (mg/L)	0.05
Bario (mg/L)	0.70
Cadmio (mg/L)	0.005
Cianuros (como CN-) (mg/L)	0.07
Cloro residual libre (mg/L)	0.2-1.50
Cloruros (como Cl-) (mg/L)	250.0
Cobre (mg/L)	2.00
Cromo total (mg/L)	0.05
Dureza total (como CaCO ₃) (mg/L)	500.00
Fenoles o compuestos fenólicos (mg/L)	0.001
Fierro (mg/L)	0.30
Fluoruros (como F-) (mg/L)	1.50
Hidrocarburos aromáticos en µg/L	
Benceno	10.00
Etilbenceno	3000.00
Tolueno	700.00
Xileno (tres isómeros)	500.00
Plaguicidas en µg/L:	
Aldrín y dieldrín (separados o combinados)	0.03
Clordano (total de isómeros)	0.20
DDT (total de isómeros)	1.00
Gamma-HCH (lindano)	2.00
Hexaclorobenceno	1.00
Heptacloro y epoxi de heptacloro	0.03
Metoxicloro	20.00

TABLA 2.3 Límites permisibles de características químicas (Continuación).

Características	Límites permisibles
Plomo (mg/L)	0.01
Sodio (mg/L)	200.00
Sólidos disueltos totales (mg/L)	1000.00
Sulfatos (como SO ₄) (mg/L)	400.00
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM) (mg/L)	0.50
Trihalometanos totales (mg/L)	0.0-0.5
Yodo residual libre (mg/L)	5.0
Zinc (mg/L)	

Los límites permisibles de metales se refieren a su concentración total en el agua, la cual incluye los sólidos suspendidos y los disueltos.

2.2.4 Proceso convencional de potabilización de aguas superficiales

En el tratamiento de aguas superficiales el proceso más utilizado es el fisicoquímico, el cual consiste en remover con ayuda de coagulantes (sales metálicas, poli electrólitos) las algas, sólidos suspendidos y disueltos, la carga orgánica potencialmente peligrosa para la salud. Los productos de este tipo de tratamiento son aguas relativamente libres de materia orgánica, inorgánica y lodos no estabilizados que son la suma de la materia orgánica, inorgánica, suspendida, disuelta, y los coagulantes añadidos.

En la Figura 2.1 se muestra el tren de potabilización más usado para la potabilización de agua superficial, el cual se constituye de los procesos de pre-oxidación-coagulación-floculación, sedimentación por gravedad, filtración y desinfección (Sánchez, 2007).

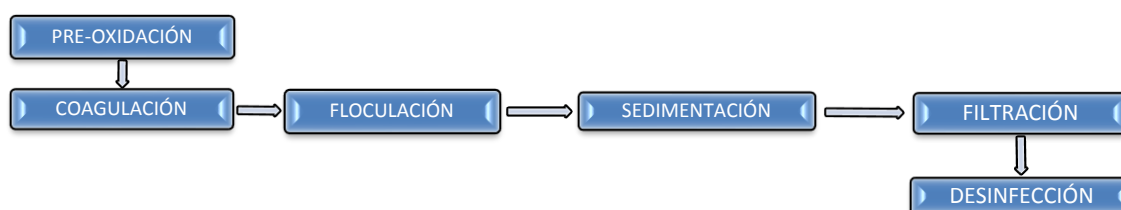


FIGURA 2.1 Tren de convencional de plantas potabilizadoras de agua superficial.

A continuación se exponen detenidamente y de forma individual las generalidades y fundamentos de los procesos de pre-oxidación-coagulación-floculación-sedimentación. Así mismo, se estudian las características y propiedades de los coagulantes propuestos en esta investigación.

2.2.4.1 Pre-oxidación (Precloración)

La pre-oxidación se utiliza inicialmente en el tratamiento de agua potable para la eliminación de diversos contaminantes y mejorar la calidad del agua. Puede eliminar (Yan *et al.*, 2007):

- Características organolépticas (color, olor y sabor)
- Compuestos minerales (hierro, manganeso, etc.)
- Compuestos naturales (MON)
- Degradación o inactivación de los microorganismos (bacterias, algas)

Además se consigue la destrucción de gérmenes patógenos y la mayor eliminación de bacterias (Yan *et al.*, 2007).

Puede mejorar el proceso de coagulación y mejorar específicamente la eliminación de algas, disminuyendo el color y la turbiedad (Jun Ma *et al.*, 2001). Tradicionalmente, la pre-oxidación por ozono, dióxido de cloro, cloro y el permanganato se emplea generalmente para la eliminación de algas en el proceso de coagulación-floculación (Shanshan *et al.*, 2010).

Los agentes oxidantes más frecuentes utilizados son cloro, dióxido de cloro, algunos derivados del cloro, ozono, radiación ultravioleta y peróxido de hidrogeno, entre otros (Sánchez, 2007).

En la Tabla 2.4 se muestran los agentes de oxidación y su potencial de oxidación (Legrini *et al.*, 1993).

TABLA 2.4 Potenciales Redox de algunos agentes oxidantes.

Agente oxidante	Potencial
Flúor	3.03
Radical hidroxilo	2.80
Oxígeno atómico	2.42
Ozono	2.07
Peróxido de hidrogeno	1.78
Radical perhidróxido	1.70
Permanganato	1.68
Ácido hipobromoso	1.59
Dióxido de cloro	1.57
Acido hipocloroso	1.49
Cloro	1.36
Bromo	1.09

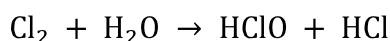
Aunque actualmente el uso del ozono y el dióxido de cloro están en auge debido a su alto poder oxidante, el oxidante más utilizado es el cloro; debido a sus bajos costos de los insumos para su aplicación y a su poder de oxidación, sin embargo se presenta un inconveniente que es la formación de trihalometanos (THMs) especialmente el cloroformo y otros compuestos organoclorados asociados a la generación de problemas a la salud humana.

El cloro es el agente más empleado en la purificación del agua, debido a las siguientes razones:

- Se encuentra fácilmente disponible en forma de gas, líquido o sólido.
- Es barato.
- Es fácil de aplicación debido a su alta solubilidad (7.0 g/L, 20°C).
- Existe un residual en la solución, con una concentración fácilmente determinable, la cual tiene por objeto proteger el sistema de distribución del crecimiento microbiano sin resultar peligrosa para el hombre.
- Es capaz de inactivar la mayoría de los microorganismos patógenos.

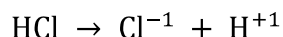
Sin embargo, presenta algunas desventajas como las siguientes: requiere de un manejo cuidadoso, pudiendo causar problemas de sabor y olor particularmente en presencia de fenoles (Ramírez, 2010).

El cloro disuelto en el agua reacciona con su disolvente según la Ecuación 2.1:



ECUACIÓN 2.1

Teniendo como reacción secundaria la Ecuación 2.2.



ECUACIÓN 2.2

La pre-oxidación al igual que la desinfección es más eficiente con niveles de pH bajos debido a que favorece la formación de ácido hipocloroso, un agente alrededor de 80 veces más eficaz que el ion hipoclorito Figura 2.2 (Blanco, 2008).

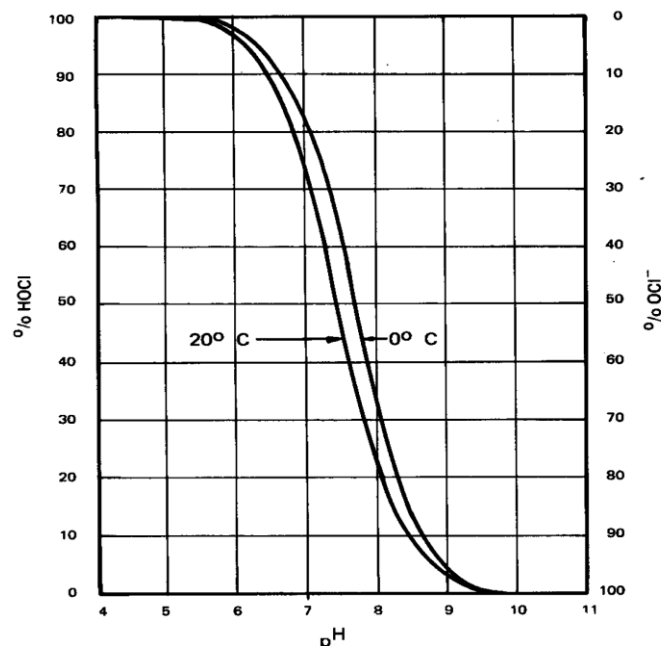


FIGURA 2.2 Cantidades relativas del ácido hipocloroso y el ion hipoclorito en función del pH del agua.

A pH 5, el cloro encuentra en forma de ácido hipocloroso. A pH 10, el cloro se encuentra combinado en forma de iones hipoclorito (Blanco, 2008). Una precloración no reduce necesariamente el color del agua, a no ser que este sea debido a materias húmicas (Blanco, 2008).

La Figura 2.3 muestra que a medida que se adiciona cloro se van produciendo distintos fenómenos (demanda en cloro de un agua):

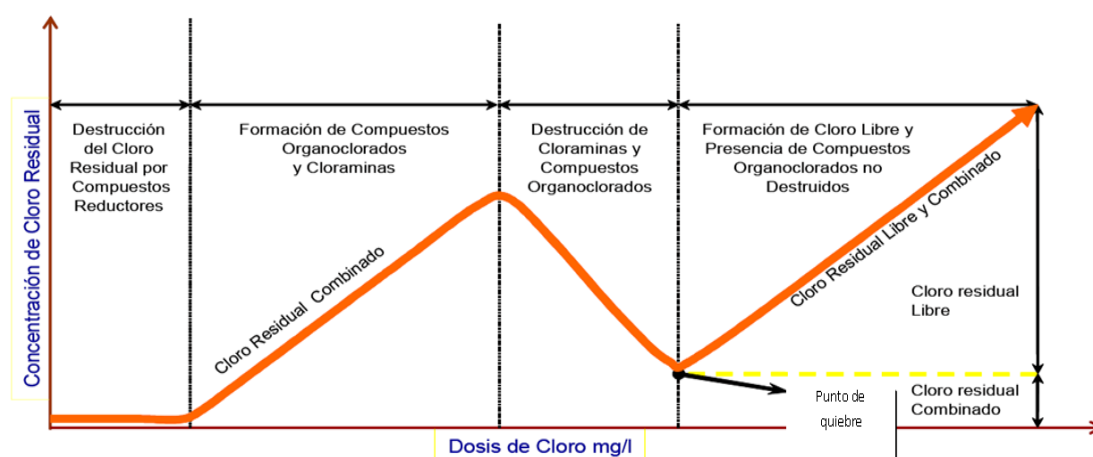


FIGURA 2.3 Demanda en cloro de un agua natural.

En primer lugar el cloro añadido es destruido por los compuestos reductores presentes en el agua. Luego comienza una fase de incremento de la concentración de cloro en la que se forman compuestos organoclorados y cloraminas como consecuencia de la oxidación de la materia orgánica. Cuando todos los compuestos nitrogenados se encuentran en forma de mono-cloraminas, comienza una tercera fase de oxidación de mono-cloraminas a di-cloraminas, tri-cloraminas y finalmente a nitrógeno, el punto en el que todos los compuestos se encuentran nitrogenados han sido destruidos se denomina punto de quiebre (*Break Point*), y a partir de él todo el cloro añadido se convertirá en cloro residual (Blanco, 2008).

Los subproductos de la pre-oxidación y desinfección con cloro al igual que la desinfección son iguales pero en menor cantidad los subproductos de la pre-oxidación. El cloro reacciona con ciertos materiales orgánicos (como compuestos de nitrógeno orgánico y fenoles) para crear subproductos órgano-clorados y Trihalometanos (THMs), entre los cuales se encuentra el cloroformo y en cantidades menores otros.

Los subproductos mayoritarios de la preoxidación con cloro son:

Trihalometanos

Acido haloacéticos

- *Trihalometanos*

El termino “Trihalometanos Totales” (THMT) tiene en cuenta cuatro subproductos de la desinfección que pueden encontrarse en una muestra de agua: el cloroformo, el bromodiclorometano (los dos mas frecuentes), el dibromoclorometano y el bromoformo. Estas sustancias son un peligro para la salud, ya que son considerados potencialmente cancerígenos para el hombre Pueden producir daños en organos como hígado o riñón, mientras que otros tienen efectos sobre la reproducción (Blanco, 2008).

- *Ácidos haloacéticos*

Es una familia de compuestos orgánicos basados en la molecula de ácido acético ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$), en la que uno o más atomos de hidrógeno unidos a los átomos de carbono son remplazados por un halógeno. Son incoloros, presentan una baja volatilidad, se disuelven facilmente en el agua y son relativamente estables (Blanco, 2008).

Hay otros productos que se desarrollan debido a la cloración pero en menor concentración.

- Acetonitrilos halogenados.
- MX (mutágeno X).

- Hidrato de cloral.
- Clorofenoles.
- Otros (haloacetonas, cloropricina, cloruro y bromuro de cianogeno).

El cloruro de cianogeno es el subproducto más importante de las cloraminas. Este subproducto es el resultado de las reacciones de precursores orgánicos con el ácido hipocloroso en presencia de ion amonio. Así, las concentraciones de cloruro de cianogeno son algo mayores para la cloraminación que para la cloración. (Castilla, 2009).

2.2.4.2 Coagulación-Floculación

De manera general, la coagulación involucra la adición de un reactivo químico coagulante y mezclado rápido, con el propósito de desestabilizar la materia coloidal para favorecer su aglomeración y formar estructuras de mayor tamaño, mediante la floculación con un mezclado lento (MWH, 2005; Matilainen *et al.*, 2010). Puede ocurrir que el floculo formado por la aglomeración de las partículas desestabilizada, no sea lo suficientemente grande como para sedimentar con la rapidez deseada. Para abatir este problema, es recomendable utilizar coadyuvantes de la coagulación o simplemente denominados floculantes (Bolto y Gregory, 2007).

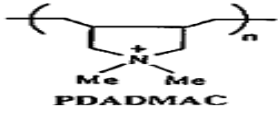
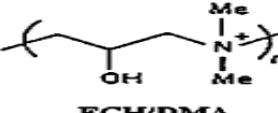
En los últimos años se ha puesto mayor atención en el tratamiento de agua contaminada con algas debido a la eutrofización de las fuentes de agua superficial. Las algas afectan el tratamiento y la calidad del agua potable debido a que:

- Obstruyen las rejillas a la entrada del tratamiento.
- Incrementan la dosis de coagulante.
- Acortan las corridas de filtración por la obstrucción de los filtros.
- Incrementan la demanda de agua para el retrolavado de los filtros.
- Aumentan la demanda de cloro y provocan la formación de subproductos de la desinfección.
- Otorgan olores y sabores indeseables.
- Producen toxinas.
- Aumentan la probabilidad de un nuevo crecimiento microbiano en los sistemas de distribución de agua potable.
- La remoción de algas del agua es difícil, no sólo por su pequeño tamaño y baja densidad, sino también porque tienen la capacidad de flotar.

Las partículas poseen una carga generalmente negativa que las mantiene estables, dificultando su sedimentación natural; siendo necesario la aplicación de reactivos coagulantes y floculantes para favorecer su remoción (MWH, 2005; Parsons y Jefferson, 2006).

Los principales reactivos empleados para coagulación-floculación en proceso de potabilización, se clasifican en dos grupos principales (Tabla 2.5):

TABLA 2.5 Principales reactivos empleados para coagulación-floculación en potabilización (Matilainen *et al.*, 2010).

Coagulantes	Fórmula química
<i>Sales metálicas</i>	
Sulfato de aluminio	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$
Cloruro de aluminio	$AlCl_3$
Cloruro férrico	$FeCl_3$
Sulfato de hierro	$Fe_2(SO_4)_3$
<i>Polímeros</i>	
Policloruro de aluminio (PACl)	$Al_n(OH)_mCl_{(3n-m)} \cdot H_2O$ Donde $0 < m < 3n$.
Policloruro de dialildimetilamonio (pDADMAC)	 PDADMAC
Epiclorohidrina/Dimetilamina (Poliamina)	 ECH/DMA

Las sales metálicas de aluminio y hierro (sulfato de aluminio, cloruro de aluminio, sulfato de hierro, cloruro férrico, entre otras) son de naturaleza catiónico, permitiendo interactuar con las partículas y MON presente en el agua (Dugan *et al.*, 2006; Parson y Jefferson, 2006). Han sido ampliamente utilizadas en la potabilización, sin embargo, presentan desventajas dada las altas dosis que se emplean para remover turbiedad (en comparación con los polímeros), una alta producción de lodos, y un decremento del pH de agua al adicionarlas (Matilainen *et al.*, 2010).

Los polímeros han sido empleados desde las últimas cuatro décadas en la potabilización de agua como coagulantes primarios, floculantes o como espesantes de lodos (MWH, 2005). Con respecto a las sales metálicas, los polímeros orgánicos presentan ventajas tales como la utilización de menores dosis y menor volumen de lodos generados (Bolto y Gregory, 2007; Matilainen *et al.*, 2010). El PACl es un polímero inorgánico y es producido mediante la hidrólisis de $AlCl_3$, por lo que se considera como un reactivo prehidrolizado. El pDADMAC y la poliamina se denominan polímeros orgánicos sintéticos. Entre las características más importantes de los polímeros son la naturaleza iónica (catiónicos, aniónicos y iónicos) y el peso molecular. Convencionalmente, los polímeros son normalmente referidos por ser de bajo, medio o alto peso molecular (MWH, 2005; Bolto y Gregory, 2007).

Mediante la adición de sales metálicas y/o polímeros orgánicos, durante el tratamiento de agua, la etapa de coagulación-floculación puede involucrar los siguientes

mecanismos de desestabilización de partículas (Bolto y Gregory, 2007; Matilainen *et al.*, 2010): adsorción, neutralización de cargas, formación de puentes entre partículas y floculación por barrido. Las partículas pueden ser desestabilizadas por la adsorción de iones positivos (sales metálicas) o por polímeros catiónicos, conllevando a la neutralización de cargas (Dugan *et al.*, 2006; MWH, 2005).

Las sales metálicas al entrar en contacto con el agua, los respectivos iones Al^{3+} o Fe^{3+} son disociados, y comienzan a hidrolizarse formando diversos complejos de hidroxilos, denominados especies mononucleares (ej. $Al(OH)_2^+Al(OH)_2^+$) y polinucleares (ej. $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+}$), estas especies poseen cargas positivas que permiten adsorberse a las partículas negativas del agua, logrando así una neutralización de cargas (Chow *et al.*, 2009; Yan *et al.*, 2009; Matilainen *et al.*, 2010).

En el caso de los polímeros sintéticos, estos contienen segmentos que son afines a la superficie de las partículas; siendo ejemplo, la atracción entre las partículas negativas del agua y los polielectrolitos (polímeros sintéticos con carga) catiónicos (MWH, 2005; Bolto y Gregory, 2007). La adsorción de las especies catiónicas sobre la superficie permiten su desestabilización neutralizando cargas, reduciendo así la carga negativa total de las partículas lo que favorece la floculación por la disminución de las fuerzas de repulsión entre ellas (Sharp *et al.*, 2006; Bolto y Gregory, 2007).

Una vez que las partículas han sido desestabilizadas por los productos de hidrólisis de las sales metálicas o por los polímeros sintéticos; la adición de un reactivo floculante puede contribuir a la formación de puentes entre partículas para favorecer su aglomeración (Yu *et al.*, 2007). Los puentes pueden ser formados por la adsorción de segmentos de las cadenas poliméricas sobre espacios libres de las partículas previamente desestabilizadas, dichos segmentos se unen a otros espacios libres sobre otras partículas desestabilizadas, construyendo los puentes entre partículas y favoreciendo la aglomeración de las partículas (flóculos) (Bolto y Gregory, 2007; Yu *et al.*, 2007). Se ha establecido que la formación de puentes por los polímeros orgánicos puede conducir a la formación de flóculos más resistentes que aquellos formados por sales metálicas (MWH, 2005; Bolto y Gregory, 2007). Los polímeros orgánicos de cadena larga (medio y alto peso molecular) son efectivos para la formación de puentes entre partículas (Bolto y Gregory, 2007).

Es posible mejorar la remoción de partículas mediante la precipitación de hidróxidos amorfos insolubles ($Al(OH)_{3(s)}$), producto de la hidrólisis de sales metálicas, este mecanismo se denomina “floculación por barrido” (MWH, 2005; Parsons y Jefferson, 2006). En la cual, las partículas son cubiertas por el hidróxido precipitado y consecuentemente “barridas” de la suspensión (Dugan *et al.*, 2006; Chow *et al.*, 2009). La floculación por barrido mejora la remoción de partículas para las sales metálicas,

complementando al mecanismo de neutralización de cargas; requiriendo la aplicación de altas dosis (sales metálicas) (Dugan *et al.*, 2006; MWH, 2005).

En la Figura 2.4 se muestra un esquema de los mecanismos presentes en la remoción de partículas presentes en el agua, mediante la aplicación del sistema dual de polímeros orgánicos coagulante-floculante (MWH, 2005; Bolto y Gregory, 2007; Yu *et al.*, 2007); donde inicia con la adición del polímero coagulante al agua (a), los cuales entran en contacto mediante mezclado (b), comenzando a interaccionar los segmentos de las cadenas poliméricas con la superficie de las partículas (adsorción) (c), una vez que las partículas son neutralizadas o reducida su carga negativa, la adición de un polímero floculante (d) contribuye a la formación de los puentes entre las partículas desestabilizadas, favoreciendo su aglomeración (e).

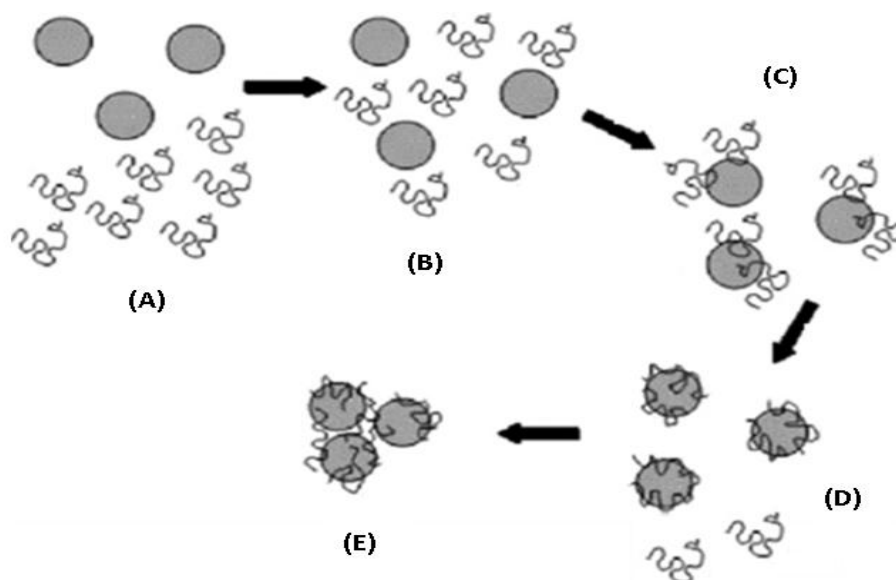


FIGURA 2.4 Mecanismo de remoción de partículas mediante la aplicación de coagulante y floculante.

En el caso de algas, el mecanismo dominante de coagulación-floculación es la adsorción y neutralización de cargas, empleando polímeros sintéticos catiónicos (Bolto y Gregory, 2007). Con el uso de las sales metálicas, los mecanismos contemplan la neutralización de cargas, la adsorción sobre los hidróxidos formados, y el cubrimiento de las algas por precipitados insolubles (floculación por barrido) (Chow *et al.*, 2009; Matilainen *et al.*, 2010).

El proceso de coagulación-floculación es clave para la separación de las algas ya que en condiciones óptimas permite remover diversas cianobacterias y plancton sin la liberación de metabolitos tóxicos.

El proceso de coagulación-floculación sirve para:

- Destrucción de algas y plancton en general.
- Eliminación de turbiedad orgánica e inorgánica que no pueden sedimentar rápidamente.
- Eliminación de color.
- Eliminación de bacterias, virus y organismos patógenos susceptibles de ser separados por coagulación.
- Eliminación de sustancias productoras de sabor y olor, en algunos casos de precipitados químicos suspendidos.

Factores que influyen en el proceso de coagulación

Los principales factores que afectan la coagulación-floculación. Durante el tratamiento del agua son (MWH, 2005; Matilainen *et al.*, 2010); dosis y tipo de coagulante y floculante; condiciones de mezclado y características fisicoquímicas del agua.

- **Dosis y tipo de coagulante y floculante:** Los coagulantes principalmente utilizados son las sales de aluminio y de hierro. Sin embargo, poco a poco se han ido introduciendo en el mercado otros productos, como los policloruros de Fe y Al y los polímeros orgánicos.
- **Condiciones de mezclado:** las condiciones de mezclado también representan un factor importante en el desempeño de la coagulación-floculación, dado que afectan la distribución de los reactivos, la frecuencia de colisión, la agregación y formación de flóculos (Yan *et al.*, 2009). La coagulación con sales metálicas requiere de un mezclado rápido, dado que las reacciones de hidrólisis ocurren en segundos; mientras que los polímeros orgánicos son menos sensible a una agitación rápida, dada la estabilidad de las especies catiónicas (MWH, 2005; Parsons y Jefferson, 2010). La floculación es estimulada por un mezclado lento que aglomera poco a poco a las partículas desestabilizadas en flóculos. Un mezclado demasiado intenso los puede romper., Uno muy lento no permite una colisión adecuada de partículas (MWH, 2005; Yan *et al.*, 2009). Varios tipos de dispositivos han sido empleados para el mezclado de los coagulantes y floculantes. Estos incluyen saltos hidráulicos, canales con baffles, impulsores o propelas, mezcladores estáticos, etc. Los mezcladores mecánicos con propelas son ampliamente usados en el tratamiento convencional de agua (MWH, 2005).

- **Características fisicoquímicas del agua**

Un agua que contiene poca turbiedad coloidal es, frecuentemente, de floculación más difícil, ya que las partículas sólidas en suspensión actúan como núcleos para la formación inicial de flóculos.

Cuando el agua a tratar contienen sales en disolución. Estas sales afectan al proceso de coagulación modificando los siguientes factores:

- Rango de pH óptimo,
- Tiempo requerido para floculación,
- Dosis de coagulante requerido, y
- Dosis residual del coagulante dentro del efluente.

Cuando un agua, no contiene iones SO_4^{2-} la zona óptima de pH resulta ser muy estrecha, y esta zona se amplía con el contenido de iones sulfato. El efecto de los iones PO_4^{3-} es totalmente distinto, en este caso el intervalo de pH óptimo se acorta al aumentar el contenido de dichos iones, generalmente se desplaza la zona de coagulación óptima a valores de pH menores. En el caso de los iones divalentes comprimen las capas difusivas que rodean las partículas coloidales negativas y por tanto reducen las fuerzas repulsivas entre ellas. El sulfato de aluminio, es el coagulante más comúnmente usado desde hace más de 30 años en el proceso de clarificación por su relativo bajo costo y su manejo relativamente sencillo.

Para el caso de la remoción de algas con sulfato de aluminio, el porcentaje de remoción de algas utilizando sulfato de aluminio según reportes publicados se presenta en la Tabla 2.6. Se observa de manera general que el sulfato de aluminio presenta remociones de algas que oscila en el intervalo de 70-80% a dosis menores a 10 mg de Al/L o 60mg/L de sulfato de aluminio y una remoción del 99% aplicando sulfato de aluminio/polímero catiónico a dosis menores de 3 mg de Al/L y 0.25mg/L de sulfato de aluminio.

TABLA 2.6 Remoción de algas mediante la dosificación de sulfato de aluminio.

Coagulante	Nivel	Dosis (mg Al/L)	Remoción	Tipo de alga	Concentración de algas	Referencia
Sulfato de aluminio	Piloto	70	84%	<i>Chodatella sp.</i>	4 x 10 ⁷ células/mL	Che <i>et al.</i> , 2009
Sulfato de aluminio	Piloto	5.8		<i>Microcystis aeruginosa</i>	107 células/mL	Chow <i>et al.</i> , 1999
Sulfato de aluminio	Piloto	1.5		<i>Microcystis sp.</i>	> 10 colonias/mL	Van Hullebush <i>et al.</i> , 2002
Sulfato de aluminio	---	10.3	75%	<i>Microcystis aeruginosa</i>	5 x 10 ⁵ – 1.5 x 10 ⁶ células/mL	Drikas <i>et al.</i> , 2001
Sulfato de aluminio	Laboratorio	5.4	79%	<i>Asterionella formosa</i>	2 x 10 ⁵ células/mL	Jiang <i>et al.</i> , 1993
Sulfato de aluminio	Laboratorio	8.0	80%	<i>Chlorophyta</i> <i>Chlorella sp.</i>	6.8 x 10 ⁵ células/mL	Liu <i>et al.</i> , 1999
Sulfato de aluminio	Laboratorio	9.5	70- 80%	<i>Pediastrum</i> <i>Clathratum</i> y <i>Melosira</i>	1 – 3 x 10 ⁴ células/mL	Mouchet <i>et al.</i> , 1998
Sulfato de aluminio (polímero catiónico)	Laboratorio	2.16	99%	<i>Synedra acus</i>	1480 células/mL	Jun <i>et al.</i> , 2001
Sulfato de aluminio	Laboratorio	1.62	88%	<i>Synedra acus/</i> <i>Melosira</i>	1500 células/mL	Jun <i>et al.</i> , 2001

La Tabla 2.7 muestra algunas Plantas Potabilizadoras en México que utilizan sulfato de aluminio como coagulante, la dosis empleada se sitúa entre los 15 y 150 mg/L.

TABLA 2.7 Uso del sulfato de aluminio como coagulante en Plantas Potabilizadoras.

Coagulante	Planta Potabilizadora	Dosis (mg/L)	Capacidad (L/s)	Tipo de algas	Referencia
Sulfato de aluminio	Xalapa, Veracruz.	20 – 40	1050	Chlorophyta Phormidium sp.	(Comisión municipal de Agua Potable y Saneamiento de Xalapa)
Sulfato de aluminio	“El Cayaco”, Acapulco, Guerrero.	15 – 150	2000	Chlorophyta Dinoflagellata Cyanobacteria	(Comisión de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Acapulco)
Sulfato de aluminio	Ixtapan de la Sal, Estado de México.	25	1800	Chlorophyta Cyanobacteria	(Pavón Silva, y otros, 2005)

Los polímeros en las últimas décadas han incursionado al mercado con productos tales como el cloruro de polialuminio (PACl), pDADMAC, estos son sustancias poliméricas que se han desarrollado con el fin de mejorar la efectividad de los coagulantes para operar con diversos cambios y fluctuaciones en las características físicas y químicas del agua natural (Castilla *et al.*, 2009).

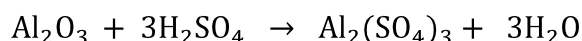
A estos productos se les atribuye una elevada eficiencia en aguas de alta turbidez, así como también un comportamiento satisfactorio en aguas contaminadas. El empleo de los productos poliméricos coagulantes ha empezado a incrementarse cada vez más. Estos productos tienen unidades moleculares repetidas que químicamente se unen para formar moléculas de tamaño coloidal, con uno o más grupos ionizables, para proveer cargas de características específicas, los que generan cargas positivas son catiónicos, los de que generan carga negativa son aniónicos y los que no ofrecen carga son no iónicos (IMTA, 1992).

Diversos autores coinciden en que la densidad de carga de diversas algas, cianobacterias y plancton es negativa y que los coagulantes orgánicos catiónicos y las sales como el sulfato de aluminio y el cloruro de hierro, son eficientes en la desestabilización de carga en la superficie, no así los coagulantes aniónicos (Henderson, 2008).

Sulfato de aluminio

El sulfato de aluminio se comercializa con dos grados distintos de calidad conocidos como estándar y libre de hierro, siendo sus principales diferencias los contenidos de hierro, ácido sulfúrico y material activo (aluminio).

El sulfato de aluminio se obtiene al reaccionar un mineral aluminico (caolín, bauxita, hidrato de aluminio) con ácido sulfúrico a temperaturas elevadas (105-125°C); la reacción que se lleva a cabo se representa en la Ecuación 2.3:



ECUACIÓN 2.3 Formación de sulfato de aluminio.

En la Tabla 2.8 se muestran las especificaciones del sulfato de aluminio sólido y en la Tabla 2.9 muestran las especificaciones del sulfato de aluminio líquido.

Propiedades y especificaciones del sulfato de aluminio.

TABLA 2.8 Propiedades particulares del sulfato de aluminio sólido.

Propiedades sulfato de aluminio solido		
Propiedades	Estándar	Libre de Fe
Al_2O_3 %	16.8 mínimo	16.8 mínimo
Apariencia	Polvo crema	Polvo blanco
Fe_2O_3 %	0.75 máximo	0.01 máximo
Insolubles %	1.0 máximo	1.0 máximo

TABLA 2.9 Propiedades particulares del sulfato de aluminio líquido.

Propiedades del sulfato de aluminio liquido		
Propiedades	Estándar	Libre de Fe
Al_2O_3 %	7.4 – 7.7	7.4 – 7.7
Apariencia	Líquido ámbar	Líquido blanco
Fe_2O_3 %	1.0 máximo	0.01 máximo
Basicidad %	0.34 mínimo	0.34 mínimo

En la Tabla 2.8 y Tabla 2.9 se observa que la diferencia entre el sulfato de aluminio libre de hierro y el sulfato de aluminio estándar, corresponde básicamente en la apariencia, y en el contenido máximo de hierro. En el caso del tamaño de partícula se maneja el mismo en el caso del sulfato de aluminio sólido (libre de hierro y estándar), al igual que en la pureza, siendo la diferencia el estado de agregación. Finalmente en el caso de material insoluble y contenido de hierro existe la misma concentración para sólido que para el líquido, lo cual es resultado de la obtención del mismo, libre de hierro y estándar.

La Tabla 2.10 muestra las propiedades del sulfato de aluminio designado por la norma mexicana NMX-AA-122-SCFI-2006 y en la Tabla 2.11 se muestran las especificaciones del sulfato de aluminio de acuerdo a la norma NMX-AA-122-SCFI-2006.

TABLA 2.10 Clasificación y designación del sulfato de aluminio (NMX-AA-122-SCFI-2006).

Nombre químico	Sulfato de aluminio
Sinónimo	Alumbre
Formula empírica	$Al_2(SO_4)_3$
Formula química	$Al_2(SO_4)_3 \cdot n H_2O$
Masa molecular	342.14 g/mol
Número de registro del CAS1	10043-01-3
Número de registro del EINECS2	233-135-0
Propiedades físicas	Densidad: depende de la concentración del material activo. Solubilidad en agua: no utilizar disoluciones con $(Al_2O_3) > 8\%$ (equivalente a 4.2 % Al o 42.4 Al/Kg disolución) en masa a temperatura cercana a 0°C para evitar sedimentación. Punto de cristalización: -7°C para una disolución al 8% Al_2O_3 .
Propiedades químicas	El sulfato de aluminio presenta sales hidratadas y disoluciones acidas, cuando se encuentra muy diluido se hidroliza y forma un precipitado de hidróxido de aluminio. Los compuestos de aluminio son anfóteros (pueden actuar indistintamente como ácidos o álcalis según el medio en que se encuentren) por lo que deben ser utilizados en un intervalo determinado de pH.

¹CAS: Siglas en inglés del Chemical Abstracts Service, Organismo que elabora bases de datos de compuestos químicos.

²EINECS: Siglas en inglés de European Inventory of Existing Commercial Chemical Substances, inventario europeo de sustancias químicas comerciales.

TABLA 2.11 Especificaciones del sulfato de aluminio (NMX-AA-122-SCFI-2006).

Sulfato de aluminio				
Especificaciones	Sulfato de aluminio libre de hierro		Sulfato de aluminio estándar	
	SÓLIDO	LÍQUIDO	SÓLIDO	LÍQUIDO
Apariencia	Polvo blanco	Líquido blanco	Polvo crema	Líquido ámbar
Tamaño de partícula	100% producto debe pasar por malla de 4.75 mm y $\geq 90\%$ del producto por malla 1.70 mm	--	100% producto debe pasar por malla de 4.75 mm y $\geq 90\%$ del producto por malla 1.70 mm	--
Pureza ¹	CMAI = 8.9% CMalúmina = 16.9%	CMAI = 3.1% CMalúmina = 5.9%	CMAI = 8.9% CMalúmina = 16.9%	CMAI = 3.1% CMalúmina = 5.9%
Impurezas	Material insoluble en agua: máx 0.5% en masa	Material insoluble en agua: máx 0.2% en masa	Material insoluble en agua: máx 0.5% en masa	Material insoluble en agua: máx 0.2% en masa
	Contenido de trióxido de aluminio libre < 0.5%			
	Acidez libre como H_2SO_4 < 1.5%			
	Fe total: límite máximo (g Fe/kg Al) = 0.8	Fe total: límite máximo (g Fe/kg Al) = 0.8	Fe total: límite máximo (g Fe/kg Al) = 216	Fe total: límite máximo (g Fe/kg Al) = 216
Sustancias tóxicas (mg/kg Al). Límites máximos permisibles: As (101), Ba (4490), Cd (34), Cu (8990), Cr total (371), Hg (11), Pb (79), Se (79)				
Uso máximo	150 mg/L			

¹El sulfato de aluminio es el resultado de diversos procesos de fabricación, su pureza puede variar y debe cumplir con el contenido de material activo especificado (aluminio o alúmina); CM_{Al} : contenido mínimo de aluminio; $CM_{alúmina}$: contenido mínimo de alúmina.

El coagulante sulfato de aluminio, ha sido el más empleado en la clarificación del agua. Este producto actúan como coagulante y floculante a la vez. Añadido al agua forma una especie cargada positivamente en el intervalo de pH típico para la clarificación que va entre 6 y 7.

El sulfato de aluminio es muy sensible al pH y a la alcalinidad, si el pH no está dentro del intervalo adecuado, la clarificación es pobre. Cuanto menor sea la dosis de coagulante, tanto mayor será la sensibilidad del flóculo a cambios en el pH. La Figura 2.5 muestra las limitaciones del coagulante con respecto al pH.

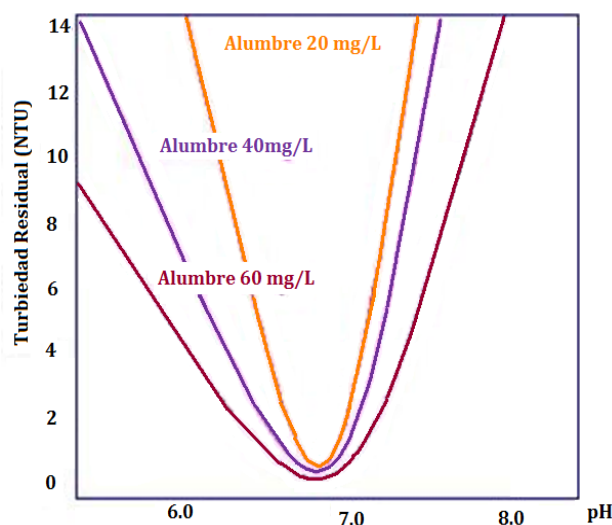


FIGURA 2.5 Efecto de la dosificación del coagulante sobre las limitaciones en el intervalo de pH.

Una observación destacable radica en ver que el valor óptimo de pH permanece casi constante, pero el intervalo de pH es menos limitante a medida que aumenta la dosificación de coagulante.

Normas para el uso del sulfato de aluminio

El uso del sulfato de aluminio para tratamiento de agua está aprobado en los Estados Unidos Norteamérica por la American Water Works Association (AWWA). En adición cuenta con certificaciones nacionales e internacionales tales como:

- NSF (National Sanitation Foundation) de Estados Unidos de Norteamérica para toxicología en agua potable,
- CERTIMEX (Certificación Mexicana, S.C) antes IMTA, y
- ISO 9002 Norma internacional para sistema de Calidad.

Como medidas de seguridad se debe cumplir con aspectos como hoja de datos de seguridad, requerimientos para su distribución, almacenaje, manejo y utilización, emergencias, inclusión de datos toxicológicos. Lo anterior de acuerdo a lo dispuesto por las normas oficiales mexicanas (NOM-004-STPS-1999), (NOM-010-STPS-1999), (NOM-017-STPS-2001) y (NOM-018-STPS-2000).

Para el marcado, etiquetado y envase se debe cumplir con lo establecido en la NOM-03-SCFI, NOM-050-SCFI Y NOM-003-SCT.

En el Anexo I se muestra una lista de proveedores de sulfato de aluminio (estándar y libre de hierro) que existen en México.

Coagulantes orgánicos

Los coagulantes orgánicos se basan en polímeros que tienen sitios ionizados a lo largo de su longitud, por lo que es también denominado poli-electrolito o coagulantes poliméricos. Para funcionar como tal, un polímero debe tener incorporado grupos funcionales que pueden disociarse para dejar sitios cargados (Hendricks, 2006).

Algunas características de estos polímeros incluye el tipo, peso molecular, densidad de carga y estructura. La Tabla 2.12 presenta de manera específica estas características, intervalo empleado de dosis y aplicaciones principales.

TABLA 2.12 Características de polímeros orgánicos (Hendricks, 2006).

Peso molecular (g/mol)	Densidad de carga (% mol)	Intervalo de dosis (mg/L)	Usos
Bajo (104-105)	~10	0.5-10	Coagulante/floculante
Medio (105-106)	~25	0.5-10	Coagulante/floculante
Alto (106-5x106)	50-100	0.1-1	Floculante/espesante de lodos
Muy alto (>5x106)	-----	0.1-1	Floculante/espesante de lodos

Los coagulantes orgánicos (polímeros orgánicos ó polielectrolitos), son grandes moléculas orgánicas sintéticas, formadas por la unión de grupos químicos repetitivos de estructura definida, que les confiere unas determinadas propiedades.

Las unidades químicas monoméricas suelen tener naturaleza iónica, lo que determina que el polímero tenga carga eléctrica.

Si contiene radicales básicos, como grupos amino ó de amonio cuaternario, al disociarse en el agua adquieren carga positiva. Estos polímeros se denominan polibásicos ó polímeros activos catiónicos.

Si contiene radicales ácidos, como los grupos carboxilo o sulfónico, al disociarse adquieren carga negativa y se denominan poliácidos ó polímeros activos aniónicos.

Cuando el polímero contiene ambos tipos de grupos reciben el nombre de *polianfolitos*, y si contiene grupos no ionizables polímeros activos no iónicos. En cualquier caso, la densidad de carga es función del pH

En la Figura 2.6 se muestra la estructura base de tipo químico de los coagulantes catiónicos, en la Figura 2.7 la de los coagulantes aniónicos y la Figura 2.8 muestra la estructura de los no iónicos.



FIGURA 2.6 Estructura química de un polímero catiónico.

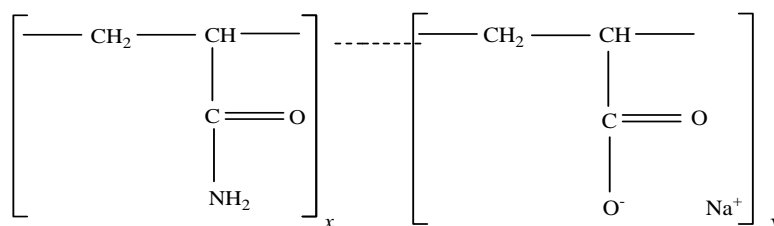


FIGURA 2.7 Estructura base de un polímero aniónico.

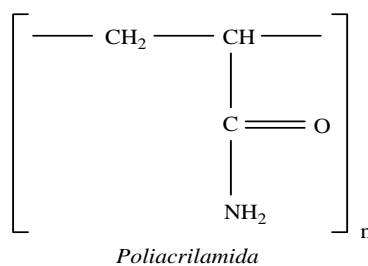


FIGURA 2.8 Estructura base de un polímero no iónico.

Los coagulantes orgánicos catiónicos, se pueden encontrar de todos los niveles de peso molecular y densidad de carga. Su principal uso en el tratamiento de agua es como coagulante primario o ayudante de coagulación; por mencionar algunos ejemplos se tiene; policloruro de dialildimetilamonio o cloruro de polidialildimetilamonio (pDADMAC), aminas cuaternarias y poliaminas.

Los coagulantes orgánicos aniónicos son fabricados con una variedad de densidades de carga y generalmente de alto peso molecular, son usados principalmente como

floculantes en el tratamiento de agua; acrilamida/acrilato, poliacrilamida y sulfonato de poliestireno son algunos ejemplos de polímeros aniónicos.

Los polímeros no iónicos, en general, son poliacrilamidas y de peso molecular alto; son usados comúnmente como floculantes en el tratamiento de agua (Hendricks, 2006).

Coagulante catiónico

Entre los polímeros usados como coagulantes primarios en el tratamiento de agua, el pDADMAC es el más común; estos son preparados a partir del monómero del cloruro de dialildimetilamonio por iniciación de la polimerización por radicales libres en medio acuoso (NMX-AA-136-SCFI-2007). Estos polímeros son de estructura lineal con la repetición de anillos de pirrolidina y considerados resistentes al cloro según la NMX-AA-136-SCFI-2007, aunque hay reportes de formación de compuestos tóxicos en presencia de oxidantes (ozono, nitrato de peroxiacetilo y peróxido de hidrogeno) (Child, et al., 1991); son muy estables a temperatura normal, comercialmente se presenta en forma de polvo blanco y en solución acuosa al 40-65%. La Figura 2.9 muestra la estructura química del pDADMAC.

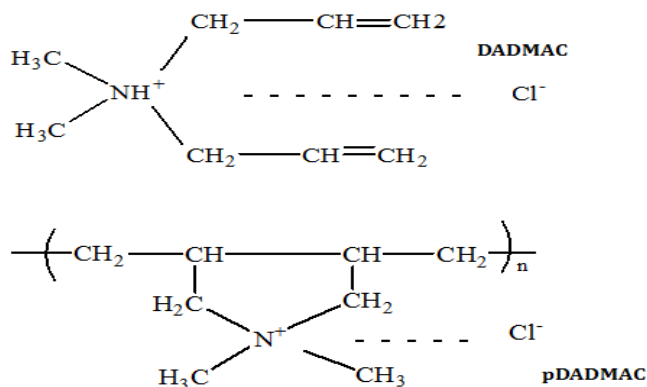


FIGURA 2.9 Estructura química del poli-cloruro de dialildimetilamonio pDADMAC

La Tabla 2.13 muestra las especificaciones que debe cumplir el pDADMAC según la NMX-AA-136-SCFI-2007.

TABLA 2.13 Especificaciones para pDADMAC (NMX-AA-136-SCFI-2007).

Propiedades	Características
Apariencia	Líquido incoloro a ámbar
Contenido de sólidos	18-42%
pH	4-7
Pureza	[ingrediente activo] = 18-42%
Viscosidad	300-12,000 cP
DADMAC residual	>5,000 mg/kg de producto activo

A continuación se describen las especificaciones, manejo, identificación de riesgos y toxicidad de los polímeros catiónicos (pDADMAC). En Tabla 2.14 se enlistan las especificaciones que debe de cumplir el pDADMAC para el tratamiento de agua según la normatividad Europea (European Standart EN 1408:1998, 1998). Las especificaciones del pDADMAC por la norma NMX-136-SCFI-2007 se presentan en la Tabla 2.15.

TABLA 2.14 Especificaciones para pDADMAC (European Standart EN 1408:1998)

Especificaciones para pDADMAC	
Apariencia	Líquido claro color ámbar
Densidad	Depende de la concentración, un valor típico es de 1.09 g/ml para una concentración de 40% en fracción masa de pDADMAC a 20°C
Solubilidad	Miscible en agua a cualquier concentración
Presión de vapor	3.2kPa para un pDADMAC al 40% en fracción masa
pH	4.7
Viscosidad	< 5000MG/kg del monómero

TABLA 2.15 Especificaciones del pDADMAC (NMX-136-SCFI-2007).

Nombre químico	pDADMAC
Sustancia activa	Clorhidrato de Al-pDADMAC
Peso molecular (g/mol)	Bajo (104-105)
Carga	Catiónica
Apariencia	incoloro
Pureza (%)	
Uso máximo (mg/L)	167
Número de registro del CAS	26062-79-3 (como pDADMAC)
Número de registro del EINECS	230-993-8 (para el monómero; para el polímero no existe)

En el Anexo I se muestra una lista de los proveedores de coagulantes y floculantes poliméricos.

Casos de estudio de remoción de algas por coagulación-floculación

En particular, para la remoción de algas, el tratamiento de coagulación-floculación-sedimentación es el proceso más utilizado (Jun Ma *et al.*, 2001). Diversos estudios han sido publicados respecto al desempeño de diferentes sales metálicas y polímeros en la coagulación-floculación de agua cruda para potabilización; así como también, estudios sobre la remoción de algas mediante esta tecnología.

Haciendo un análisis de diversos reportes de coagulantes utilizados en el proceso de potabilización Chow *et al.*, (2009) emplearon sulfato de aluminio para remover materia orgánica como Carbono Orgánico Disuelto (COD) de un agua cruda con valores iniciales de turbiedad de 1.7 UTN, 10.8 mg/L de COD y 64 unidades de color. Para lo cual aplicaron una dosis de 80 mg/L de $Al_2(SO_4)_3$, reduciendo el contenido de turbiedad

a valores <0.5 UTN, color a <10 unidades) y COD hasta 46% del valor inicial. La aplicación de esta dosis se efectuó sin alteración del pH natural del agua (7.6). Bajo las mismas condiciones de dosis de sulfato de aluminio y disminuyendo el valor de pH a 6, observaron un incremento mínimo de 4% en la remoción de COD, señalando que se puede incrementar la remoción de materia orgánica por coagulación-floculación al disminuir el pH del agua. Sin embargo, este incremento en la remoción de COD es mínimo por lo que recomiendan trabajar a valores de pH natural (cercano a la neutralidad).

Huang y Yeh (2009) evaluaron la coagulación-floculación de algas aplicando sulfato de aluminio y tres polímeros orgánicos catiónicos: Poli(acrilamida), pDADMAC (policloruro de dialildimetilamonio), y Poliamina. Con una dosis de 40 mg/L de sulfato de aluminio, lograron remover un 50% de algas presentes en el agua cruda. De los tres polímeros orgánicos, la Poliamina, con dosis de 1.5 mg/L, manifestó el mejor desempeño de remoción de algas (90 % de las algas presentes), en comparación con los otros dos polímeros. Por otro lado, estos mismos autores lograron un 100% de remoción de algas mediante la aplicación de sulfato de aluminio (20 mg/L), como coagulante primario, y Poliamina (0.25 mg/L), como polímero floculante. Concluyeron que el polímero orgánico catiónico Poliamina es adecuado para emplearse como coagulante primario y como floculante, en la remoción de algas.

Yu *et al.*, (2007) evaluaron el desempeño de tres coagulantes inorgánicos FeCl_3 , AlCl_3 y PACl. De manera general, el policloruro de aluminio (PACl) mostró mejor desempeño en remoción de turbiedad y materia orgánica (UV_{254}): El PACl también permitió mantener el pH cerca del valor inicial (7.9). Asimismo, los autores evaluaron el desempeño de dos polímeros orgánicos, pDADMAC y Poli(acrilamida). La mejor remoción de materia orgánica (UV_{254}), la manifestó el polímero pDADMAC (de bajo peso molecular), en cuanto a la reducción de la turbiedad, ambos polímeros evaluados presentaron valores finales similares. Comparando el PACl y pDADMAC, este último mostró mejor remoción de materia orgánica.

Lee *et al.*, (2001) examinaron la eficiencia del polímero orgánico Poliamina, como floculante, en la remoción de turbiedad y materia orgánica (UNT, COT y UV_{254}). Se empleó policloruro de aluminio (PACl) (dosis de 20 mg/L), como coagulante primario, para tratar agua cruda con una turbiedad de 289 UTN, COT 5.33 mg/L y UV_{254} de 0.765 cm^{-1} . Con la dosis que aplicaron produjeron un efluente con un valor de turbiedad de 84.2 UTN y 23% y 47% de remoción de COT y UV_{254} , respectivamente. En conjunto con la dosis determinada de PACl (20 mg/L), le adicionaron polímero floculante Poliamina, dosis de 2 mg/L. Con estas mejores dosis de reactivos, lograron obtener un efluente con una turbiedad de 1.5 UTN, remover 55% de COT y 94% de UV_{254} .

Concluyendo que el polímero orgánico Poliamina es adecuado para emplearse como floculante en tratamiento de agua.

Ramírez *et al.*, 2011 analizo el costo de tratamiento de agua superficial, evaluaron los costos de los tratamientos para una planta potabilizadora convencional; se estimaron costos para 400 y 800 L/s de las unidades de obra de toma, clarifloculador, filtración, cloración, bombeo al acueducto, secado de lodos y acarreo y disposición de lodos. Definiendo los costos anuales operativos (costo de operación, mantenimiento, material, químicos y energía). Los costos para producir para 400 y 800 L/s (12, 614,400.00 y 25, 228,800.00 m³/año) de agua potable de acuerdo a la NOM-127son de 1.34 y 1.18 \$/m³, mientras que los costos de los agentes químicos son de 2, 540,000 y 5, 080,000. \$/año y los costos anuales son de 8,089.00 y 14,562.00 \$/año respectivamente para cada gasto.

Con base en los estudios mencionados, el uso de la tecnología de coagulación-floculación es efectivo para aplicarse en la remoción algas durante el tratamiento de agua para consumo humano. Por lo que para obtener porcentajes de remoción de algas de 70-90%, se requiere que las algas sean removidas, preferentemente en las etapas iniciales del tren de tratamiento (Henderson *et al*, 2008).

Floculación

Existen además ciertos productos químicos llamados floculantes que ayudan en el proceso de floculación. Un floculante actúa reuniendo las partículas individuales en aglomerados, aumentando la calidad del flóculo (flóculo más pesado y voluminoso).

Hay diversos factores que influyen en la floculación:

1. Coagulación previa lo más perfecta posible.
2. Agitación lenta y homogénea.

La floculación es estimulada por una agitación lenta de la mezcla puesto que así se favorece la unión entre los flóculos. Un mezclado demasiado intenso no interesa porque rompería los flóculos ya formados.

3. Temperatura del agua.

La influencia principal de la temperatura en la floculación es su efecto sobre el tiempo requerido para una buena formación de flóculos.

Generalmente, temperaturas bajas dificultan la clarificación del agua, por lo que se requieren periodos de floculación más largos o mayores dosis de floculante.

4. Características del agua.

Un agua que contiene poca turbiedad coloidal es, frecuentemente, de floculación más difícil, ya que las partículas sólidas en suspensión actúan como núcleos para la formación inicial de flóculos.

5. Clasificación de tipos de floculantes según su naturaleza:

- *Minerales:* por ejemplo la sílice activada. Se le ha considerado como el mejor floculante capaz de asociarse a las sales de aluminio. Se utiliza sobre todo en el tratamiento de agua potable.
- *Orgánicos:* son macromoléculas de cadena larga y alto peso molecular, de origen natural o sintético.

Los floculantes orgánicos de origen natural se obtienen a partir de productos naturales como extractos de algas, almidones (extractos de granos vegetales) y derivados de la celulosa. Su eficacia es relativamente pequeña.

Los de origen sintético, son macromoléculas de cadena larga, solubles en agua, conseguidas por asociación de monómeros simples sintéticos, alguno de los cuales poseen cargas eléctricas o grupos ionizables por lo que se le denominan polielectrolitos.

La floculación es el proceso siguiente a la coagulación, que consiste en la agitación de la masa coagulada que sirve para permitir el crecimiento y aglomeración de los flóculos recién formados con la finalidad de aumentar el tamaño y pesos necesarios para sedimentar con facilidad.

Los flóculos son inicialmente pequeños, pero se unen unos con otros para formar otros más grandes que son capaces de sedimentar.

La floculación está favorecida por un mezclado lento, ya que si la velocidad es muy alta, los flóculos pueden llegar a romperse.

La floculación es un proceso de prolongada agitación para formar una estructura porosa muy fibrosa denominada floculo, con tamaño y peso específico suficiente para sedimentar. La agitación puede ser inducida por métodos hidráulicos o mecánicos.

2.2.4.3 Clarificación (sedimentación y flotación por aire disuelto)

La sedimentación y la flotación son procesos típicos de clarificación, utilizados antes de una filtración en medio granular dentro de los trenes de tratamiento de aguas, cuando se tienen altas concentraciones de algas, y después de la coagulación-floculación. La flotación es un proceso de clarificación primaria particularmente efectivo para tratar

aguas con baja turbiedad, con altos valores de color y con gran contenido de algas. La sedimentación convencional puede presentar un intervalo de remoción de 70-80 % de células (Henderson *et al.*, 2008).

La flotación por aire disuelto (FAD) se ha utilizado durante varias décadas para el tratamiento de agua potable como un método alternativo para la clarificación por sedimentación, este proceso La FAD es particularmente eficaz en el tratamiento de suministros de depósito de agua, los suministros que contienen algas, color natural o la materia orgánica natural (Edzwald, 2010).

La selección de la FAD sobre la sedimentación convencional se basa en ventajas específicas como: los costos de construcción generales se ven reducidos de un 30 a 50 %, debido a que la construcción e instalación de los clarificadores es más económica que la de los grandes sedimentadores convencionales. Asimismo, la tecnología FAD requiere de menos área, permitiendo el ahorro de espacio y costos; también permite el ahorro de productos químicos de coagulación-floculación, ya que para un buen funcionamiento de la FAD se requiere de la formación de flóculos ligeros y pequeños. Estas consideraciones hacen a la FAD, una buena tecnología para sustituir a la sedimentación convencional, con ventajas tanto técnicas como económicas (Gerald *et al.*, 2008).

2.2.4.4 Filtración

La filtración es una operación en la que se hace pasar el agua a través de un medio poroso, con el objetivo de retener la mayor cantidad posible de materia en suspensión (Rodríguez *et al.*, 2006). Puede ser aplicada como etapa de pulimento tanto después de la sedimentación o la flotación por aire disuelto (FAD), directamente como proceso de clarificación.

La filtración directa parece ser el proceso de clarificación más susceptible a presentar problemas ocasionados por la presencia de algas. Una dificultad que en ocasiones presenta la filtración es la obstrucción de los filtros debido a la presencia de algas. La obstrucción provoca que el mecanismo de remoción de sólidos cambie de filtración profunda a filtración superficial, reduciendo significativamente las corridas de filtración (Henderson *et al.*, 2008).

Se han alcanzado remociones de algas de hasta 95% de eficiencia usando la filtración directa, empleando un filtro rápido de carbón activado, arena y grava; con una tasa de filtración de 10 m/h. Se han alcanzado buenos valores de remoción, de aproximadamente 95% usando un filtro de antracita y arena, a una tasa de filtración de 5 m/h (Henderson *et al.*, 2008).

3 METODOLOGÍA

EXPERIMENTAL

Capítulo 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El desarrollo del presente estudio se describe a continuación.

- 1) Pre-oxidación seguida del proceso de Coagulación-Floculación para la posterior Clarificación (por Sedimentación):
 - a. Etapa de Pre-oxidación: uso de hipoclorito de sodio.
 - b. Etapa de Coagulación-Floculación: uso de pDADMAC/ PA1 y SA STD/ PA2.

Las pruebas de pre-oxidación-coagulación-floculación-sedimentación (POx-C-F-S), consistió en realizar pruebas de jarras de un agua de presa, la realización de las pruebas de jarras se basó en un diseño de experimentos del tipo central compuesto (DCC), realizando 17 experimentos para cada combinación de pre-oxidante-coagulante-floculante (POx-CF), dando un total de 68 experimentos para las dos combinaciones a evaluar con sus respectivos duplicados incluidos.

Los factores experimentales que se evaluaron fueron; dosis de pre-oxidante, dosis de coagulante y contenido inicial de clorofila-a en el agua. Las dosis de pre-oxidante y coagulante fueron seleccionados por ser los agentes que permiten la desestabilización y aglomeración de las algas (Lee *et al.*, 2001; Bolto y Gregory, 2007); y la clorofila-a inicial se seleccionó por ser el parámetro principal objetivo a remover por la pre-oxidación-coagulación-floculación (MWH, 2005), las variables de respuesta evaluadas son; Color residual (rC), Turbiedad residual (rT), Clorofila-a residual (rClor-a), pH final (pH-f), pre-oxidante residual (rPOx) , producción de lodos (P.L), hierro residual (rFe) y aluminio residual (rAl).

A continuación se describen; los materiales y reactivos; el diseño de experimentos; los sistemas y protocolos experimentales; y las técnicas analíticas que se emplearon para desarrollar la parte experimental.

3.1 MATERIALES Y REACTIVOS

Agua a tratar

Las pruebas experimentales de pre-oxidación-coagulación-floculación-sedimentación se efectuaron con el agua colectada en la presa “Valle de Bravo”. El agua de esta presa se seleccionó debido a que presenta un gran problema de contaminación por algas en época de estiaje, con valores de clorofila-a de 10 a 80 µg/L.

El punto de muestreo de agua en la presa de Valle de Bravo se localiza en las coordenadas 19°12.427' N y 100°10.803' O (obtenidas con el GPS marca Garmin, Modelo: E Trex Vista H) con una elevación de 2260 m sobre el nivel del mar. (Fotografía 3.1).



FOTOGRAFÍA 3.1 Succión de bomba de agua para concentrar algas.

A continuación se describe el método de muestreo.

Para alcanzar esos niveles de concentración de clorofila-a (10 a 80µg/L) se muestreó agua cruda y agua concentrada de algas, para posteriormente hacer mezclas de ambas con el fin de obtener los niveles de clorofila-a que se seleccionaron para realizar las pruebas. El concentrado de algas se obtuvo por bombeo filtrando el agua de presa con un filtro de tela con la finalidad de retener las algas e ir concentrándolas, obteniendo un concentrado de éstas como se muestra en la Fotografía 3.2.



FOTOGRAFÍA 3.2 Concentrado de algas por medio de filtración.

El agua cruda y el concentrado de algas se transportaron en bidones de plástico con capacidad de 20L al laboratorio del Instituto de Ingeniería de la UNAM protegidos de la luz con papel aluminio para impedir el crecimiento de las algas, y se conservaron con hielo-sal a una temperatura de 4°C hasta los laboratorios del Instituto de Ingeniería, allí se conservaron en refrigeración hasta su utilización en las pruebas. Cabe mencionar que el método de muestreo de agua está basado en la norma NMX-AA-003-1980.

Después de obtener el agua cruda y el concentrado de algas, se procedió a cuantificar la clorofila-a, el concentrado de algas alcanzó una concentración promedio de los diferentes muestreos de $952.5 \pm 314.3 \mu\text{g/L}$ de clorofila-a (parámetro indirecto del contenido de algas) y la del agua cruda fue de $4.53 \pm 1.16 \mu\text{g/L}$. Los cinco niveles de clorofila-a (que oscilaron en un intervalo de 10 a 80 $\mu\text{g/L}$ de clorofila-a) a tratar se prepararon con base en un balance de materia del contenido de clorofila del agua cruda y concentrada de algas, para ver el cálculo para la preparación de los niveles de clorofila-a ver el Anexo II.

Cabe resaltar que el contenido de clorofila-a en el concentrado se monitoreaba cada tercer día, para determinar el grado de degradación del pigmento en las muestras, que prácticamente no se presentó a lo largo de las pruebas probablemente debido a que se mantuvo en general a 4°C y protegido de la luz con papel aluminio.

La caracterización del agua cruda se realizó de manera previa a la ejecución de cada uno de los experimentos. Los parámetros que se midieron fueron: color, turbiedad, pH y clorofila-a.

Reactivos para el proceso de pre-oxidación-coagulación-floculación

Los experimentos de pre-oxidación-coagulación-floculación, como ya se mencionó se llevaron a cabo mediante pruebas de jarras. El reactivo utilizado como pre-oxidante debido a su elevado poder oxidante y sus costos relativamente bajos es hipoclorito de sodio. A continuación en la Tabla 3.1 se presentan las características del pre-oxidante.

TABLA 3.1 Características del hipoclorito de sodio utilizado como pre-oxidante en pruebas de pre-oxidación-coagulación-floculación-sedimentación con agua de presa.

Características del hipoclorito de sodio	
Nombre comercial	Hipoclorito de sodio
Fórmula	NaClO
Peso molecular (g/mol)	74.4
Potencial Redox (V)	1.49
Método de producción	Grado comercial.
Proveedor	Cloralex
Concentración de solución Stock (mg/L)	430

El coagulante pDADMAC es estudiado porque tiene probable mayor eficiencia con respecto al uso del SA STD, debido a que en artículos estudiados mencionan algunas ventajas como son: menor producción de lodos, menor dosis para el tratamiento de potabilización, no genera residuales de aluminio o de hierro, no afecta el intervalo de pH del efluente, sin embargo no hay información reportada respecto a su mayor eficiencia de remoción de algas en relación con el sulfato de aluminio (Lee et al, 2001; MWH, 2005; Bolto y Gregory, 2007).

En la Tabla 3.2 se muestran las características de los dos coagulantes utilizados en este estudio.

TABLA 3.2 Reactivos coagulantes empleados en las pruebas de pre-oxidación-coagulación-floculación.

Coagulante	Carga/PM	NSF (Uso Max.)	Clave experimental
pDADMAC	Catiónica />106	36mg/L	PDADMAC
Sulfato de aluminio estándar	Catiónica /342.15 g/mol	150 mg/L	S.A STD

NSF (National Sanitation Foundation) de Estados Unidos de Norteamérica

Se seleccionaron dos tipos de poliaminas como reactivos floculantes que se muestran en la Tabla 3.3, que son los que se reporta que mejor funcionan con esos coagulantes (Ramírez, 2008).

TABLA 3.3 Reactivos coagulantes empleados en las pruebas de pre-oxidación-coagulación-floculación.

Nombre de muestra	Sustancia activa	Carga /PM	NSF (Uso Max.)
PA1	poliamina	Catiónica/ APM	20 mg/L
PA2	poliamina	Catiónica /BPM	20 mg/L

3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño de experimentos (DDE) es la aplicación del método científico para generar conocimiento acerca de un sistema o proceso, mediante la planeación y realización de un conjunto de pruebas experimentales (Gutiérrez y De la Vara, 2008). Esta aplicación se ha ido consolidando como un conjunto de técnicas estadísticas y de ingeniería, que permiten entender mejor el comportamiento del proceso (Tan *et al.*, 2008; Islam *et al.*, 2009).

Con el sistema tradicional experimental de estudiar un solo factor a la vez, se requiere de muchos experimentos y tiempo, siendo carente de encontrar un óptimo verdadero, dado la falta de estudiar las interacciones entre los factores que describen al proceso (Gutiérrez y De la Vara, 2008). Por lo que empleando la metodología de los DDE se pueden reducir los números de experimentos necesarios, estudiar el efecto de las interacciones entre los factores de diseño (factores experimentales) sobre una variable de respuesta, obtener un modelo matemático que describa el comportamiento de la variable de respuesta, aminorar el tiempo para la realización experimental global, disminuir los costos y los recursos materiales (Gutiérrez y De la Vara, 2008; Tan *et al.*, 2008; Islam *et al.*, 2009).

La variable de respuesta (o simplemente respuesta) permite conocer el efecto o los resultados de cada prueba experimental; por tanto pueden ser variables de respuesta las características de la calidad de un producto y/o variables que miden el desempeño de un proceso, siendo objetivo de muchos estudios experimentales el encontrar la forma de mejorar u optimizar la variable de respuesta (Gutiérrez y De la Vara, 2008). Los factores de diseño son los factores que se investigan en el experimento, en relación a cómo influyen o afectan a la variable de respuesta, por lo que debe considerarse aquéllos que puedan ser controlables durante la experimentación (Gutiérrez y De la Vara, 2008).

Para estudiar la manera en que influye cada factor sobre la variable de respuesta es necesario elegir al menos dos niveles de pruebas (valores numéricos diferentes) para cada uno de los factores involucrados; así las posibles combinaciones de los niveles de los factores que pueden formarse se denominan matriz de diseño o experimental, representando a los puntos experimentales, pruebas o tratamientos al realizar (Gutiérrez y De la Vara, 2008).

La representación gráfica del modelo obtenido mediante un DDE se denomina superficie de respuesta, la cual describe el comportamiento de la variable de respuesta en cada punto de la región experimental estudiada (Gutiérrez y De la Vara, 2008). La metodología de superficie de respuesta (MSR) ha sido una herramienta útil para

modelar y analizar problemas que una respuesta de interés está influenciada por múltiples variables (Tan et al., 2008).

La optimización de las condiciones experimentales mediante el DDE y la MSR, ha sido ampliamente utilizada en diversos procesos de ingeniería ambiental como en biorremediación (Rigas et al., 2007), tratamientos de aguas residuales (Tir y Moulai-Mostefa, 2008), potabilización de agua (Annadurai et al., 2004), tratamiento de aire (Vildoza et al., 2010), entre otras. De los diseños experimentales más estudiados y aplicados están los diseños centrales compuestos (DCC) (Gutiérrez y De la Vara, 2008)

En general el DDE es el proceso de planear un experimento para obtener datos apropiados que puedan ser analizados mediante métodos estadísticos, con objeto de producir conclusiones válidas y objetivas (Montgomery, 2005). Además, aporta el conocimiento profundo de los procesos, generando herramientas eficaces de manejo de los mismos. Si se utiliza un DCC para las pruebas de POx-CF-S, este diseño permite obtener modelos estadísticos de segundo orden. Este tipo de modelos permiten conocer el nivel de influencia para la remoción de clorofila-a que puede tener cada factor respecto a la(s) respuesta(s) (Mongomery et al., 2006). En el Anexo III se presenta más a detalle el diseño de experimentos.

Para el cálculo del número de pruebas en un DCC, se utilizó la Ecuación 3.1:

$$N = 2^k + 2k + n_c$$

ECUACIÓN 3.1

Dónde:

N = número de experimentos.

k = número de factores.

n_c = número de réplicas en el punto central.

El valor del nivel alfa (α) o distancia del punto axial del centro se calcula con la Ecuación 3.2:

$$\alpha = \frac{NF^{1/2} - F^{1/2}}{2}$$

ECUACIÓN 3.2

Dónde:

$$F = 2^k$$

El DCC consideró tres factores principales, para cada combinación de POx-CF:

- Concentración inicial de clorofila-a (parámetro indirecto de concentración de algas).
- Dosis de pre-oxidante.
- Dosis de coagulante.

El valor de α y el número de pruebas para este proceso se muestra en la Tabla 3.4:

TABLA 3.4. Número de pruebas y valor alfa para el diseño POx-CF-Sedimentación.

Número de pruebas	Valor alfa (α)
$N = ?$ $K = 3$ $n_c = 3$	$F = 2k$ $F = 2(3) = 8$
$N = 2^k + 2k + n_c$ $N = 2^3 + 2 * 3 + 3$ $N = 8 + 6 + 3$ $N = 17$	$\alpha = \frac{NF^{1/2} - F^{1/2}}{2}$ $\alpha = \frac{17 * 8^{1/2} - 8^{1/2}}{2}$ $\alpha = 1.3531$

En la Figura 3.1 se pueden apreciar los puntos representados en un cubo, en la que se ilustra el valor alfa, a una distancia de ± 1.3531 del centro del cubo u origen.

Para la dosis de pre-oxidante se propuso evaluar el intervalo de 0 a 5mg/L, para verificar dos escenarios, sin y con adición de este reactivo, sobre la eficiencia de remoción de algas por los procesos de coagulación-floculación-sedimentación.

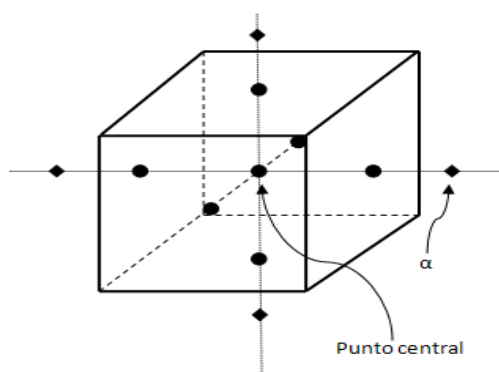


FIGURA 3.1 Representación gráfica de los puntos de DCC para los experimentos de POx-CF-Sedimentación.

Los límites para las dosis de coagulantes se especificaron a partir de los valores recomendados por los fabricantes, la dosificación del floculante se mantuvo fija debido a que en un estudio se mostró que no presentó una influencia significativa en el proceso remoción de clorofila-a (Ramírez, 2008). En la Tabla 3.5 se presentan los intervalos de

dosificación de POx-CF y de concentración de algas para los experimentos pre-oxidación-coagulación-floculación-sedimentación.

TABLA 3.5 Intervalos de dosificación de reactivos y de concentración de algas para los experimentos de POx-CF-S.

Factores	Nivel Codificado/real					Unidades
	-1.3531	-1	0	1	1.3531	
Clorofila-a inicial (Concentración de algas)	14.4	22.4	45	67.6	75.6	µg/L
Pre-Oxidante (hipoclorito de sodio)	0	0.9	2.5	4.1	5	mg/L
Coagulante-Floculante	-1.3531	-1	0	1	1.3531	
pDADMAC	1.2	1.7	3.0	4.3	4.7	mg/L
PA1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	mg/L
SA STD	6.2	10.4	22.0	33.6	37.8	mg/L
PA2	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	mg/L

Para este estudio se consideraron los siguientes variables de respuestas:

- Concentración residual de clorofila-a (rClor- a µg/L).
- Color aparente residual (rC, U Pt-Co).
- Turbiedad residual (rT, UNT).
- pH final (pH-f).
- Concentración de pre-oxidante residual (rPOx, mg/L).
- Producción de lodos (P.L, mg/L).

Para el caso de sulfato de aluminio estándar también se consideraron aluminio residual (rAl, mg/L) y hierro residual (rFe, mg/L).

Para las dos combinaciones evaluadas de pre-oxidante-coagulante-floculante se empleó la matriz codificada del DCC en la Tabla 3.6, se muestran las diferentes combinaciones de valores codificados de los tres factores evaluados en los 68 experimentos a realizar: clorofila-a inicial, dosis de pre-oxidante (POx) y dosis de coagulante (C); los valores de estos factores se representan de manera codificada (-1.3531, -1, 0, 1, 1.3531), lo que permite la simplicidad para efectuar los cálculos en el análisis estadístico (Gutiérrez y De la Vara, 2008).

TABLA 3.6 Matriz experimental codificada del DCC, para las pruebas de pre-oxidación-coagulación-floculación de agua de presa.

Prueba	Factores de diseño (Codificados)		
	Clorofila-a	Oxidante	Coagulante
1	0	0	0
2	-1	-1	1
3	0	1.35313	0
4	-1.35313	0	0
5	0	0	0
6	0	-1.35313	0
7	0	0	-1.35313
8	0	0	0
9	0	0	1.35313
10	1.35313	0	0
11	1	1	-1
12	-1	1	-1
13	1	-1	1
14	-1	1	1
15	-1	-1	-1
16	1	-1	-1
17	1	1	1

Los valores reales o naturales correspondientes a la matriz codificada para los factores de diseño se presentan en la tabla anterior. Como ese ya se mencionó las variables de respuesta que se cuantificaron para estas pruebas fueron el color residual (rC), turbiedad residual (rT), clorofila-a residual (rClor-a) pH final (pH-f), oxidante residual (rPOx, producción de lodos, hierro residual (rFe) y aluminio residual (rAl), éstos dos últimos parámetros para el caso en el que se utilizó sulfato de aluminio estándar.

SISTEMA Y PROTOCOLOS EXPERIMENTALES

La metodología aplicada para la realización de las pruebas de jarras fue la propuesta por la OMS (WHO, 2001). Esta metodología se seleccionó debido a que presenta como principal ventaja la realización de los procesos de coagulación y floculación por etapas, permitiendo de esta forma la simulación de los pasos llevados a cabo en las plantas potabilizadoras.

El pre-oxidante se adicionó en el mezclado rápido (300rpm), el coagulante se adicionó durante esa etapa, exactamente 10 segundos después de haber adicionado el pre-oxidante, y el floculante se añadió antes de la última etapa de agitación lenta (30 rpm). A continuación se describe el método experimental de las pruebas de pre-oxidación-coagulación-floculación.

Los experimentos de coagulación-floculación se realizaron en un equipo de prueba de jarras (Philips & Bird Co. Modelo 7790-400) y siguiendo la metodología propuesta por la OMS (WHO, 2001). A continuación se describe a detalle la metodología general aplicada para la realización de las pruebas de jarras:

1. Preparar las muestras de agua a tratar a partir de la mezcla de agua cruda y del concentrado de algas para obtener la concentración inicial de clorofila-a, según lo indicado en la matriz de experimentos, que en este caso son cinco niveles.
2. Tomar lectura de turbiedad, color, pH para cada nivel de clorofila-a de las muestras preparadas de agua a tratar.
3. Adicionar un litro de muestra preparada de agua a tratar, bien homogeneizada en cada una de las jarras del equipo empleado a nivel laboratorio.
4. Adicionar un litro de agua homogeneizada a tratar en cada una de las jarras y ajustar la velocidad de agitación a 300 rpm, se deja transcurrir 10 segundos para homogeneizar el agua cruda (*tiempo A*).
5. Al finalizar el *tiempo A*, se procede a adicionar en cada una de las jarras, las dosis correspondientes de pre-oxidante (hipoclorito de sodio), especificada en la matriz de experimentos y se deja transcurrir 10 segundos (*tiempo B*) a 300rpm.
6. Al finalizar el *tiempo B* se adiciona la dosis de coagulante (sulfato de aluminio estándar o pDADMAC) establecida en la matriz y se deja transcurrir un tiempo de 10 segundos a la misma velocidad (300rpm) (*tiempo C*).

7. Al finalizar el *tiempo C* se reduce la velocidad de agitación de manera gradual en tres etapas y conservando cada valor durante tiempo determinado como se muestra en la Tabla 3.7, en dicha tabla se aprecia mejor las etapas de pre-oxidación-coagulación-floculación con sus determinados tiempos y velocidades de agitación.
8. Una vez terminado el tiempo E se adiciona la dosis de floculante correspondiente a cada jarra con la matriz de experimentos y se dejan transcurrir 15 minutos (*tiempo F*). Así mismo se reduce la velocidad de agitación a 30rpm.
9. Al término del *tiempo F* se detiene la agitación y se deja transcurrir una hora para dar lugar a proceso de sedimentación por gravedad.
10. Posteriormente, se toman tres muestras en viales de 120mL para la determinación de los parámetros requeridos.
11. El agua que queda en las jarras se utiliza para la determinación de sólidos de lodo, con ayuda de un sistema de filtración al vacío con filtro GF/A.

TABLA 3.7 Tiempos y velocidades de agitación en el proceso de coagulación-floculación en las pruebas de jarras

Dosificación	Proceso	Velocidades de Agitación (rpm)	Tiempo (m' s'')	Tiempo acumulado (m' s'')
	Homogenización	300	10'' (tiempo A)	10''
Pre-oxidante	Pre-oxidación	300	10'' (tiempo B)	20''
Coagulante	Coagulación	300	10'' (tiempo C)	30''
Floculante	Floculación	60	4' 40'' (tiempo D)	5' 10''
		45	4' 40'' (tiempo E)	9' 50''
		30	15'' (tiempo F)	24' 50''

Para la captura y almacenamiento de los datos se empleó una hoja de registro de datos que se puede ver en el Anexo III la cual especifica la dosis de oxidante y coagulante para cada prueba, establecida por el diseño experimental. Esta hoja incluye espacios para anotar los factores de respuesta; Color residual (rC), Turbiedad residual (rT), clorofila-a residual (rClor-a) pH final (pH-f), oxidante residual (rPOx, producción de lodos, hierro residual (rFe) y aluminio residual (rAl), éstos dos últimos parámetros para el caso en el que se utilizó sulfato de aluminio estándar.

3.3 TÉCNICAS ANALÍTICAS

En la Tabla 3.8 se muestran los parámetros fisicoquímicos del agua, con su respectivo método, que se cuantificaron durante las pruebas experimentales de los procesos de pre-oxidación-coagulación-floculación-sedimentación. En el Anexo IV se describen las técnicas analíticas utilizadas en este estudio.

TABLA 3.8 Técnicas analíticas utilizadas para las pruebas de POx-CF-S.

Parámetro	Método	Técnica	Equipo y material	Referencia
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	SM 2540-D	Total suspended solids dried at 103-105°C	Materiales diversos de laboratorio	(Standard Methods Committee, 1997)
Cloro libre residual (mg/L)	4500-CI G	<i>Colorimetric method of DPD</i> Método colorimétrico de la N,N-dietil-p-fenil diamina (DPD)	HACH 2800.	(APHA, 1998)
Turbiedad (UNT)	SM 2130	<i>Analytical method for turbidity measurement standard methods</i>	Turbidímetro Turbiquant 1000, Merck	(USA-EPA, 2003)
Color (U. Pt-Co)	SM 2120 C	<i>Color, spectrophotometric method.</i>	HACH 2800.	(APHA, 1998)
Aluminio (mg/L)	SM 3500-Al B	<i>Aluminum by eriochrome cyanine R method.</i>	Spectroquant Al y Fotómetro Merck Nova 60.	(NEMI, 2010)
Clorofila-a	APA 446.0	<i>In vitro determination of chlorophylls a, b, c1 + c2 and pheopigments in marine and freshwater algae by visible spectrophotometry</i>	Fotómetro HACH 2800, lectura multionda.	(Arar, 1997)

SM: Standard Methods, corresponde al Standard Methods Committee y la referencia corresponde al proveedor del documento.

Las técnicas analíticas utilizadas en la determinación de parámetros estudiados que se presenta en la tabla anterior son métodos estandarizados que son equivalentes a las normas mexicanas que se presentan a continuación; NMX-AA-045-SCFI-2001 (Color Pt-Co), NMX-AA-038-SCFI-2001 (Turbiedad UNT), NMX-AA-034-SCFI-2001 (Sólidos suspendidos totales mg/L), NMX-AA-008-SCFI-2008 (pH), NMX-AA-108-1992 (Cloro residual mg/L), NMX-AA-129-SCFI-2006 (Hierro residual mg/L), NMX-051-SCFI-2001 (Aluminio residual mg/L). Para la cuantificación de clorofila-a, se siguió la metodología estandarizada descrita por la US EPA (1997). Este método consiste en extraer la clorofila-a presente se determina espectrofotométricamente, a diferentes longitudes de onda, a partir del extracto obtenido.

La lectura de los parámetros de Color residual (rC), Turbiedad residual (rT), pH final (pH-f), oxidante residual (rPOx, hierro residual (rFe) y aluminio residual (rAl) se efectuaron directamente a partir de las muestras tomadas de cada experimento. Una vez terminada la etapa de sedimentación, se procedió a vaciar los vasos de precipitados de las pruebas de jarras, al sistema de filtración con un papel filtro de 45µm para la cuantificación de producción de lodo producido por efecto de la pre-oxidación-coagulación-floculación, se realizó basada en la norma NMX-AA-034-SCFI-2001.

4 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Capítulo 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos en la caracterización del agua cruda de la presa Valle de Bravo. Posteriormente, se presentan los resultados obtenidos en las pruebas de pre-oxidación-coagulación-floculación-sedimentación (POx-CF-S). También se muestra el análisis estadístico y los modelos desarrollados así como la optimización y la evaluación técnico-económica del proceso POx-CF-S.

4.1 CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS DE AGUA CRUDA Y AGUA CONCENTRADA DE ALGAS

Los contenidos de clorofila-a de los concentrados de algas y del agua cruda de presa se presentan en la Tabla 4.1. Cabe mencionar que el volumen de cada concentrado fue de aproximadamente de 20L.

TABLA 4.1 Concentración de clorofila-a para el agua cruda (A) y los concentrados (C) de algas de presa.

No. muestra	Fecha de Muestreo	Clorofila-a (µg/L)
CC1	Diciembre 09, 2010	42
CC2		240
CC3		91
CC4		135
C1	Diciembre 14,2010	510
C2		419
A1	Enero 17, 2011	701
A2		1,417
A3		637
A4		1,384
A5		1,080
A6		793
A7		661
A8		948

Con los datos de concentración de clorofila-a del agua cruda y de los concentrados de clorofila-a se calcularon, utilizando un balance de materia (Anexo II), se calcularon los volúmenes necesarios a agregar de estos dos tipos de agua para conseguir cada uno de los cinco niveles de clorofila-a inicial para hacer las pruebas, estipulados en la matriz de experimentos. Los parámetros que se midieron de las mezclas o agua a tratar fueron: clorofila-a, color, turbiedad y pH.

En la Tabla 4.2 se representa la caracterización de las aguas a tratar por POx-CF-S para los cinco niveles de clorofila-a estipulados en la matriz de experimentos.

TABLA 4.2 Caracterización del agua a tratar con los niveles de clorofila-a estipulados en la matriz de experimentos.

Muestra	Clorofila-a ($\mu\text{g/L}$)	Color (U Pt-Co)			Turbiedad (UNT)			pH
- α sed	14	82	86	84	13.5	10.71	12.1	7.55
-1	22	90	86	88	13.11	13.9	13.5	7.59
0	45	123	129	126	18.29	19.47	18.9	7.61
1	68	166	172	169	28.00	29.93	29.0	7.56
α sed	76	190	191	195	21.63	22.46	22.0	7.59

Una vez preparada el agua a tratar con los niveles de clorofila-a estipulados en la matriz de experimentos, se procedió a realizar las pruebas de POx-C-F-S, de acuerdo al orden que marca la matriz de experimentos. Cabe mencionar que la matriz codificada es la misma para cada combinación de POx-CF.

4.2 PRUEBAS DE PRE-OXIDACIÓN-COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN-SEDIMENTACIÓN

4.2.1 Resultados generales

Como se mencionó previamente, fueron 17 pruebas con duplicado las que se realizaron utilizando cada coagulante, es decir, se efectuó un total de 68 pruebas para las dos combinaciones de coagulantes. El promedio de los resultados obtenidos de las pruebas experimentales se muestran a continuación en la Tabla 4.3 para pDADMAC y en la Tabla 4.4 para SA STD.

TABLA 4.3 Resultados de las pruebas de pre-oxidación-coagulación-floculación-sedimentación (POx-C-F-S), combinación; hipoclorito de sodio-pDADMAC-PA1-sedimentación.

Hipoclorito de sodio-pDADMAC-PA1-Sedimentación									
Prueba	Clorofila-a	Oxidante	Coagulante	Color residual	Turbiedad residual	Cloro residual	Clorofila-a residual	Producción de lodos	pH final
				U Pt-Co	UNT	mg/L	µg/L	mg/L	
1	-1.35313	0	0	0.5	0.29	0.35	0,039	15.6	7.11
2	-1	-1	-1	5.0	1.04	0.2	0,120	12.05	7.26
3	-1	-1	1	0.0	0.05	0.15	0,019	21.3	7.04
4	-1	1	-1	5.3	0.26	0.7	0,0193	15.55	7.295
5	-1	1	1	7.0	0.66	2.55	0	15.05	7.26
6	0	-1.35313	0	1.5	0.72	0.10	0,140	22.05	7.1
7	0	0	-1.35313	26.5	5.91	0.25	0,061	25.9	7.195
8	0	0	0	7.0	3.00	0.75	0,083	23.15	7.1
9	0	0	0	4.5	1.78	0.95	0,106	21.95	7.16
10	0	0	0	8.3	0.74	0.25	0,048	21.05	7.185
11	0	0	1.35313	13.8	0.77	0.20	0	20.4	7.17
12	0	1.35313	0	0.3	1.28	2.55	0.028	22.7	7.21
13	1	-1	-1	13.0	1.83	0.15	0.669	24.8	7.28
14	1	-1	1	13.0	2.08	0.2	0.309	27.95	7.1
15	1	1	-1	9.3	1.25	0.4	0.046	34.2	7.195
16	1	1	1	14.5	1.48	1.9	0.0382	32.6	7.3
17	1.35313	0	0	7.75	1.12	0.2	0	27.8	7.255

TABLA 4.4 Resultados de las pruebas de pre-oxidación-coagulación-floculación-sedimentación (POx-CF-S), combinación: hipoclorito de sodio-SA STD-PA2-sedimentación.

Hipoclorito de sodio-SA STD-PA2-Sedimentación											
Prueba	Clorofila-a	Oxidante	Coagulante	Color residual	Turbiedad residual	Cloro residual	Clorofila-a residual	Producción de lodos	pH final	Al residual	Fe residual
				U Pt-Co	UNT	mg/L	µg/L	mg/L		mg/L	mg/L
1	-1.35313	0	0	7.8	3.63	1.7	0.00	51.25	5.25	1.45	0.21
2	-1	-1	-1	6.5	3.13	0.3	0.00	40.80	5.85	1.4	0.19
3	-1	-1	1	10.5	6.94	0.2	0:00	71.45	4.14	2	0.34
4	-1	1	-1	0.5	3.44	2.6	0.00	45.25	6.04	1.1	0.18
5	-1	1	1	27.0	6.90	2.6	0.00	75.90	4.20	5.7	0.33
6	0	-1.35313	0	8.3	3.79	0.3	0.00	79.65	5.13	1.3	0.19
7	0	0	-1.35313	0.0	3.44	1.2	0.00	44.65	6.12	1.1	0.20
8	0	0	0	8.8	4.79	1.2	0.00	75.85	5.13	1.6	0.21
9	0	0	0	7.8	3.58	1.3	0.00	78.05	5.24	1.6	0.19
10	0	0	0	3.5	4.71	1.3	0.49	70.80	5.60	2.2	0.23
11	0	0	1.35313	13.0	7.31	1.5	0.00	85.05	4.19	7	0.33
12	0	1.35313	0	5.8	3.98	2.9	0.46	77.20	5.12	1.45	0.21
13	1	-1	-1	12.5	3.48	0.2	0.00	41.90	6.00	1.4	0.19
14	1	-1	1	31.0	7.94	0.4	0.00	97.40	4.33	5.9	0.33
15	1	1	-1	0.0	2.89	2.4	0.48	71.15	5.90	1.5	0.18
16	1	1	1	25.5	7.23	1.7	0.00	100.00	4:49	4.7	0.29
17	1.35313	0	0	1.5	4.40	1.8	0.00	74.45	5.58	1.2	0.21

A continuación se presentan las gráficas de las variables de respuesta estudiados en las pruebas de POx-CF-S, los cuales fueron: Clorofila-a, Turbiedad residual, Color residual y Producción de lodos.

Los límites permisibles de los parámetros de calidad de agua, utilizados en las pruebas de pre-oxidación-coagulación-floculación-sedimentación, son los valores permisibles por la NOM-127: color (20 unidades Pt-Co), turbiedad (5 UNT), cloro (0.2-1.5mg/L), aluminio (0.20mg/L), hierro (0.30mg/L). Para el límite de clorofila-a, parámetro indirecto del contenido de algas, se seleccionó el valor de 3µg/L, determinado para no tener taponamiento significativo de filtros (Ramírez, 2008).

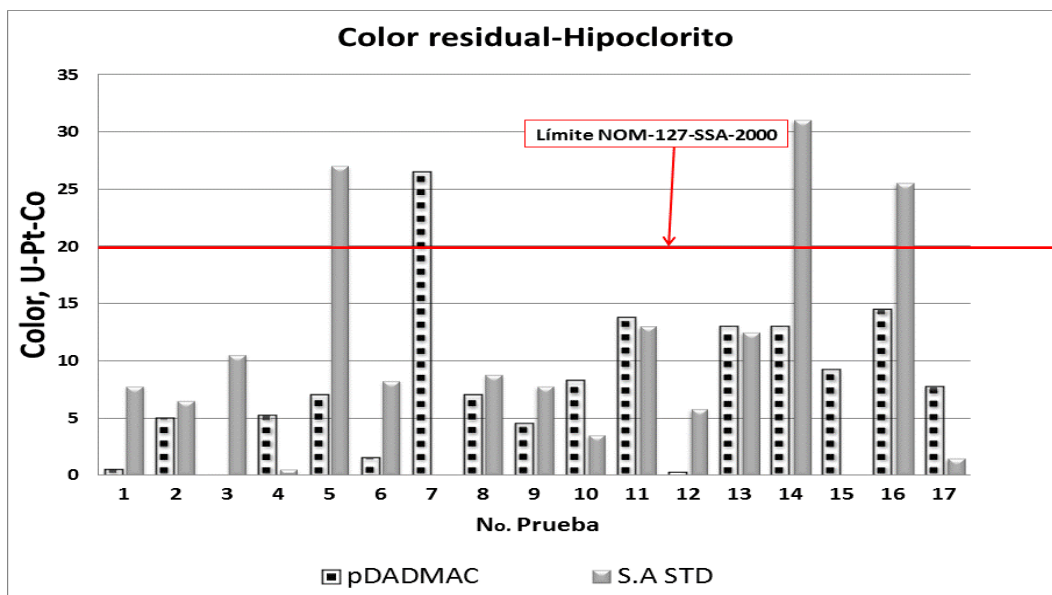


FIGURA 4.1 Color residual comparando los dos coagulantes empleados con hipoclorito de sodio como pre-oxidante.

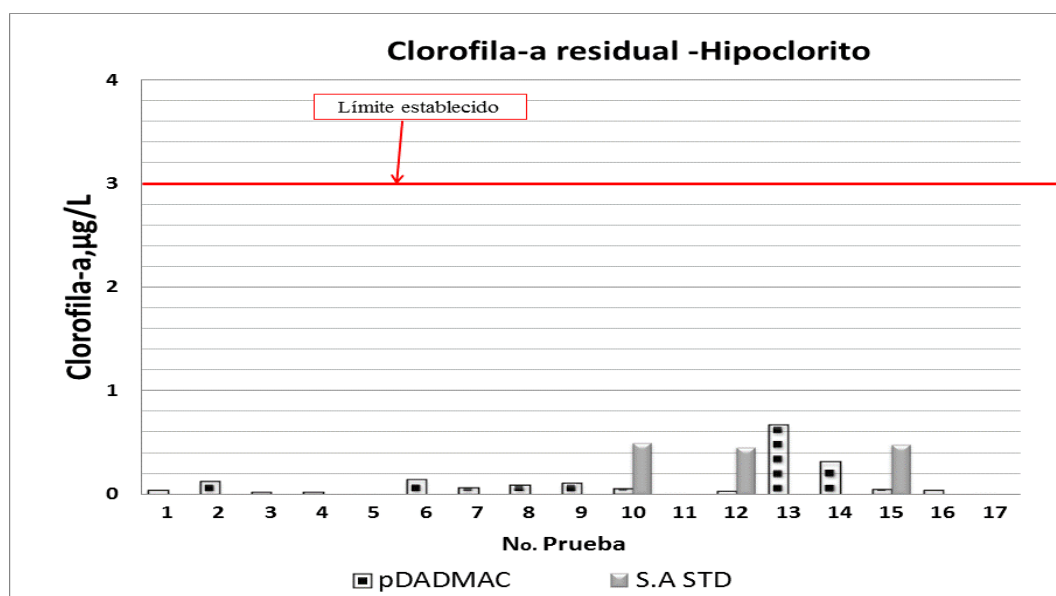


FIGURA 4.2 Clorofila-a residual comparando los dos coagulantes empleados con hipoclorito de sodio como pre-oxidante.

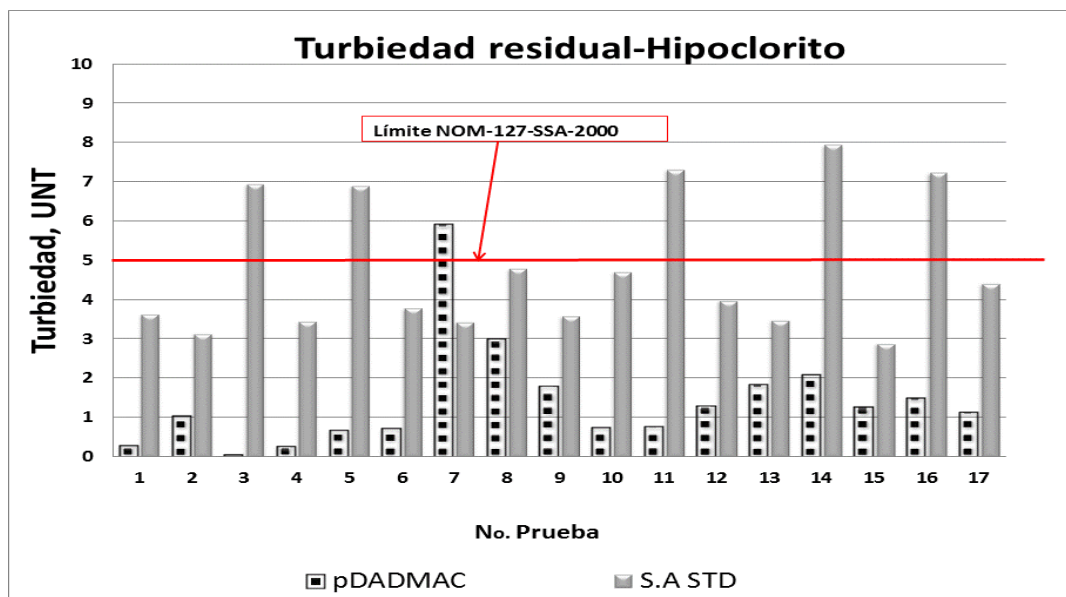


FIGURA 4.3 Turbiedad residual comparando los dos coagulantes empleados con hipoclorito de sodio como pre-oxidante.

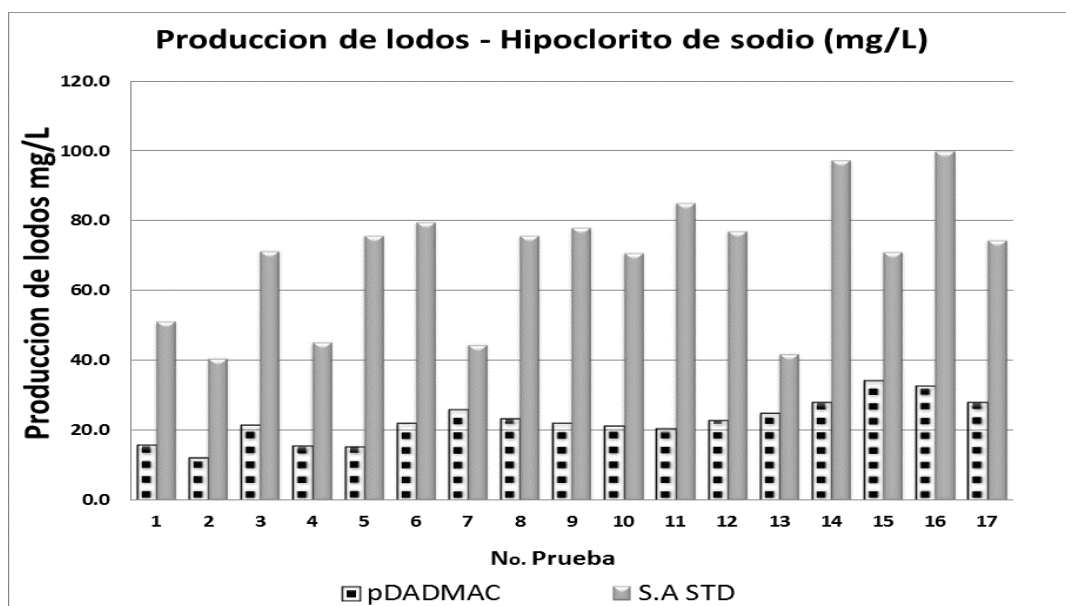


FIGURA 4.4 Producción de lodos comparando los dos coagulantes empleados con hipoclorito de sodio como pre-oxidante.

La Figura 4.1 se observa que el coagulante que obtuvo mejores resultados, en cuanto a remoción de color, fue el pDADMAC con 94.11% de las pruebas realizadas que se encuentran dentro del límite permitido de la NOM-127-SSA-2000 (denominada NOM-127 por facilidad). Para el sulfato de aluminio STD, en 82.35% de las pruebas, se obtuvo un color residual que se encuentra dentro del límite de la NOM-127.

En la Figura 4.2 se ilustran los valores residuales de clorofila-a donde se puede observar que los efluentes para las dos combinaciones POx-CF, hipoclorito de sodio-pDADMAC- PA1 e hipoclorito de sodio-SA STD-PA2 aprueban en 100% de las pruebas realizadas el límite establecido en este estudio.

Para el caso de la turbiedad residual, el pDADMAC fue el mejor coagulante debido a que en el 94.11% de las pruebas se removi6 este parámetro alcanzando, valores por debajo del límite de la NOM-127. En solamente 70.59% de las pruebas realizadas con sulfato de aluminio STD se obtuvieron remociones suficientes para aprobar el límite de la norma de agua potable. (Figura 4.3)

En la Figura 4.4 se observa que en general el Sulfato de Aluminio STD genera más del doble de lodos que el coagulante PDADMAC, esta grafica se muestra a fin de observar las diferencias en generación de lodos.

En la Figura 4.5 se resumen los porcentajes de aprobación de los resultados del proceso pre-oxidación-coagulación-floculación-sedimentación. El análisis de color, turbiedad se basó en la NOM-127, el parámetro de clorofila-a (parámetro indirecto del contenido de algas), se seleccionó el valor de 3µg/L máximo permitido, determinado en estudios anteriores para no tener taponamiento significativo de filtros (Ramírez, 2008). Si bien no existe una especificación en cuanto a la producción de lodo se refiere, en la Tabla 4.5 se presentan los promedios calculados a fin de observar las diferencias de generación del mismo en función de la combinación de pre-oxidante-coagulante-floculante utilizada.

TABLA 4.5 Resumen de porcentajes de aprobación respecto a los límites establecidos en la modificación de la NOM-127-SSA1-1994 emitida en el año 2000, de las combinaciones de pre-oxidante-coagulante-floculante (POx-CF-S).

Pre-oxidante	Coagulante	Floculante	Color residual	Turbiedad residual	Clorofila-a residual	Producción de lodos
Hipoclorito de sodio	pDADMAC	PA1	94.11 %	94.11 %	100 %	19.80 %
	SA STD	PA2	88.24 %	70.59 %	100 %	70.40 %

En general se observa que para ambas combinaciones de coagulantes (pDADMAC y SA STD), se observa que los efluentes cumplen en su mayoría con las especificaciones de la NOM-127; en estas pruebas, el uso del polímero orgánico (pDADMAC) como

coagulante en combinación con un polímero orgánico floculante (PA1) permitió obtener un mejor desempeño en comparación con la combinación de SA STD. Dicho desempeño se atribuye al mecanismo de acción de los coagulantes orgánicos, ya que los polímeros orgánicos (pDADMAC) poseen un mayor peso molecular (en comparación con el SA STD), lo cual le confiere un alto contenido de cargas positivas. Dichas cargas permiten neutralizar y desestabilizar a las partículas suspendidas de carga negativa presentes en el agua (Chang *et al.*, 2005). Los polímeros conforman cadenas que adsorben sobre la superficie de las partículas, contribuyendo a la neutralización de cargas; así como a la formación de puentes poliméricos entre las partículas (Bolto y Gregory, 2007). La adición del polímero floculante contribuye a una mejor formación de los puentes entre partículas desestabilizadas (Yu *et al.*, 2007) por lo que los lodos obtenidos son de mayor tamaño, más estables y densos (Matilainen *et al.*, 2010), reflejado por la menor producción de lodos cuantificada para las combinación de pDADMAC-PA1, que es menor que la de la combinación de SA STD-PA2.

A continuación se presente el análisis estadístico de los resultados obtenidos en las pruebas de pre-oxidación-coagulación-floculación-sedimentación (POx-C-F-S).

4.2.2 Análisis estadístico de resultados

Los resultados experimentales obtenidos en las pruebas de pre-oxidación-coagulación-floculación-sedimentación, se alimentaron al paquete informático Design Expert 8.05 para realizar el análisis estadístico de los mismos. El análisis de datos se basó en el análisis de varianza (ANOVA) para estimar los coeficientes de regresión para un modelo de segundo grado, o lineal (en función de las dosis de los reactivos, principalmente) según el que mejor se ajuste, para el cálculo de los parámetros fisicoquímicos de calidad de agua (clorofila-a, color, turbiedad y pH) evaluados en este estudio. Las ANOVA's también permitieron determinar las significancia de las variables y la precisión de dichos modelos matemáticos, los valores óptimos de las variables y de los residuales de los parámetros de calidad de agua utilizados en este estudio. La forma general de los modelos se muestra en la Ecuación 4.1.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_i X_i + \beta_{11} X_1 X_1 + \beta_{12} X_1 X_2 + \dots + \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon$$

ECUACIÓN 4.1 Forma general de los modelos estadísticos.

Donde β_i representan los valores de los coeficientes para los factores y β_j los valores de los co-factores en el modelo, ε representa el error asociado al modelo, ya que ningún modelo puede representar los valores experimentales de manera perfecta este error es inherente al modelo. Este error está conformado por diversas fuentes como son los asociados a las técnicas experimentales, las técnicas analíticas, los procedimientos de análisis, de muestreo, el tipo de analista y de muestreador, las condiciones

experimentales o el momento del análisis, así como errores asociados durante el proceso, etc.

Para determinar la existencia de una relación entre las variables experimentales y los factores de respuesta, los datos obtenidos deben ser analizados de manera estadística realizando una regresión. Esta se realiza para estimar datos, a través de una función o modelo matemático de un variable observada (variable de respuesta), la cual es una relación funcional entre la variable estimada (y) y una o más variables de entrada, x_1, x_2, \dots, x_n , cuando no se trata de una relación lineal se tendrá una ecuación cuadrática, y entonces técnicas cuadráticas similares son utilizadas para ajustar un modelo matemático conteniendo las regresiones, por la minimización del error residual medido con la suma de cuadrados de las desviaciones entre los valores experimentales y los estimados de las respuestas. De lo que se trata es de realizar cálculos para estimar los coeficientes de regresión. Para los coeficientes calculados, es decir, la ecuación del modelo, se necesita evaluar su significancia estadística mediante algunos parámetros que se mencionan más adelante (Noordin *et al.*, 2004).

4.2.2.1 ANOVA

Los resultados obtenidos de las pruebas de pre-oxidación-coagulación-floculación-sedimentación fueron analizados estadísticamente tomando como variables de respuesta o parámetros de optimización; color residual, turbiedad residual, clorofila-a residual pH final, oxidante residual, producción de lodos, hierro residual y aluminio residual.

El análisis estadístico consistió en determinar la validez de los resultados obtenidos, identificar las variables de mayor influencia en el proceso de POx-C-F-S para la remoción de clorofila-a (parámetro indirecta de concentración de algas) y desarrollar un modelo matemático que permita la optimización de las dosis de reactivos (pre-oxidante y coagulante).

A continuación se presenta el análisis de varianza que expresa la variabilidad en la respuesta de cada uno de los efectos por comparación del cuadrado de la media y el error experimental estimado. La Tabla 4.6 presenta el análisis de varianza (ANOVA) para los resultados obtenidos de remoción de clorofila de un agua de presa tratados por el proceso de POx-C-F-S, para la combinación: Hipoclorito de sodio, pDADMAC, PA1 (concentración inicial de 45µg/L). Y la tabla 4.7 presenta el análisis de varianza (ANOVA) los resultados obtenidos de remoción de clorofila de un agua de presa tratados por el proceso de POx-C-F-S, para la combinación: Hipoclorito de sodio, SA STD, PA2 (concentración inicial de 45µg/L).

TABLA 4.6 Reporte de análisis estadístico del contenido residual de clorofila-a del agua tratada por POx-CF-S por la combinación Hipoclorito de sodio-pDADMAC-PA1.

Hipoclorito de sodio-pDADMAC-PA1-Sedimentación					
CLOROFILA-a RESIDUAL					
Coefficiente	Suma de Cuadrados	GL	Media de cuadrados	Valor F	Valor P
A-clorofila inicial	0.12	1	0.12	8.49	0.0071
B-Oxidante	0.23	1	0.23	15.91	0.0005
C-Coagulante	0.056	1	0.056	3.80	0.0617
AB	0.15	1	0.15	10.24	0.0035
AC	0.015	1	0.015	1.05	0.3148
BC	0.047	1	0.047	3.22	0.0840
Residual	0.39	27	0.015	0	0
Falta de Ajuste (<i>Lack of Fit</i>)	0.24	8	0.030	3.56	0.0110
Error puro	0.16	19	0.008312	0	0
Correlación total	1.02	33	0	0	0

TABLA 4.7 Reporte de análisis estadístico y de varianza de contenido residual de clorofila-a para la combinación Hipoclorito de Sodio- SA STD.

Hipoclorito de sodio – S.A STD – PA2 (Sedimentación)					
CLOROFILA-a RESIDUAL					
Coefficiente	Suma de cuadrados	GL	Media de cuadrados	Valor F	Valor P
A - Clorofila inicial	0.04	1	0.04	0.528	0.4738
B - Oxidante	0.21	1	0.21	2.746	0.1091
C - Coagulante	0.04	1	0.04	0.528	0.4738
AB	0.06	1	0.06	0.769	0.3882
AC	0.06	1	0.06	0.769	0.3882
BC	0.06	1	0.06	0.769	0.3882
A ²	0	0	0		0
B ²	0	0	0	0	0
C ²	0	0	0	0	0
Residual	20.394.257	27	0.07553429	0	0
Falta de ajuste	0.34164362	8	0.04270545	0.47791976	0.8567
Error total	169.778.207	19	0.08935695	0	0
Correlación Total	2.50	33	0	0	0

El reporte ANOVA calculado por *Design Expert 8.05* presenta los parámetros estadísticos siguientes para la validación del modelo y significancia de los factores y cofactores o sus interacciones:

Falta de ajuste o “Lack of fit”

El parámetro “Lack of Fit”, traducido como “Falta de ajuste” indica cuan adecuado es el modelo, ya que se obtiene de la diferencia entre los residuales y el error puro de la experimentación de manera que se diferencia el error de los valores establecidos por el modelo (Box *et al.*, 2008); de tal manera que si el valor P en la tabla de ANOVA para este parámetro es igual o mayor a 0.05 entonces indica que el modelo es adecuado para representar los datos observados en la experimentación con un nivel de confianza del 95%.

Con los reportes ANOVA se puede validar el modelo y se identifican las variables y sus interacciones que son significativas en la eficiencia del proceso. Los modelos estadísticos permiten calcular los valores óptimos de las variables evaluadas para los cinco niveles de clorofila-a.

Como la medición de algún parámetro con un número determinado de réplicas puede estar disponible en la mayoría de las investigaciones, es posible realizar una prueba indicando la significancia del error en las réplicas en comparación al error dependiente del modelo. Esta prueba divide el residual o suma de cuadrados del error en dos porciones, una que es debida al error puro que está basada en la medición de réplicas y la otra debida a la falta de ajuste basada en el comportamiento del modelo. La prueba estadística “lack of fit” o falta de ajuste es la razón de los cuadrados medios de la falta de ajuste y los cuadrados medios del error puro. El valor estadístico F es utilizado para determinar si el error por falta de ajuste es significativo o no, en un nivel de significancia deseado α . Una falta de ajuste no significativa es deseada pues de lo contrario indicaría que el error podría deberse a contribuciones en la relación variable de entrada- factor de respuesta, que no están siendo tomadas en cuenta por el modelo (Noordin *et al.*, 2004).

Adicionalmente, una revisión es necesaria para que se determine si el modelo en realidad describe o no los datos experimentales. Esta revisión puede incluir el cálculo del coeficiente de determinación R^2 , R^2 ajustado y la precisión adecuada.

Valor R^2

En el diseño de experimentos R^2 es una medida de cuanto se reduce la variabilidad de la respuesta obtenida por los factores independientes en el modelo. Sin embargo, un valor grande de R^2 no implica que el modelo matemático de la regresión tenga un muy buen ajuste. El valor de R^2 se incrementa con la adición de variables al modelo sin importar que la variable que se adiciona es estadísticamente significativa o no. Es así como es posible obtener modelos que tienen valores altos de R^2 que arrojan pobres predicciones de nuevas observaciones o estimaciones de respuesta promedio. Aunque el valor R^2

siempre se incrementa al incrementar los términos del modelo, se prefiere el uso del valor de R^2 ajustado, pues en general este valor no siempre tienen un incremento cuando se adicionan variables al modelo. De hecho si un término innecesario es agregado el valor R^2 ajustado a menudo disminuye. Lo anterior es una buena oportunidad de identificar términos no significativos que han sido incluidos en el modelo, cuando los valores de R^2 y R^2 ajustado difieren dramáticamente (Ozer *et al.*, 2009).

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{residual}}{SS_{modelo} + SS_{residual}}$$

ECUACIÓN 4.2

$$R_{ajustada}^2 = 1 - \frac{SS_{residual} DF_{residual}}{(SS_{modelo} + SS_{residual})(DF_{modelo} + DF_{residual})}$$

ECUACIÓN 4.3

Donde los términos SS y DF corresponden a las suma de cuadrados y grados de libertad respectivamente (Korbahti *et al.*, 2008). De acuerdo a lo anterior el valor de R^2 debe estar razonablemente de acuerdo con el valor R^2 ajustado. El valor R^2 ajustado es particularmente útil cuando se comparan modelos con diferentes número de términos (Noordin *et al.*, 2004).

Precisión adecuada

La precisión adecuada (*adequate precision*) compara el rango de los valores predichos en los puntos de diseño con el promedio del error predicho. Valores mayores a 4 indican una adecuada discriminación del modelo (Noordin *et al.*, 2004).

$$Adequate\ precision = \frac{\max Y - \min Y}{V Y}$$

ECUACIÓN 4.4

$$V Y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V(Y) = \frac{p\sigma^2}{n}$$

ECUACIÓN 4.5

Dónde: p es el número de parámetros del modelo
 σ^2 es el cuadrado medio residual de la tabla
 n es el número de experimentos

Prueba de significancia del modelo de regresión.

La prueba es realizada como una prueba ANOVA mediante el cálculo del valor F , el cual representa la razón entre el cuadrado medio de la regresión y el cuadrado del error medio. El valor F , también llamado razón de varianzas, es la razón de la varianzas debida al efecto de un factor (en este caso el modelo) y la varianzas debida al término del error. Este cociente es utilizado para medir la significancia del modelo bajo investigación con respecto a la varianzas de todos los términos incluidos en el término del error en un nivel de significancia deseado α . Debido a lo anterior, un modelo que sea significativo es adecuado para representar los datos experimentales (Noordin *et al.*, 2004).

Prueba de significancia individual para los coeficientes.

Esta prueba forma la base para la optimización del modelo mediante la adición o supresión de coeficientes por medio de una eliminación retrospectiva, adición jerárquica o adición/eliminación/intercambio paso a paso. Lo anterior envuelve la determinación del p -value o valor de probabilidad, usualmente relacionado con el riesgo del falso rechazo de una hipótesis dada. Por ejemplo un valor “Prob. > F ” (reportado en la tabla ANOVA) en una prueba F nos dice la proporción (en términos de probabilidad) en la que se podría esperar tener el valor F establecido si la ausencia de efecto de un factor es significativa. El valor “Prob. > F ” determinado puede ser comparado con la probabilidad deseada o nivel α . En general, el menor orden polinomial debe ser seleccionado para una adecuada descripción de un sistema (Noordin *et al.*, 2004).

De manera de resumen en la Tabla 4.8 se presentan los 3 parámetros utilizados para verificar que el modelo es aceptable, con un nivel de confianza del 95%, (valor P del modelo, valor P de la falta de ajuste y precisión adecuada), se puede observar que todos los modelos desarrollados a partir de los datos experimentales presentan entre 2 y 3 de esos parámetros que son aceptables, lo que es un buen indicador de la validez de los mismos para ambas combinaciones de coagulantes. En esta tabla es posible observar que los datos en color rojo indican que no son aceptables esos valores. El parámetro denominado “Precisión adecuada” fue aceptable para todos los modelos, lo que permitiría decir que los modelos permitirían predecir adecuadamente, con 95% de nivel de confianza, los valores de los parámetros fisicoquímicos de calidad de agua evaluados en este estudio, en función de las dosis de reactivos. Por otra parte, el valor P del modelo fue aceptable en más casos respecto al parámetro “falta de ajuste”. Sin embargo, en la mayoría de los casos en los que este último parámetro no fue aceptable, su valor se encontró muy cercano al criterio de validez. Los reportes de ANOVA’s se presentan en el Anexo V. En conclusión todos los modelos desarrollados pueden ser considerados como aceptables o válidos.

TABLA 4.8 Valores de los parámetros de validez estadística para los modelos estadísticos obtenidos por el análisis de varianza, para pre-oxidación con hipoclorito de sodio-CF-S.

Hipoclorito de sodio-Sedimentación										
Coagulante	Parámetro	Criterio de Validez	Color	Turbiedad	Clorofila-a	Cloro residual	SST Lodos	pH	Al res	Fe res
pDADMAC	Valor P Modelo	<0.05	0.0215	0.0422	0.0001	< 0.0001	0.1305	0.0209		
	Valor P Falta de Ajuste	>0.05	0.3869	0.4783	0.011	0.0004	0.1313	0.5998		
	Precisión adecuada	>4	5.525	6.387	10.075	14.633	4.604	6.736		
	Calificación, aprobados de 3			3	3	2	2	2	3	
Sulfato de Aluminio STD	Valor P Modelo	<0.05	< 0.0001	< 0.0001	0.4345	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
	Valor P Falta de Ajuste	>0.05	0.004	0.02401	0.8567	< 0.0001	0.1484	0.6469	< 0.0001	0.0102
	Precisión adecuada	>4	8.632	16.490	4.109	24.680	17.586	29.680	19.545	26.153
	Calificación, aprobados de 3			2	2	2	2	3	3	2

4.2.3 Factores de influencia significativa sobre los procesos POx-CF-S

Se llevó a cabo el análisis de varianza para determinar los efectos que pueden tener cada una de los factores experimentales (factores de diseño), y/o sus interacciones para el proceso de POx-C-F-S para la remoción de algas en un agua de presa. En la Tabla 4.9 se muestran los términos que presentan una influencia estadísticamente significativa (*valor-p*<0.05), de los modelos matemáticos de los parámetros de calidad de agua obtenidos para las dos combinaciones de pre-oxidante-coagulante-floculante (Anexo V).

TABLA 4.9 ANOVA de las dos combinaciones de reactivos de los procesos de POx-C-F

Combinaciones	Modelos matemáticos	Términos significativos
Hipoclorito de sodio-pDADMAC-PA1	rC	AB (0.0302) C ² (0.0017)
	rT	A(0.0397) C(0.0230)
	rPOx	B(<0.0001) C(0.0002) BC(<0.0001) B ² (<0.0001)
	rClor-a	A(0.0071) B(0.0005) AB(0.0035)
	P.L	A(0.0204) A ² (0.0443)
	pH-final	B(0.0161) BC(0.0092)
Hipoclorito de sodio-SA STD-PA2	rC	C(<0.0001) B ² (0.02090) C ² (0.0415)
	rT	C(0.0001) C ² (<0.0001)
	rPOx	B(<0.0001) AB(0.0348)
	rClor-a	-
	P.L	A(<0.0001) C(<0.0001) A ² (0.0141) B ² (0.0201)
	rAl	C(<0.0001) AB(0.0074) C ² (<0.0001)
	rFe	C(<0.0001) C ² (<0.0001)
	pH-final	A(0.0209) C(<0.0001) B ² (0.0062) C ² (0.0153)

Para ambas combinaciones de reactivos de los procesos de POx-C-F, la concentración inicial de clorofila-a (A) y las dosis de pre-oxidante (B) y coagulante (C), de manera individual o en diferentes interacciones, son los factores que presentaron en general una influencia significativa sobre esos procesos, de tal forma que determinan los valores residuales de los parámetros de calidad de agua que se evaluaron en este estudio (rT, rPOx, rClor-a, P.L.). Estos resultados son lógicos de acuerdo a la información reportada en literatura.

MODELOS MATEMÁTICOS

A continuación se presentan los modelos matemáticos desarrollados de los parámetros de calidad de agua para las dos combinaciones evaluadas.

Hipoclorito de sodio-pDADMAC

$$rC = 5.0772 + 3.9711*(A-\text{Clorofila-a}) - 1.8171*(B-\text{Oxidante}) - 1.3193*(C-\text{Coagulante}) - 6.6250*(A-\text{Clorofila-a} * B-\text{Oxidante}) - 0.1875*(A-\text{Clorofila-a} * C-\text{Coagulante}) + 5.3125*(B-\text{Oxidante} * C-\text{Coagulante}) + 0.5355*(A-\text{Clorofila-a} * A-\text{Clorofila-a}) - 1.2396*(B-\text{Oxidante} * B-\text{Oxidante}) + 11.1173*(C-\text{Coagulante} * C-\text{Coagulante})$$

ECUACIÓN 4.6

$$rT = 1.8728 + 0.9614*(A-\text{Clorofila-a}) - 0.5178*(B-\text{Oxidante}) - 1.0736*(C-\text{Coagulante}) - 0.8075*(A-\text{Clorofila-a} * B-\text{Oxidante}) - 0.5481*(A-\text{Clorofila-a} * C-\text{Coagulante}) + 0.85381*(B-\text{Oxidante} * C-\text{Coagulante}) - 0.5502*(A-\text{Clorofila-a} * A-\text{Clorofila-a}) - 0.3905*(B-\text{Oxidante} * B-\text{Oxidante}) + 8882*(C-\text{Coagulante} * C-\text{Coagulante})$$

ECUACIÓN 4.7

$$rPOx = 0.5901 - 0.0989*(A-\text{Clorofila-a}) + 0.7002*(B-\text{Oxidante}) + 0.2815*(C-\text{Coagulante}) - 0.1188*(A-\text{Clorofila-a} * B-\text{Oxidante}) - 0.0313*(A-\text{Clorofila-a} * C-\text{Coagulante}) + 0.4188*(B-\text{Oxidante} * C-\text{Coagulante}) + 0.1301*(A-\text{Clorofila-a} * A-\text{Clorofila-a}) - 0.4431*(B-\text{Oxidante} * B-\text{Oxidante}) - 0.1574*(C-\text{Coagulante} * C-\text{Coagulante})$$

ECUACIÓN 4.8

$$rClor-a = 0.1013 + 0.0729*(A-\text{Clorofila-a}) - 0.0999*(B-\text{Oxidante}) - 0.0488*(C-\text{coagulante}) - 0.0967*(A-\text{Clorofila-a} * B-\text{Oxidante}) - 0.0310*(A-\text{Clorofila-a} * C-\text{Coagulante}) + 0.0542*(B-\text{Oxidante} * C-\text{Coagulante})$$

ECUACIÓN 4.9

$$P.L. = 24.2430 + 4.4796*(A-\text{Clorofila-a}) + 1.3016*(B-\text{Oxidante}) - 0.0122*(C-\text{Coagulante}) + 2.4750*(A-\text{Clorofila-a} * B-\text{Oxidante}) - 1.2750*(A-\text{Clorofila-a} * C-\text{Coagulante}) - 2.1875*(B-\text{Oxidante} * C-\text{Coagulante}) + 5.0483*(A-\text{Clorofila-a} * A-\text{Clorofila-a}) - 2.5570*(B-\text{Oxidante} * B-\text{Oxidante}) - 2.1337*(C-\text{Coagulante} * C-\text{Coagulante})$$

ECUACIÓN 4.10

$$\text{pH-f} = 7.16 + 0.019*(\text{A-Clorofila-a}) + 0.044*(\text{B-Oxidante}) - 0.031*(\text{C-Coagulante}) - 0.017*(\text{A-Clorofila-a*B-Oxidante}) + 0.023*(\text{A-Clorofila-a*C-Coagulante}) + 0.059*(\text{B-Oxidante*C-Coagulante}) + 0.014*(\text{B-Oxidante*B-Oxidante}) + 0.029*(\text{C-Coagulante*C-Coagulante})$$

ECUACIÓN 4.11

Hipoclorito de sodio-SA STD

$$\text{rC} = 3.7894 + 0.6682*(\text{A-Clorofila-a}) - 1.6606*(\text{B-Oxidante}) + 8.6041*(\text{C-coagulante}) - 2.5313*(\text{A-Clorofila-a*B-Oxidante}) + 0*(\text{A-Clorofila-a*C-Coagulante}) + 2.6563*(\text{B-Oxidante*C-Coagulante}) + 2.4728*(\text{A-Clorofila-a*A-Clorofila-a}) + 3.7699*(\text{B-Oxidante*B-Oxidante}) + 3.4968*(\text{C-Coagulante*C-Coagulante})$$

ECUACIÓN 4.12

$$\text{rT} = 4.1462 + 0.1875*(\text{A-Clorofila-a}) - 0.0661*(\text{B-Oxidante}) + 1.8277*(\text{C-coagulante}) - 0.1969*(\text{A-Clorofila-a*B-Oxidante}) + 0.1906*(\text{A-Clorofila-a*C-Coagulante}) + 0*(\text{B-Oxidante*C-Coagulante}) + 0.1039*(\text{A-Clorofila-a*A-Clorofila-a}) + 0*(\text{B-Oxidante*B-Oxidante}) + 0.8453*(\text{C-Coagulante*C-Coagulante})$$

ECUACIÓN 4.13

$$\text{rPOx} = 1.4372 - 0.0741*(\text{A-Clorofila-a}) + 1.0192*(\text{B-Oxidante}) - 0.0081*(\text{C-coagulante}) - 0.1375*(\text{A-Clorofila-a*B-Oxidante}) + 0*(\text{A-Clorofila-a*C-Coagulante}) - 0.1000*(\text{B-Oxidante*C-Coagulante}) + 0*(\text{A-Clorofila-a*A-Clorofila-a}) + 0*(\text{B-Oxidante*B-Oxidante}) - 0.1100*(\text{C-Coagulante*C-Coagulante})$$

ECUACIÓN 4.14

$$\text{rClor-a} = 0.0843 + 0.0413*(\text{A-Clorofila-a}) + 0.0943*(\text{B-Oxidante}) - 0.04134*(\text{C-coagulante}) + 0.0603*(\text{A-Clorofila-a*B-Oxidante}) - 0.0603*(\text{A-Clorofila-a*C-Coagulante}) - 0.0603*(\text{B-Oxidante*C-Coagulante})$$

ECUACIÓN 4.15

$$\text{P.L} = 73.1682 + 9.3675*(\text{A-Clorofila-a}) + 1.4007*(\text{B-Oxidante}) + 15.3677*(\text{C-coagulante}) + 2.7688*(\text{A-Clorofila-a*B-Oxidante}) + 2.7813*(\text{A-Clorofila-a*C-Coagulante}) + 0*(\text{B-Oxidante*C-Coagulante}) - 4.3843*(\text{A-Clorofila-a*A-Clorofila-a}) + 4.1221*(\text{B-Oxidante*B-Oxidante}) - 3.2920*(\text{C-Coagulante*C-Coagulante})$$

ECUACIÓN 4.16

$$\text{rAl} = 2.2051 + 0.2540*(\text{A-Clorofila-a}) + 0.2146*(\text{B-Oxidante}) + 1.7907*(\text{C-coagulante}) - 0.5625*(\text{A-Clorofila-a*B-Oxidante}) + 0.8715*(\text{C-Coagulante*C-Coagulante})$$

ECUACIÓN 4.17

$$\text{rFe} = 0.2081 - 0.0024*(\text{A-Clorofila-a}) - 0.033*(\text{B-Oxidante}) + 0.0624*(\text{C-coagulante}) + 0.0367*(\text{C-Coagulante*C-Coagulante})$$

ECUACIÓN 4.18

$$pH-f = 5.3580 + 0.0809*(A-\text{Clorofila-a}) + 0.0240*(B-\text{Oxidante}) - 0.7922*(C-\text{coagulante}) + 0.0575*(A-\text{Clorofila-a}*B-\text{Oxidante}) + 0*(A-\text{Clorofila-a}*C-\text{Coagulante}) + 0*(B-\text{Oxidante}*C-\text{Coagulante}) + 0*(A-\text{Clorofila-a}*A-\text{Clorofila-a}) - 0.1290*(B-\text{Oxidante}*B-\text{Oxidante}) - 0.1126*(C-\text{Coagulante}*C-\text{Coagulante})$$

ECUACIÓN 4.19

La Figura 4.5 y Figura 4.6 presentan la superficie de respuesta del valor residual de clorofila-a respectivamente para la combinación Hipoclorito de sodio-pDADMAC-PA1 e hipoclorito de sodio-SA STD-PA2. La superficie de respuesta fue construida manteniendo el factor A: contenido inicial de clorofila-a constante, en su valor codificado = 0, es decir 45µg/L. Los datos de estas figuras se calcularon con los modelos presentados anteriormente.

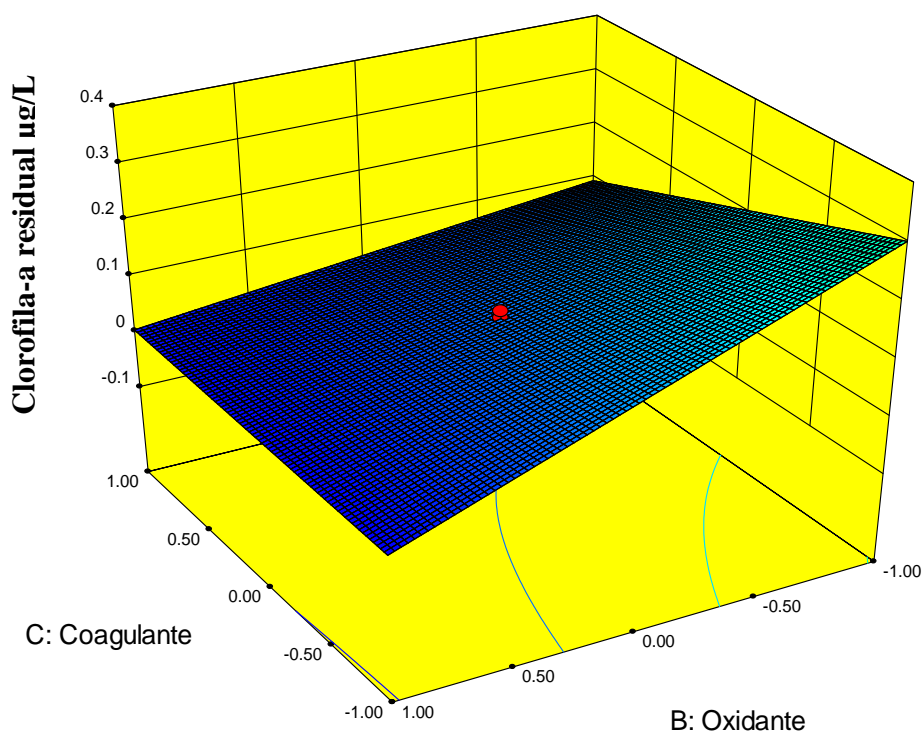


FIGURA 4.5 Superficie de respuesta estimada Factor A: Clorofila inicial=0.00 (45µg/L) del contenido residual de clorofila-a en función de la dosis de pre-oxidante (hipoclorito de sodio) y de coagulante (pDADMAC).

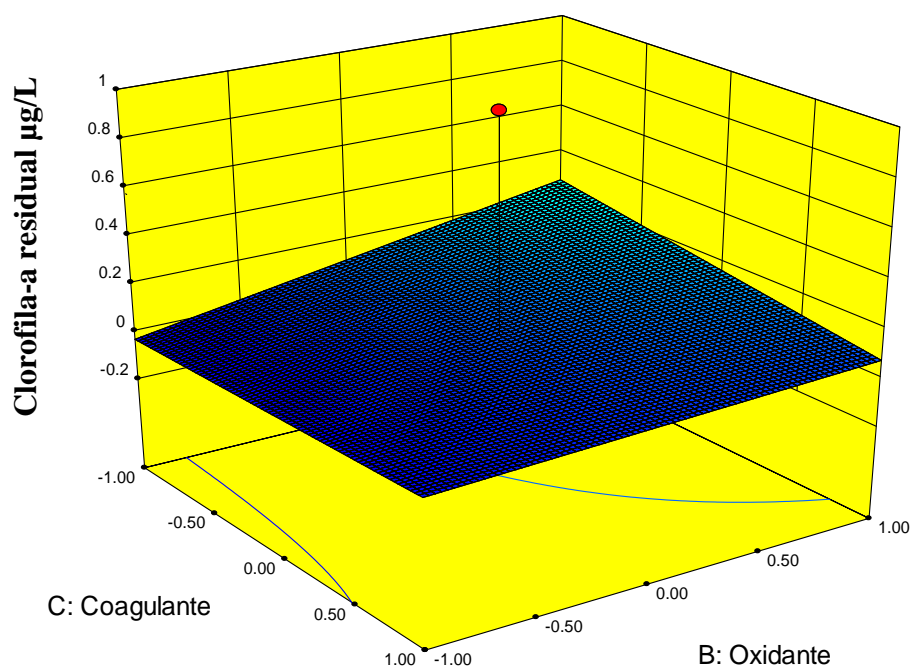


FIGURA 4.6 Superficie de respuesta estimada Factor A: Clorofila inicial=0.00 (45µg/L) del contenido residual de clorofila-a en función de la dosis de pre-oxidante (hipoclorito de sodio) y de coagulante (SA STD)

Para la combinación pDADMAC, se observa que altas dosis de pre-oxidante y sin variar la dosis de coagulante se obtiene una alta remoción de clorofila-a. Para favorecer la remoción de clorofila-a es conveniente realizar el proceso de POx-C-F-S usando preferencialmente bajas dosis de coagulante y altas dosis de pre-oxidante. Esto era esperado, dado que existen varios estudios donde se reporta que el uso de oxidantes (Cloro, Dioxido de cloro, etc.) en la etapa de pre-tratamiento del agua mejoran la remoción de algas siendo el cloro capaz de remover las algas, o bien, inhibir su crecimiento (Shen *et al.*, 2010; Knappe *et al.*, 2004), mediante la adición del coagulante pDADMAC inicia la desestabilización de las partículas, para favorecer su aglomeración y formar estructuras de mayor tamaño, que puedan sedimentar por gravedad.

Para la combinación SA STD, en la Figura 4.6 se observa que a bajas dosis de preoxidante y altas dosis de coagulante se obtienen bajos valores residuales de clorofila-a. Para favorecer la remoción de clorofila-a es conveniente realizar el proceso de POx-C-F-S con altas dosis de coagulante y dosis de bajas de pre-oxidante; esto debido a que las sales metálicas al entrar en contacto con el agua los respectivos iones Al^{3+} o Fe^{3+} son disociados, y comienzan a hidrolizarse formando diversos complejos, denominados especies mononucleares (ej. $Al(OH)_2^+$ $Al(OH)^{2+}$) y polinucleares (ej. $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+}$), estas especies poseen cargas positivas que permiten adsorberse a las partículas negativas

del agua, logrando así una neutralización de cargas (Chow *et al.*, 2009; Yan *et al.*, 2009; Matilainen *et al.*, 2010).

Dicho desempeño se atribuye al mecanismo de acción de los coagulantes ya que los coagulantes orgánicos (pDADMAC) poseen un mayor peso molecular (en comparación con el SA STD), lo cual le confiere un alto contenido de cargas positivas. Dichas cargas permiten neutralizar y desestabilizar a las partículas suspendidas de carga negativa presentes en el agua (Chang *et al.*, 2005). Los polímeros conforman cadenas que adsorben sobre la superficie de las partículas, contribuyendo a la neutralización de cargas; así como a la formación de puentes poliméricos entre las partículas (Bolto y Gregory, 2007).

En el Anexo V se muestran los resultados de ANOVA y su gráfica de superficie de respuesta con su respectivo modelo para cada variable respuesta para ambas combinaciones POx-CF.

4.2.4 Cálculo de los valores óptimos de las variables del proceso de pre-oxidación-coagulación-floculación-sedimentación para la remoción de algas, color y turbiedad

La optimización de la dosis de reactivos, se realizó considerando las diversas restricciones establecidas por la norma mexicana de calidad de agua potable (NOM-127), que se muestran en la (Tabla 4.10), para los factores de respuesta evaluados en el diseño experimental. Para cada factor de respuesta existe un modelo estadístico específico obtenido con cada combinación de POx-CF-S (Anexo V).

La optimización de los valores residuales de las respuestas se realizó por medio de la función “Solver” que provee Microsoft Office Excel 2007, el cual permite calcular raíces o valores determinados de una función directamente sobre las celdas de una hoja conociendo el modelo (o modelos) a optimizar. Esta subrutina requiere que se indiquen los datos que podrá modificar el programa para estimar el valor objetivo, o el más cercano a éste. Este programa tiene la posibilidad de hacer uso del método de iteración Newton-Raphson modificado o un método conjugado de dirección y extrapolación cuadrática.

Las restricciones matemáticas principales son las siguientes:

- Que siempre las raíces encontradas sean positivas y que la suma de los valores de las condiciones sea la mínima posible.
- Los valores codificados alcanzados deben encontrarse en el intervalo de los niveles $-\alpha$ y $+\alpha$ que son: ± 1.3531
- Los valores estimados reales deben ser un número real positivo.

Las restricciones principales con las que opera Solver se basan en los límites máximos permisibles que establece la NOM-127, dichas restricciones se enlistan a continuación (Tabla 4.10).

TABLA 4.10 Límites máximos permisibles para los factores de respuesta o parámetros de calidad de agua utilizada para los cálculos de optimización de los procesos POx-CF-S (NOM-127-SSA1-1994)

Parámetro de calidad	Mínimo	Máximo	Unidades
Color real	0	20	U Pt-Co
Turbiedad	0	5	UNT
pH final	6.5	8.5	Unidades de pH
Cloro libre residual	0.2	1.5	mg/L
Clorofila-a residual	0	3	µg/L
Aluminio residual	0	0.2	mg/L
Hierro residual	0	0.3	mg/L

El valor máximo del residual de clorofila-a debe ser menor a 3µg/L para evitar el taponamiento frecuente de filtros de arena (Ramírez, 2008).

En la Tabla 4.11 se presentan de manera comparativa los valores óptimos calculados para las combinaciones de pDADMAC y SA STD.

TABLA 4.11 Resultados de optimización del proceso de POx-C-F-S utilizando hipoclorito de sodio y dos combinaciones de coagulante-floculante (pDAMAC-PA1 y SA STD-PA2).

Hipoclorito de sodio	pDADMAC	SA STD
Dosis de oxidante (mg/L)		
min	0.12	2.08
máx	2.50	2.50
Dosis de coagulante (mg/L)		
min	2.68	8.84
máx	3.00	10.94
Turbiedad (UNT)	1.14	3.28
Color aparente (U Pt-Co)	5.32	1.64
Clorofila residual (µg/L)	0.13	0.12
Oxidante residual (mg/L)	0.33	1.26
Sólidos de lodo (mg/L)	28.62	47.72
pH final	7.15	6.08
Aluminio residual (mg/L)	0.00	1.23
Hierro residual (mg/L)	0.00	0.18

En la tabla 4.11 se puede observar que para ambas combinaciones estudiadas, los efluentes clarificados presentan valores de color, turbiedad que cumplen con el límite de la modificación de la NOM-127. Estos efluentes también cumplen con el valor límite de clorofila-a menor a $3\mu\text{g/L}$, para no tener una disminución significativa de la duración de las corridas de filtración en plantas.

Las dosis estimadas de SA STD, con ayuda de los modelos matemáticos desarrollados, sobrepasan a las dosis estimadas de pDADMAC, igualmente las dosis de hipoclorito de sodio obteniendo remociones de clorofila-a prácticamente iguales, lo que permite concluir que técnicamente ambos coagulantes trabajan con la misma eficacia.

Los reportes de la optimización de las dosis de pre-oxidante, coagulante y floculante a diferentes condiciones de operación se presentan en el Anexo V.

4.3 ESTIMACIÓN DE LA PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA: MATRIZ DE DECISIÓN MULTICRITERIO

Para concluir de manera precisa que combinación de coagulante es más eficiente, a continuación se hace una estimación de la prefactibilidad técnica y económica por medio de la matriz de decisión multicriterio (MDM).

Matriz de prefactibilidad técnico-económica

Después de estimar con los modelos matemáticos y Solver los valores de dosis óptimas de pre-oxidante y coagulante que cumplieron con las restricciones mencionadas de la NOM- 127 (Tabla 4.10) y con el fin de realizar la selección de la mejor combinación, se elaboró una matriz de prefactibilidad técnico-económica empleando la metodología de matriz de decisión multicriterio (MDM). Esta metodología, basada en un conocimiento general de datos principalmente de tipo técnico y económico, que puede permitir la selección de la mejor combinación de pre-oxidante-coagulante-floculante.

Identificados los aspectos a evaluar en la MDM se procedió a asignarles un “peso o ponderación”, con base en los criterios recomendados, los cuales pueden variar para cada situación específica. La suma total de todas las ponderaciones de todos los aspectos considerados deberá ser igual a 100%. A continuación en la Tabla 4.12 se presentan los aspectos y ponderaciones (o pesos) asignados.

TABLA 4.12 Ponderaciones asignadas a los aspectos evaluados en la MDM para pre-seleccionar la opción más factible de POx-CF

Aspecto evaluado	Ponderación %
Factibilidad técnica	50
Factibilidad económica	50
Total	100

Cada aspecto puede estar integrado por diferentes conceptos (Ejemplo: la prefactibilidad técnica puede contener la calidad del agua, producción de lodos, hierro residual, etc.). Para calcular la calificación o el porcentaje que tendrá cada aspecto, se elabora una matriz, compuesta de “ n_i ” columnas (i = aspecto a evaluar, por ejemplo: color residual- prefactibilidad técnica o costo de reactivo- prefactibilidad económica).

En la MDM se asigna a cada concepto a evaluar una calificación, comprendida dentro del intervalo de 0 a 5 (A), donde cinco corresponde a la mejor calificación. La calificación correspondiente se asigna en función de una equivalencia establecida a partir de los valores residuales de parámetros fisicoquímicos, o costos de reactivos. Posteriormente, se suman para cada renglón las calificaciones de cada columna (concepto) A_i . La suma total de los conceptos se multiplican por el máximo valor del

intervalo de A. la suma de las calificaciones asignadas a cada concepto (columnas) se divide entre B. Esta calificación se multiplica por el porcentaje asignado a cada aspecto (C_n), y se suman cada evaluación porcentual para obtener la calificación final (D) para cada aspecto POx-CF. A continuación se presenta detalle de las ecuaciones utilizadas en estos cálculos.

$$A \in 0,5$$

ECUACIÓN 4.20

$$B = A_{max} * n_i$$

ECUACIÓN 4.21

$$C_n = B * \%$$

ECUACIÓN 4.22

$$D = C_n$$

ECUACIÓN 4.23

Dónde:

- A= calificación asignada para el concepto n_i .
- A_{max} = calificación máxima, para este caso es igual a 5.
- C_n = es la calificación para el aspecto n_i .
- D= es la suma de estas calificaciones para todos los conceptos.

Con el fin de entender mejor el procedimiento, a continuación se describe los diferentes conceptos seleccionados y que integran cada uno de los dos aspectos a evaluar. Así mismo, se presenta la forma de evaluación para cada concepto y las calificaciones otorgadas.

Lista de conceptos seleccionados para la elaboración de la matriz de prefactibilidad técnica y económica.

Los conceptos técnicos seleccionados en este estudio para la MDM fueron los valores medidos en las pruebas de jarras de los parámetros de calidad del agua tratada. Los conceptos económicos seleccionados fueron los costos del pre-oxidante, coagulante-floculante. A continuación se enlistan los conceptos seleccionados para el aspecto técnico y el económico:

a) Aspectos seleccionados para determinar la Prefactibilidad técnica:

- 1) Color residual
- 2) Turbiedad residual
- 3) Clorofila-a
- 4) Pre-oxidante residual
- 5) Hierro residual
- 6) Aluminio residual
- 7) pH final
- 8) Producción de lodos

b) Aspectos seleccionados para determinar la Prefactibilidad Económica.

- 1) Costo de dosis mínima de pre-oxidante.
- 2) Costo de dosis máxima de pre-oxidante.
- 3) Costo de dosis mínima de coagulante-floculante.
- 4) Costo de dosis máxima de coagulante-floculante.

Aspectos seleccionados para determinar la prefactibilidad técnica

Cumplimiento de calidad de agua: Los parámetros Color, Turbiedad, Valor final de pH, Producción de lodos, Turbiedad residual y contenido residual de Fe-hierro y aluminio fueron evaluados con base en lo señalado por la modificación de la NOM-127-SSA1-1994. Mientras que el valor de Clorofila-a residual de acuerdo a lo establecido en el proyecto.

- ***Color residual:*** valores menores a 20 U Pt-Co
- ***Turbiedad residual:*** valores menores a 5 UNT.
- ***Clorofila-a:*** valores menores a 3.0 µg/L (Ramírez, 2008).
- ***Pre-Oxidante residual:*** intervalo de 0.2 a 1.5 mg/L.
- ***Hierro residual:*** valores menores a 0.30mg/L.
- ***Aluminio residual:*** valores menores a 0.20mg/L.
- ***pH final:*** este valor del agua debe de encontrarse en un intervalo de 6.5-8.5.
- ***Producción de lodos. No hay valor límite***

Aspectos seleccionados para determinar la prefactibilidad económica

Para una mayor facilidad en el manejo de costos se decidió presentar los datos en USD/año. El tipo de cambio monetario peso-dólar se estableció en \$11.83 MXN. Este aspecto considera un flujo de agua de 1m³/s tratado. Los precios utilizados fueron proporcionados por los proveedores. Los costos varían de acuerdo a las dosis calculadas por los modelos, de esta forma, se tomó en cuenta el costo para la mínima dosis y el costo para la máxima dosis de reactivos pre-oxidante y coagulante (Anexo VI)

A continuación se desarrolla la serie de pasos, ecuaciones y conversiones, necesarios para el cálculo del costo en dólares norteamericanos por m^3 (USD/ m^3) y para una mayor facilidad en el manejo de los costos se decidió presentar los datos en USD/año, para la dosis mínima optimizada de hipoclorito de sodio, SA STD y PA2-sedimentación.

Conversiones:

$$1 \frac{mg}{L} * \frac{1000L}{1m^3} * \frac{1g}{1000mg} = 1 \frac{g}{m^3}$$

$$1 \frac{g}{m^3} * \frac{1kg}{1000g} = 0.001 \frac{kg}{m^3}$$

$$1 \frac{mg}{L} = 0.001 \frac{kg}{m^3}$$

Con este factor de conversión se transformas las unidades de dosificación en unidades más convenientes:

Así para nuestro ejemplo de hipoclorito de sodio-sulfato de aluminio estándar- PA2 para las dosis mínimas para el proceso de sedimentación, **2.08 mg/L**, **8.84 mg/L** y **0.4mg/L** respectivamente. Los costos de los reactivos que se utilizan en este estudio se encuentran en el anexo VI.

Para el caso de la dosis mínima de Cloro:

$$2.08 \frac{mg}{L} * \frac{0.001 \frac{kg}{m^3}}{1 \frac{mg}{L}} = 0.00208 \frac{kg}{m^3}$$

Considerando el costo del cloro de 1.8843 USD/kg se tiene un costo por m^3 (USD/ m^3) por consumo de reactivo de:

$$0.00208 \frac{kg}{m^3} * 1.8843 \frac{USD}{kg} = 0.0039 \frac{USD}{m^3} \text{ de cloro}$$

Considerando que se tiene un flujo de planta total de **1 m^3/s** , y tomando en cuenta que se opera los 365 días de año, se tiene de tal forma el costo de cloro por año que es de:

$$0.0039 \frac{USD}{m^3} * \frac{1m^3}{s} * \frac{60s}{1min} * \frac{60min}{1hr} * \frac{24hr}{1dia} * \frac{365dias}{1año}$$

$$= 123,600.43 \frac{USD}{año} \text{ de cloro}$$

Para el caso del Sulfato de aluminio de aluminio estándar, con una dosis de 8.84 mg/L, considerando el costo del SA STD de 1.376 USD/kg, se estima el costo del SA STD por m³ como se muestra a continuación:

$$8.84 \frac{mg}{L} * \frac{0.001 \frac{kg}{m^3}}{1 \frac{mg}{L}} = 0.00884 \frac{kg}{m^3}$$

$$0.00884 \frac{kg}{m^3} * 1.376 \frac{USD}{kg} = 0.01217 \frac{USD}{m^3} \text{ de SA STD}$$

Considerando que se tiene un flujo de planta total de 1 m³/s, y tomando en cuenta que se opera los 365 días de año se tiene un consto en USD/año de sulfato de aluminio estándar de:

$$0.01217 \frac{USD}{m^3} * \frac{1m^3}{s} * \frac{60s}{1min} * \frac{60min}{1hr} * \frac{24hr}{1dia} * \frac{365dias}{1año}$$

$$= 383,912.71 \frac{USD}{año} \text{ de SA STD}$$

De igual forma para la dosis de floculante PA2 (poliamina (carga catiónica/ BPM)] de 0.4 mg/L se tiene:

$$0.4 \frac{mg}{L} * \frac{0.001 \frac{kg}{m^3}}{1 \frac{mg}{L}} = 0.0004 \frac{kg}{m^3}$$

$$0.0004 \frac{kg}{m^3} * 4.69 \frac{USD}{kg} = 0.001876 \frac{USD}{m^3} \text{ de PA2}$$

Considerando que se tiene un flujo de planta total de 1 m³/s, y tomando en cuenta que se opera los 365 días de año se tiene un consto en USD/año de PA2 e de:

$$0.001876 \frac{USD}{m^3} * \frac{1m^3}{s} * \frac{60s}{1min} * \frac{60min}{1hr} * \frac{24hr}{1dia} * \frac{365dias}{1año}$$

$$= 59,210.45 \frac{USD}{Año} \text{ de PA2}$$

Así se calculan los costos de pre-oxidante-coagulante-floculante para la combinación de Cloro-SA STD- PA2 en USD/m³: 0.003919 USD/m³ de cloro + 0.01217 USD/m³ SA STD + 0.001876 USD/m³ de PA2 y en USD/año de 123,600.43 USD/año de cloro + 383,912.71 USD/año SA STD + 59,210.45 USD/año de PA2.

En el Anexo VI se encuentran todos los cálculos restantes.

Los intervalos de calificaciones se establecieron para cada aspecto tomando los costos más económico y el más costoso de los reactivos de acuerdo a la dosis mínima y máxima de reactivo. Este intervalo se dividió entre cinco para obtener 5 intervalos de costos cada uno correspondiente a una calificación de 1-5, donde al menor valor del intervalo se le asigna la calificación más alta del rango de evaluación.

En la Tabla 4.13 se presenta el cálculo de la prefactibilidad técnica y en la Tabla 4.14 de la prefactibilidad económica de este tipo de MDM, utilizando hipoclorito y los dos coagulantes (pDADMAC y SA STD) bajo condiciones óptimas.

TABLA 4.13 Cálculo de la pre-factibilidad técnica, utilizando la metodología de la matriz de decisión multicriterio (MDM), para el proceso de pre-oxidación-coagulación-floculación-sedimentación.

Pre-factibilidad Técnica											50	
Pre-oxidación-Coagulación-Floculación-sedimentación											Subtotal	
n →				1	2	3	4	5	6	7		8
Respuestas →				Color	Turbiedad	Clorofila-a	Pre-oxidante residual	Fe residual	Al residual	pH final		Producción de Lodos
Símbolos de respuesta residual →				rC	rT	rClor-a	Pox-r	rFe	Al-r	pH-f	P.L	
Oxidante ↓	Coagulante ↓	B ↓	Criterios de calificación →	0 rC > 20 1 20 ≥ rC > 15 2 15 ≥ rC > 10 3 rC = 10 4 10 > rC > 5 5 5 ≥ rC ≥ 0	1 Tr > 5.0 3 5.0 ≥ Tr ≥ 2.5 5 2.5 ≥ Tr ≥ 0	1 rClor-a > 3.0 3 3.0 ≥ rClor-a ≥ 1.0 5 1.0 > rClor-a ≥ 0	1 rCl = 0 3 0.2 > rCl o rCl > 1.5 5 1.5 > rCl > 0.2	1 rFe > 0.3 3 0.3 ≥ rFe ≥ 0.1 5 0.1 > rFe	1 rAl > 0.2 3 0.2 ≥ rAl ≥ 0.1 5 0.1 > rAl	1 pH-f > 8.5 3 6.5 > pH-f 5 8.5 > pH-f > 6.5	0 P.L > 59 1 59 ≥ P.L ≥ 48 2 38 < P.L < 48 3 27 < P.L ≤ 38 4 27 ≥ P.L ≥ 16 5 0 < P.L < 16	
Hipoclorito de sodio	pDADMAC	40	A	4	5	5	5	5	5	5	3	37
			A/B	0,10	0,13	0,13	0,13	0,125	0,125	0,13	0,1	0,93
			C	5,0	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	3,75	46,25
	SA STD	40	A	5	3	5	5	3	1	3	2	32
			A/B	0,13	0,08	0,13	0,13	0,075	0,025	0,08	0,1	0,80
			C	6,25	3,8	6,3	6,3	3,8	1,3	3,8	2,5	40,00

TABLA 4.14 Cálculo de la pre-factibilidad económica y el total sumando la pre-factibilidad técnica, utilizando la metodología de la matriz de decisión multicriterio (MDM), para el proceso de pre-oxidación-coagulación-floculación-sedimentación.

Pre-factibilidad Económica					50				
Pre-oxidación-Coagulación-Floculación-sedimentación									
n →		9	10	11	12	Subtotal	Total		
Respuestas →		Dosis Mínima	Dosis Máxima	Dosis Mínima	Dosis Máxima				
Símbolos de respuesta residual →		USD/año	USD/año	USD/año	USD/año				
Oxidante ↓	Coagulante ↓	B ↓	Criterios de calificación →	1 USD/año >120 272,71 2 120 272,71 ≥ USD/año ≥ 91 978,23 3 91 978,23 > USD/año > 63 701,75 4 63 701,75 ≥ USD/año > 35 417,17 5 35 417,17 ≥ USD/año	1 USD/año >120 272,71 2 120 272,71 ≥ USD/año ≥ 91 978,23 3 91 978,23 > USD/año > 63 701,75 4 63 701,75 ≥ USD/año > 35 417,17 5 35 417,17 ≥ USD/año	1 USD/año > 482 739,56 2 482 739,56 ≥ USD/año ≥ 431 154,98 3 431 154,98 > USD/año > 379 570,40 4 379 570,40 ≥ USD/año > 327 985,82 5 327 985,82 ≥ USD/año	1 USD/año > 482 739,56 2 482 739,56 ≥ USD/año ≥ 431 154,98 3 431 154,98 > USD/año > 379 570,40 4 379 570,40 ≥ USD/año > 327 985,82 5 327 985,82 ≥ USD/año		
Hipoclorito de sodio	pDADMAC	20	A	5	1	5	5	16	53
			A/B	0,25	0,05	0,25	0,25	0,8	1,73
			C	12,5	2,5	12,5	12,5	40,0	86,25
	SA STD	20	A	1	1	2	1	5	37
			A/B	0,05	0,05	0,10	0,050	0,25	1,1
			C	2,5	2,5	5,0	2,5	12,50	52,5

La Tabla 4.15 Calificación de la pre-factibilidad técnico-económica del proceso de pre-oxidación-coagulación-floculación-sedimentación para remoción de agua de presa. Se presentan las calificaciones de la evaluación técnico-económica, obtenidas para las dos combinaciones estudiadas.

TABLA 4.15 Calificación de la pre-factibilidad técnico-económica del proceso de pre-oxidación-coagulación-floculación-sedimentación para remoción de agua de presa.

Oxidante	Coagulante	Pre-factibilidad técnica	Pre-factibilidad económica	Calificación
HIPOCLORITO DE SODIO	pDADMAC	46.25	40.0	86.25
	S A STD	40.0	12.50	52.5

Con base en los resultados de la prefactibilidad técnico-económica para los reactivos estudiados (Tabla 4.15), se puede concluir que la mejor combinación para la remoción de algas en agua de presa es la formada por hipoclorito de sodio-pDADMAC-PA1-Sedimentación con una calificación de 86.25/100, mientras que la combinación de hipoclorito de sodio-SA STD obtuvo una calificación de 52.5/100. La diferencia en las calificaciones de ambos coagulantes radica en el hecho de que el coagulante pDADMAC resulta significativamente más económico en comparación con el SA STD debido a que las dosis de pre-oxidante y coagulante son también significativamente más bajas para la remoción de algas en el tratamiento de agua. También el pDADMAC además de la ventaja económica tiene ventajas técnicas como son; baja producción de lodos que impacta directamente en el costo de tratamiento debido al manejo y disposición de estos residuos.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

De manera general se determinó que la combinación de hipoclorito de sodio-pDADMAC-PA1 (poliamina de carga positiva/alto peso molecular)-Sedimentación presentó una eficiencia con base en el estudio de prefactibilidad técnico-económica de los procesos de POx-C-F-S superior con una calificación de 86.25/100, respecto a la combinación de hipoclorito de sodio - SA STD - PA2 (poliamina de carga positiva/ de bajo peso molecular)-sedimentación con una calificación de 52.6/100. (Concluyendo que dicha combinación es más eficiente).

De manera específica para las pruebas de POx-C-F-S se concluyó también lo siguiente:

El análisis estadístico (ANOVA) de los resultados para las pruebas de remoción de algas mediante el proceso de pre-oxidación-coagulación-floculación-sedimentación, permitió establecer que todas los factores involucrados (A-Clorofila-a inicial, B- dosis de pre-Oxidante y C-dosis de Coagulante, así como la interacción AB y BC) presentan una influencia significativa sobre el factor de respuesta (porcentaje de remoción de algas), para un nivel de confianza de 95%.

Se calcularon los valores óptimos de dosis de las dos combinaciones de POx-coagulante, los valores óptimos de la mejor combinación a adicionar a un agua cruda con concentraciones iniciales de clorofila-a comprendidos entre 10 y 80 $\mu\text{g/L}$, los resultados oscilaron de 0.12 mg/L a 2.50 mg/L de hipoclorito de sodio, de 2.68 mg/L a 3.00 mg/L de pDADMAC y 0.1 mg/L de PA1. Todos los efluentes producidos cumplieron con los valores límite de color, turbiedad, pH marcados por la modificación de la NOM-127-SAA1-1994 emitida en el año 2000 así como del contenido máximo de clorofila-a de 3 $\mu\text{g/L}$ determinada para no disminuir la duración de las corridas de filtración, determinado en estudios anteriores (Ramírez, 2008).

Con las mejores dosis obtenidas en este estudio de (0.12 y 2.50 mg/L) de hipoclorito de sodio y de (2.68 y 3.0mg/L) de pDADMAC y 0.1 mg/L de PA1, para tratar agua de presa (presencia de algas de 10 a 80 $\mu\text{g/L}$ clorofila-a, 84 a 195 U Pt-Co y de 12 a 21 UNT), fue posible remover eficientemente algas (indirectamente como clorofila-a, color y turbiedad) por pre-oxidación-coagulación-floculación-sedimentación (efluente: 0 a 0.24 $\mu\text{g/L}$ de clorofila-a, de color de 0 a 11.4 U Pt-Co y de turbiedad de 0 a 2.19 UNT) con un costo de reactivo para el tratamiento estimado en USD/ m^3 de (0.0090 y 0.0145 USD/ m^3) y en USD/año (283,532.04 y 456,195.11 USD/año) respectivamente para cada dosis mínima y máxima de POx-CF, observándose que el factor económico está en función de concentración de clorofila-a inicial.

RECOMENDACIONES

RECOMENDACIONES

En este estudio se evaluó el mejoramiento de los procesos de pre-oxidación-coagulación-floculación-sedimentación, a escala laboratorio para la potabilización de agua de presas, utilizando hipoclorito de sodio como pre-oxidante y aplicando un polímero orgánico como coagulante. Sin embargo, también es necesario, estudiar las condiciones de mezclado (por ejemplo, tiempo y velocidades de agitación), dado que son factores que tienen influencia sobre la eficiencia de tratamiento de estos procesos.

Se recomienda realizar pruebas de pre-oxidación-coagulación-floculación-sedimentación en planta piloto, aplicando la combinaciones y dosis de reactivos pre-oxidante-coagulante-floculante utilizadas en este estudio, para determinar la factibilidad de la utilización del coagulante pDADMAC, en lugar del sulfato de aluminio, en la remoción de algas en plantas potabilizadoras.

REFERENCIAS

REFERENCIAS

- Abramovich, B., Lura, M. C., Carrera, E., Gilli, M. I., Haye, M. A., & Vaira, S. (2004). Acción de distintos coagulantes para la eliminación de *Cryptosporidium* spp. en el proceso de potabilización. 92-96. (U. N. Facultad de Bioquímica y Ciencias Biológicas, Ed.) Santa Fe, Argentina.
- Akhlaq, M. S. Puramshetty, E. Bothe, H. Steffen, C. (1990). The treatment of aqueous gum arabic solutions with ultraviolet radiation. *Water Research*.
- Al-Malack H., M., Abuzaid S., N., & El-Mubarak H., A. (1999). Coagulation of polymeric wastewater discharged by a chemical factory. *Water Research* .
- Annadurai, G. Sung, S. Lee, D. (2001). Simultaneous removal of turbidity and humic acid from high turbidity storm water. *Advances in Environmental Research*, 8 (3-4): 713-725.
- APHA, AWWA y WPCF (1998). *Standar Methods for Examination of Water and wastewater*, 20° ed. American Public Health Association, EUA.
- Arar, E. J. (1997). In vitro Determination of chlorophylls a, b, c1+c2 and pheopigments on Marine and Freshwater Algae by Visible Espectrophoto. *Environmental Protection Agency (EPA)* , Disponible en <http://www.epa.gov>.
- AWWA (1990). *Water Quality and treatment*, 4 ed., McGraw Hill, American Water Works Association USA.
- Barraque, C. y. (1979). *Manual técnico del agua*. Degremont.
- Benez, M. C., Kauffer Michel, E., & Alvarez Gordillo, G. d. (2010). Percepciones ambientales de la calidad del agua superficial en la microcuenca del río Fogótico, Chiapas. *FRONTERA NORTE* , 22 (43), 129-158.
- Blanco, de Lucas (2008) Estaciones de tratamiento de agua potable. master en Ingeniería y gestión medioambiental. Aquagest 23-25.
- Bolto, B., & Gregory, J. (2007). Organic polyelectrolites in water treatment. *Review Water Research* (41), 2301-2324.
- Brian Bolto, John Gregory. (2007). Organic polyelectrolytes in water treatment. *Water Research* .

BSI. (1998). *BSI Standards: chemical used for treatment of water intended for human consumption poly(diallyldimethylammonium chloride)*. London: British Standards Institute.

Cáceres Rodríguez, J. A. (2009). Evaluación del uso de Policloruro de aluminio como coagulante primario, en la planta de tratamiento de agua potable el cambray. Guatemala: Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Camel, V., & Bermond. (1998). The use of ozone and associated oxidation processes in drinking water treatment. *Water Research*.

Castillo I. C.N.A. (1996). La calidad del agua en México; Reunión regional sobre calidad del agua potable, OMS.

Castilla, L. (2009). Manual de tratamientos del agua de consumo humano. Consejería de sanidad deposito legal: 910/09.

Chang, E. E., Chiang, P. C., Chao, S. H., & Liang, C. H. (1999). Effects of polydiallyldimethyl ammonium chloride coagulant on formation of chlorinated by products in drinking water. *Chemosphere*.

Chang, E., Chi Chiang, P., Yan Tang, Wei., Hei Chao, S., Jan Hsing, H. (2004). Effects of polyelectrolytes on reduction of model compounds via coagulation. Chemosphere, Elsevier.

Chao, C., Zhang, X., He, W., Lu, W., & Han, H. (2007). Comparison of seven kinds of drinking water treatment processes to enhance organic material removal: A pilot test. *Science of the Total Environment Beijing, China*.

Chen, J. J., Yeh, H. H., & Tseng, I. C. (2009). Effect of ozone and permanganate on algae coagulation removal-pilot and bench scale test. *Chemosphere* (74), 840-846.

Child, P., Kaar, G., Benitz, D., & Hong-you, R. (1991). Reaction between chlorine and dimethylamine-containing polyelectrolytes leading to the formation of N-nitrosodimethylamine. *Proceeding from: Fourth National Conference on Drinking Water*, (págs. 58-71).

Ching-Jey(James), K., Gary, L., & Curtis, W. (1988). Factor affecting coagulation with aluminum sulfate-I. *Environmental Engineering Program, University of Arizona, Tucson*.

Chow, W. K., Drikas, M., House, J., Burch, M. D., & Velzeboer, R. A. (1999). The impact of conventional water treatment processes on cells of the cyanobacteria *Microcystis aeruginosa*. *Water Research* (33), 3253-3262.

Chow, C. van Leeuwen, J. A., Fabris, R., Drikas, M. (2009). Optimised coagulation using aluminium sulfate for the removal of dissolved organic carbon. *Desalination*, 245 (1-3): 120-134.

Comisión de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Acapulco, C. (s.f.). CAPAMA. Recuperado el 14 de 02 de 2011, de <http://www.capama.gob.mx/Captaciones/plantaspotabilizadoras.php>.

Comisión municipal de Agua Potable y Saneamiento de Xalapa, V. (s.f.). http://www.cmasxalapa.gob.mx/procesos_ppx.html. Recuperado el 14 de 02 de 2011

Comisión Nacional del Agua. (2008). *El sistema cutzamala es la única fuente de agua sustentable para el abastecimiento de la ZMVM*. México, D.F.: Secretaría de medio ambiente y recursos naturales.

Comisión Nacional del Agua (2011). Estadística del agua en México. (S. d. Naturales, Ed.)

Comisión Nacional del Agua (2008). Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación. México D.F.

Dr. Quevedo Urias Héctor Adolfo. (2006). Métodos Estadísticos para la Ingeniería Ambiental y la Ciencia. Juárez: Instituto de Ingeniería y Tecnología, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.

Drikas, M., Chow, C., House, J., & Burch, M. (2001). Using coagulation flocculation and settling to remove toxic cyanobacteria. *Water Works Associations* (93), 100-111.

Dugan R., N., & Williams J., D. (2006). Cyanobacteria passage through drinking water filters during perturbation episodes as a function of cell morphology, coagulant and initial filter loading rate. *United States Environmental Protection Agency, Water Supply and Water Resources Division*.

Dugan, N. R., & Williams, D. J. (2006). Cyanobacteria passage through drinking water filters during perturbation episodes as a function of cell morphology, coagulant and initial filter loading rate. *Harmful algae* (5), 26-35.

Edzwal, J. K. Dissolved Air Flotation and me (Publicación periódica).- USA: Water Research.- 2010.-7: vol. 44.

Elias Maxil, J. A. (2007). *Tesis de Maestría: " Remoción de cianobacterias presentes en agua natural mediante el acoplamiento del reactivo de fentonio con el proceso de flotación por aire disuelto"*. Mexico, D.F.: Instituto de Ingeniería-UNAM.

Environmental Protection Agency (EPA), Elizabeth J. Arar, (1997) In vitro Determination of Chlorophylls a, b, c1 +c2 and pheopigments on Marine and Freshwater Alge by visible Espectrophotometry. Disponible en <http://www.epa.gov> (diciembre 2010)

EPA, E. P. (2002). *National Environmental Methods Index*. Recuperado el 2011, de <http://www.epa.gov/microbes/1604sp02.pdf>

European Standard EN 1408:1998. (1998). *Chemicals used for treatment of water intended for human consumption - Poly(dialkyldimethylammonium chloride)*. Europa.

Fielding, M., Hutchinsono, j., Hughes, D. M., Glaze, W. H., & Weingberg, H. (1999). *Analytical methods for polymers and their oxidative by-products. American Water Works Research Foundation , Denver.*

Friedrich, E., & Buckley, C. (2002). The use of life cycle assessment in the selection of water treatment processes. *WRC Report 1077/1/01ISBN 186845858X .*

Geraldes, V. Anil, A. Norberta de Phino, M., Duarte, E. (2008). Dissolved air flotation of surface water for spiral-wound module nanofiltration pretreatment. *Desalination*, 228: 191-199.

Gregor, J. Maršálek B. (2004). Freshwater phytoplanton quantification by chlorophyll a: comparative study of in vitro, in vivo and in situ methods. *Water Research*, 38 (3): 517-522.

Gutiérrez Pulido, H. De la Vara Salazar, R. (2008). *Análisis y Diseño de Experimentos*. 2ª Ed., McGraw-Hill, México, 545pp.

HACH Company. (1998). *Espectrofotometro DR/2010 Abreged, Métodos de análisis*. Manual de operación, p. 376. Disponible en <http://www.hach.com> (diciembre 2010).

Hammer, M. J., (1996). *Water and Wastesater Technology*. Ed. Prentice Hall, 4^a ED., New York, E.U.A., pp 52-54.

Henderson, R., Parsons, S., & Jeferson, B. (2008). The impacto of algal properties nad pre-oxidation on solid-liquid separation of algae. *Water Research* , 1827-1845.

Henderson, R. K., Parsons, S., & Jefferson, B. (2010). The impact of differing cell and algongenig organic matter (AOM) characterirics on the coagulation and flotation of algae. *Water Research* (44), 3617-3624.

Hendricks, D. (2006). *Water treatment unit process: Physical and Chemical*. Taylor & Francis Group.

INSITITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, G. E. (2006). *"Estadistica a propósito del día mundial del agua" Datos nacionales*. México D.F.

IMTA. SEMARNAT. Mantilla, G. (2010). La experiencia mexicana en tratamiento de aguas residuales y opciones tecnológicas Retos y Oportunidades.

Instituto Mexicano de Tecnologia del Agua. (2010). *La experiencia mexicana en tratamiento de aguas residuales y opciones tecnologicas retos y oportunidades*. México D.F.: IMTA.

Islam, M. A. Sakkas, V. Albanis, T. A. (2009). Application of statistical design of experiment with desirability function for the removal of organophosphorus pesticide from aqueous solution by low- cost material. *Journal of Hazadous Materials*, 170 (1): 230-238.

Javier Castillo, N. B. (2000). Coagulant selection for water treatment process in plant "C". *Rev. Tec. Ing. Univ, Zulia* , 23 (3) . Maracaibo, Venezuela: Centro de Investigación del Agua, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería.

Jiang, J., Graham, N., & Harward, C. (1993). Comparison of polyferric sulphate with other coagulants for the remoal of algae-derived organic matter. *Water Science Technology* (27), 221-230.

Jun, H., Lee, Y., Lee, B., & Knappe, D. (2001). Effectivness of coagulants and coagulant aids for the removal of filter clogging synedra. *Journal of Water Supply AQUA* , 135-148.

Jun, Ma., & Wei, L. (2001). Effectiveness and mechanism of potassium ferrate (VI) preoxidation for algae removal by coagulation. *Water Reasearch* .

- Jun, H.-B., Lee, Y.-J., Lee, B.-D., Knappe, D.R.U (2001). Effectiveness of coagulants and coagulantais for the removal of filter- cloggin *Synedra Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*. 50(3): 135-148.
- Jung, M.-W., Ahn, K.-H., Lee, Y., Kim, K.-P., Rhee, J.-S., Park, J.T., Paeng, K.-J. (2001). Adsoption characteristics of phenol and chlorophenols on granular activated carbons (GAC). *Microchemical Journal*, 70 (2):123.131.
- Knnape D. R. U. (*et al*). *Algae detection and removal strategies for drinking water treatment plants (Libro)*.- Denver, USA: AWWA Research Foundation, 2004.
- Korbahti, B. K. y Rauf, M. A. Response surface methodology (RSM) analysis of photoinduced decoloration of toludine blue (Publicación periodica): *Chemical Engineering Journal*, 2008.-136.
- Lee, S.H. Shin, W.S. Shin M. C. Choi, S.J. Park, L.S. (2001). Improvement of water treatment performance by using Polyamine flocculants. *Environmental Technology*, 22 (6), 653-659.
- Legrini, E. Oliveros, A. Braum, M. (1993). Photochemical processes for water tretment. *Universitat Karlsruhe, Germany* pp 671-698.
- Lidia de Vargas. (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano*. Lima, Peru: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
- Liu, J., Chen, Y., & Ju, Y. (1999). Separation of algae cells from water by column flotation. *Separation Science Technology* , 2259-2272.
- Matilainen, A., Niina, L., Korhonen, S., & Tuhkanen, T. (2002). Removal of NOM in different stages of the water treatment process. *Environtment International* .
- Matilainen, A., & Sillanpaa, M. (2010). *Removal of natural organic matter from drinking water by advanced oxidation processes*. Mikkeli, Finland: Chemosphere.
- McCurdy, K., Carlson, K., & Gregory, D. (2003). Floc morphology and cyclic shearing recovery: comparison of alum and polyaluminum chloride coagulants. *Water Research Department of Civil Engineering, Colorado State University* .
- Medina Nolasco, C. (2010). Aplicación de nanocatalizadores de hierro soportados en zeolia para la inactivación de huevos de ascaris suum presentes en agua. México, D.F.: Tesis de licenciatura, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma México.

Méndez, J. P. (2002). *Desinfección del agua*. Lima, Perú: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente CEPIS-OPS/OMS.

Montgomery, J. M. (2005). *Water Treatment Principles and design*, Jonh Wiley & Sons. 2nd edition. Estados Unidos de América.

Montgomery Douglas y Runger George. *Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería (Libro)*; México: Limusa, 2006.

Morgan-Sagastume, J. M. Revah, S. y Loyola, A. (1999). Malos olores en plantas de tratamiento de aguas residuales. Su control a través de procesos biotecnológicos, *Ingeniería y Ciencias Ambientales*. Año 10, (41), 22-29

Mouchet, P., & Bonnèle, V. (1998). Solving algae problems: French expertise and world wide applications. *Journal Water Services Research Tehcnology AQUA* (47), 125-141.

Moussas, P., & Zouboulis, A. (2009). A new inorganic–organic composite coagulant, consisting of Polyferric Sulphate (PFS) and Polyacrylamide (PAA). *Water Research, Division of Chemical Technology, Department of Chemistry, Aristotle University of Thessaloniki* .

MWH (2005). *Water Treatment: Principles and Design*. 2^a edición, John Wiley and Sons, Inc., new Jersey, EUA, 1948 pp.

NEMI, N. E. (2010). *NEMI, Natioal Environmental Methods Index*. Recuperado el 2011, de https://www.nemi.gov/apex/f?p=237:38:2273675778259198:::P38_METHOD_ID:7398.

NMX-AA-008-SCFI-2001. Determinación del pH.

NMX-AA-045-1981. Determinación de color platino-cobalto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

NMX-AA-038-SCFI-2001. Determinación de turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

NMX-AA-034-SCFI-2001. Determinación de solidos y sales disueltas en aguas naturales, esiduales y tratadas.

NMX-AA-051-SCFI-2001. Determinación de metales por absorcion atómica en aguas naturales, potables residuales y tratadas

NMX-AA-108-SCFI-2001. Determinación de cloro libre y cloro total.

NMX-AA-122-SCFI-2006. POTABILIZACIÓN DEL AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO – SULFATO DE ALUMINIO – ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE PRUEBA.

NMX-AA-128-SCFI-2001. Sulfato ferrico y especificaciones y metodo de prueba.

NMX-AA-129SCFI-2001. Cloruro ferrico- especificaciones y metodosde prueba.

NMX-AA-136-SCFI-2007. (2007). *Potabilización del agua para uso y consumo humano - policloruro de dialilmetilamonio - especificaciones y métodos de prueba*. México.

NMX-AA-136-SCFI-2007. *Potabilziación del agua para uso y consumo humano - Policloruro de dialildimetilamonio- Especificaciones y Método de prueba*. Mexico D.F.: Diario Oficial de la Federacion- Secretaria de Economia.

NOM-003-SCT-2000. *Características de las etiquetas de envases y embalajes destinadas al transporte de sustnacias, materiales y residuos peligrosos*. Mexico, D.F: DOF-Secretaria de Comunicaciones y Transportes.

NOM-004-STPS-1999. *Sistema de protección y dispositivos de seguridad en la maquinaria y equipo que se utilice en los centros de trabajo*. Mexico, D.F.: Diario Oficial de la Federación-Secretaria del Trabajo y Previsión Social.

NOM-005-STPS-1998. (1998). *Relativa a las condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo para el manejo, transporte y almacenamiento de sustancias químicas peligrosas*. México.

NOM-010-STPS-1999. *Conidciones de seguridad he igieneen los centros de trabajao donde manejen, trnasporten o almacenen sustancias quimicas capaces de generar contaminación en el medioambiente laboral*. Mexico, D.F.: Diario Oficial de la Federación- Secretaria del Trabajo y Previsión Social.

NOM-017-STPS-2001. *Equipo de protección personal-selección, uso y manejo en los centros de trabajo*. Mexico, D.F.: Diario Focial de la Federación- Secretaria del Trabajo y PRevisión Social.

NOM-018-STPS-2000. *Sistema para la indentificación y comunicación de peligros y riesgos por sustancias qumicas peligrorsas en los centros de trabajo*. Mexico, D.F.: Diario Oficial de la Federación-Secretaria del Trabajo y Previsión Social.

NOM-030-SCFI-1993. *Información Comercial, declaración de cantidad en la etiqueta-especificaciones*. Mexico, D.F.: Diario Oficial de la Federación- Secretaría de Economía.

NOM-127-SCFI-1994. *Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. modificada en el año 2000*.

Noordin, M., Venkatesh, V., Sharif, S., Elting, S., & Abdullah, A. (2004). Application of response surface methodology in describing the performance of coated carbide tools when turning AISI 1045 steel. (145), 46-58.

Ozer, A. (y otros). (2009). Bio sorption of copper (II) IONS IN Enteromorpha prolifera: Application of response surface methodology (RSM) (Publicación periódica): Chemical Engineering Journal, 2009.-146.

Pavón Silva, T. B., Pacheco Salazar, V. F., & Cárdenas Zuazo, L. M. (2005). Tratamiento de lodos de una planta potabilizadora para la recuperación de aluminio y hierro como coagulantes. (78).

Parsons, S. A., Jefferson, B. (2006). Introduction to potable Water Treatment Processes 1º Ed., Blackwell Publishing Ltd., Oxford, Reino Unido, 179pp.

Pushparaj. (1990). *An integrated culture system for outdoor production of microalgae and cyanobacteria* (Vol. 1).

Ramírez, R. Orta, M. Araoz, L. Mercado, B. Yañez, I. Maxil, J. (2006). Eliminación, mediante procesos fisicoquímicos, de algas y sus endoxinas presentes en el agua tratada en la planta potabilizadora Los Berros. UNAM Instituto de Ingeniería.

Ramírez Zamora, R. M. (2008). *"Diagnostico y optimización de los procesos integrantes del tren de tratamiento de agua y lodos de la planta potabilizadora Los Berros (PPLB) y Madin (PPMD): Primera Etapa"*. Instituto de Ingeniería-UNAM, Ambiental e Hidráulica. Mexico, D.F.: IINGEN-CNA.

Ramírez G. Santacruz, C. L. Garrido, S. H. Fuentes, D. M. Calderón, C. M. Montellano, L. P (2011). Análisis del costo de tratamiento en tres tipos de fuentes para entregar agua potable a las ciudades de Guaymas y Ensenada, México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua 4 - 8.

Richards, F. A., y Thompson, T. G. (1952). The estimation and characterization of plankton populations by pigment analyses. II. A spectrophotometric method for the estimation of plankton pigments. *Jornal of Marine Research*. 11: 156-172.

Rigas, F. Papadopounlou, K. Dritsa, V. Doulia, D. (2007). Bioremediation of a soil contaminated by lindane utilizing the fungus *Ganoderma australe* via response surface methodology. *Journal of Hazardous Materials*, 140 (1-2): 325-332.

Rodríguez Fernández-Alba, A., Letón García, P., Rosal García, R., Dorado Valdiño, M., Villar Fernández, S., & Sanz García, J. M. (2006). Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. (F. p. Madrid, Ed.) Universidad de Alcála del Circulo de Innovación en Tecnologías Medioambientales y Energía (CITME).

Rodriguez, M. J., Serodes, J., & Roy, D. (2007). Formation and fate of haloacetic acids (HAAs). *within the water treatment plant* .

Rojo Cruz, M. (2006). Remoción de algas presentes en aguas naturales mediante el proceso de flotación. Mexico D.F.: Tesis de Maestría, Posgrado de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Saloma Aguilar, R. (2001). Mejora continua en el proceso de coagulación-floculación para la industria. *Universidad Nacional Autónoma México, Facultad de Ingeniería* . México D.F.: Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma México, Facultad de Ingeniería.

Sánchez Lavado, F. (2007). Tratamientos combinados físico-químicos y de oxidación para la depuración de aguas residuales de la industria corchera. Badajoz: Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias, Universidad de Extremadura.

Sánchez Salgado, Y. J. (2010). Aplicación de lodos de una planta potabilizadora en la producción de zeolitas sintetizadas para la remoción metales. México, D.F.: Tesis de Licenciatura, Facultad de Química, UNAM.

Selección del coagulante para el proceso de clarificación de las aguas de la Planta "C" de Maracaibo. (2000). *Rev. Tec. Ing. Univ. Zulia* .

Shanshan, G. Yan g, J. Tian, J. Ma, Fang. Tu, G. Du, M. (2009). Electro-coagulation-flotation process for algae removal. State key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Hei Langjiang, China.

Sharp, E. L., Parsons, S. A., & Jefferson, B. (Science of the total environment). Seasonal variations in natural organic matter and its impact on coagulation in water treatment (2006).

Shen, Qiaohui, Zhu, J. Cheng, L. Zhang, Z. Xu, X. (Department of Environmental Engineering). Enhanced algae removal by drink water treatment of chlorination coupled with coagulation (2010). Republic of China, Zhejiang University, Hangzhou.

SNF. (s.f.). *Hoja de Datos de seguridad de polidamac*. Recuperado el Diciembre de 2010, de [http://www.aniq.org.ma.pqta/pdf/FLOQUAT%20FL440%20\(MSDS\).pdf](http://www.aniq.org.ma.pqta/pdf/FLOQUAT%20FL440%20(MSDS).pdf)

Soto Villanueva, X. (2009). Espesamiento de seis tipos de lodos generados por coagulación-floculación del agua cruda de una planta potabilizadora. México, D.F.: Tesis de Licenciatura, Facultad de Química, UNAM.

Standard Methods Committee. (1997). *Norwalk Wastewater Equipment Company, Inc.* Recuperado el 2011, de Norweco: http://www.norweco.com/html/lab/test_methods/2540dfp.htm

Tan, I. A. W. Ahmad, A. L. Hammed, B. H. (2008c). Optimization of preparation conditions for activated carbons from coconut husk using response surface methodology. *Chemical Engineering Journal*, 137 (3), 462-470.

Tir, M. Moulai-Mostefa, N. (2008). Optimization of oil removal from oily wastewater by electrocoagulation using response surface method. *Journal of Hazardous Materials*, 158 (1): 107-115.

USA-EPA. (2003). *EPA United States Environmental Protection Agency*. Recuperado el 2011, de http://www.epa.gov/ogwdw/disinfection/lt2/pdfs/guide_lt2_pwsguide_appendix--h_turbidity-sm.pdf

Valentine, R. L., Choi, Z., Barrett, S. E., Hwang, C., Guo, Y., Whener, M., y otros. (2005). Factors affecting the formation of NDMA in water and occurrence. *AWWARF-Final Report-AWWA Research foundation and American Water Works Association*.

Van Hullebush, E., Deluchat, V., Chazal, P., & Baudu, M. (2002). Environmental impact of two successive chemical treatments in small shallow eutrophied lake: Part 1. Case of aluminium sulphate. *Environmental Pollution*, 617-626.

Vera Brito, N. (2007). Alternativas de potabilización para el agua que abastecerá a la ampliación del aeropuerto internacional de la ciudad de México. México D.F.: Tesis de Licenciatura, Instituto Politécnico Nacional.

Vildoza, D. Ferronato, C. Sleiman, M. Chovelon, J. (2010). Photocatalytic treatment of indoor air: Optimization of 2-propanol removal using a response surface methodology (RSM). *Applied Catalysis B: Environmental*, 94 (3-4): 303-310.

Wen, P. C., & Fung, H. C. (2002). A study of coagulation mechanism of polyferric sulfate reacting with humic acid using a fluorescence-quenching method. *Water Research*.

WHO (2001). Upgrading water treatment plants. 1a Ed, Spon Press, New York, EUA.

WHO (2004). Water treatment and pathogen control: Process Efficiency in Achieving Safe Drinking Water. Obtenido el 26 de agosto del 2011 en http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/en/watreatpath.pdf

Widrig L., D., Gray A., K., & McAuliffe S., K. (1996). Removal of algal-derived organic material by preozonation and coagulation: Monitoring changes in organic quality by pyrolysis-GC-MS. *Department of Civil Engineering and Geological Sciences*.

Yan, M. Wang, D. Shi, B. Wang, M. Yan, Y. (2007). Effect of pre-ozonation on optimized coagulation of a typical North China source water. Department of Environmental Engineering, College of Environmental Sciences Peking, China. *Chemosphere* 69 (2007) 1695-1702

Yu, J. Wang, D. Yan, M. Ye, C. Yang, M. Ge, X. (2007). Optimized coagulation of high alkalinity, low temperature and particle water: pH adjustment and polyelectrolytes as coagulant *Environmental Monitoring Assessment*, 131 (1-3): 377-386.

ANEXOS

ANEXOS

Anexo I

A continuación en la Tabla I.1 se presenta una lista de proveedores de sulfato de aluminio como sulfato de aluminio libre de hierro y sulfato de aluminio estándar.

TABLA I. 1 Lista de proveedores de sulfato de aluminio libre de hierro y estándar.

Sulfato de aluminio libre de hierro		Sulfato de aluminio estándar	
Empresa	Entidad	Empresa	Entidad
PROAGUA	Riva Palacio No. 169 norte, Col. Centro, C.P. 80000. Culiacán, Sinaloa.	ESTRATON MÉXICO	Retorno 14 No. 5 Col. Avante C.P. 04460, México, D.F. Tel: (+55) 5336-3049 Fax: (+55) 5336-4816
MARQUÍMICA	Tel. 01 (33) 3627-1178, 3627-1755, 3627-1943. marquimica@prodigy.net.mx Guadalajara, Jalisco.	SIDESA	Río Lerma No 55 Fracc. Industrial San Nicolás C.P.54030, Tlalnepantla, Edo. de México.
COLORO INT.	Alejandro Volta No. 6 Fracc. Ind. Cuamatla, C.P. 54730, México.	ISQUISA	Calle 10, No. 917. Col. San José, C.P. 94560, Córdoba, Veracruz. Tel. 01 (271) 7171800
CHEMICAL CORP. JK	Calle Barcinos No. 1512 Col. Paraísos del Colli. C.P. 45069, Zapopan, Jalisco. Tel. (33)3833 8484. Cel. 044 (33)5305 9492. Nextel. 1609 0280 Id. 52 2967 3617	CINÉTICA QUÍMICA	Av. Ruíz Cortínez No. 915 Ote. Vidriera. C.P. 64520, Monterrey, Nuevo León.
PROQUISOSA	Puerto alegre No. 107 Col. Miramar, C.P. 45060 Zapopan, Jalisco, Tel.: (33) 1028-8035, Fax: (33) 1028-8088, ventas@proquisosa.com.mx	RICHTER	Av. Cuauhtémoc No. 28, Col. La Joya, C.P. 55016, México, D.F.
COSMOCEL SA	Emilio Cárdenas No. 49 C.P. 54000. Tlalnepantla, Edo de México, Tel.: +52 (55) 5565 2533. Fax: +52 (55) 5390 3465. info.quimica@cosmocel.com.mx	CARLKARM	Paseo De La Bondad No. 49. Col. Paseos De Chalco, C.P. 56600, Chalco, Estado de México Tel: 015541978414
QUÍMICOS Y SOLVENTES DE MORELOS	Calle 9 Este No. 22 CIVAC, C.P. 62500, Jiutepec, Morelos	SOLUCIONES BÁSICAS DE OCCIDENTE	José María Vigil No. 1336, Col. Artesanos, C.P. 44200, Guadalajara, Jalisco. Tel. 01 (33) 3827 5895

TABLA I. 1 Lista de proveedores de sulfato de aluminio libre de hierro y estándar (Continuación).

Sulfato de aluminio libre de hierro		Sulfato de aluminio estándar	
Empresa	Entidad	Empresa	Entidad
PRODUCTOS PARISSI	Calle 21 No. 520, entre Avenida 5 y 9 Col. Centro, C.P. 94500, Córdoba, Veracruz.	AGUA LAMA	Av. Juan Gil Preciado No. 6003-A, Col. Jardines de Nuevo México. Zapopan, Jalisco Tel: +52 (33) 3629-6088 01 800 832 9720 Fax: +52 (33) 3629-2698
QUÍMICA SALAK	Echegaray No. 31, Col. Daniel Garza, C.P. 11830 México, D.F.	AQUALIFE	Cerrada Yarumela No. 36-A Col. Macopilli, C.P. 72730, Cuautlancingo, Puebla.
G.C.A.	18 Norte No. 1816 Col. México C.P. 07230, Puebla, Puebla Tel./Fax: (+222) 297 3105	PROOQUIMEX	Aldama No. 811 Sur Col. Rosales, Culiacán, Sinaloa, Tel. 667 716 1815 Fax: 677 716 4631
GRUPO PROTINUS	Amores No. 16-B Col. Santa Inés, Del. Azcapotzalco, C.P. 02140, D.F. México. Tel. 2626-0105	--	--
DERQUIMEX	Zapopan, Jalisco. www.derquimex.com	--	--
ALQUIMIA MEX	Cerrada de Colima No. 2-2 Col. Roma 06700 México, D.F. Tel: (01+55) 5533-5563, 5533-3964, 5533-3965. Fax: (01+55)5511-8970. alquimiamex@prodigy.net.mx	--	--
SIDESA	Río Lerma No 55 Fracc. Industrial San Nicolás C.P.54030. Tlalnepantla, Edo. de México, México.	--	--
CÍNETICA QUÍMICA	Av. Ruíz Cortínez No. 915 Ote. Vidriera. C.P. 64520, Monterrey, Nuevo León	--	--
RICHTER	Av. Cuauhtemoc No. 28, Col. La Joya, C.P. 55016, México, D.F.	--	--
KEMIRA DE MÉXICO	Montecito No. 38 Piso 39, Oficina 12 Col. Nápoles, México MX-03810, México, D.F. Tel. +52 55 9000 4140 Fax +52 55 9000 4144	--	--

Proveedores de coagulantes y floculantes poliméricos en México

La Tabla I. 2 presenta una lista de proveedores de polímeros orgánicos catiónicos (pDADMAC) a nivel nacional.

TABLA I. 2 Proveedores de polímeros orgánicos en México.

Empresa	Contacto
SIDESA	Río Lerma No. 55, Fracc. Industrial San Nicolás C.P.54030, Tlalnepantla, Edo. de México, México.
AQUALIFE	Cerrada Yarumela No. 36-A, Col. Macopilli, C.P. 72730. Cuautlancingo, Puebla.
C & T TECHNOLOGY	Mineros Metalúrgicos No. 114, Col. Trabajadores del Hierro C.P. 02650, Del. Atzacapotzalco México D.F. Tel.: 57161720 / 57191740
KURIMEXICANA	Av. de las Fuentes No. 6, Parque Industrial Bernardo Quintana El Marqués, Querétaro. C.P. 76241 Tel. (442) 218 5911, 218 5922 Fax.(442) 218 1177
NALCO	Av. Santa Fe 505 - Desp. 400, 4° Piso, Col. Cruz Manca C.P. 05349, Del. Cuajimalpa, México, D. F. Tel. (+ 52 55) 5081 6170
CIBA	Av. de los Insurgentes No. 3579, Torre 3, Piso 3 Col. Tlalpan La Joya C.P. 14000 México, D.F. Tel: (+55) 5528-9300, 5528-9400 5528 9500, Fax: (+55) 5528-9551
SNF-FLOERGER	Montecito No. 38, Piso 26, Oficina 4 Col. Nápoles C.P. 03810, México D.F. Tel.: (52) 5554 880882
ENPA-SERVICES	Transformación No. 6-A, Fracc. Industrial La Joya Cuautitlán Izcalli C.P. 54800, Edo. de México.

Anexo II

Preparación de agua concentrada

Las muestras de agua cruda fueron tomadas de la presa de Valle de Bravo (Anexo 1), se transportaron al laboratorio del Instituto de Ingeniería de la UNAM en bidones de plástico con capacidad de 20 L protegidos de la luz con papel aluminio para impedir el crecimiento de las algas, y se conservaron a una temperatura de 4°C para evitar la descomposición gradual del agua.

La preparación de agua a tratar (niveles de clorofila-a) en las pruebas se realizó con base en un procedimiento de balance de materia utilizando agua cruda y los concentrados de algas de la presa Valle de Bravo. Cabe resaltar que el contenido de clorofila-a en el agua cruda y agua concentrada de algas se monitoreaba cada tercer día, para observar, si existía, una degradación del pigmento, situación que no se presentó.

A continuación se presenta un ejemplo del cálculo de los volúmenes a adicionar de agua cruda y de concentrada de algas, utilizando ecuaciones del balance de materia, para preparar 20 L de agua a tratar con un nivel o concentración inicial de clorofila de 80µg/L. La información de inicio se ilustra en la Tabla II. 1.

TABLA II. 1 Datos requeridos de concentración y volumen de agua del trac y de concentrado de algas para la preparación de agua a tratar por el método de balance de materia de clorofila-a

Tipo de agua	Volumen	L	Concentración de clorofila-a	µg/L
Agua cruda	V_1	?	$A.C_1$	5.74
Concentrado de algas	V_2	?	A_4	1,384
Agua a tratar	V_3	20	C_3	80

Ecuación de balance de materia:

$$C_1 V_1 + C_2 V_2 = C_3 V_3$$

ECUACIÓN II. 1

$$V_1 + V_2 = V_3$$

ECUACIÓN II. 2

Al despejar algún volumen de la Ecuación II. 2 por ejemplo V_1 y sustituyéndolo en la Ecuación II. 1 se tiene lo siguiente:

$$V_1 = V_3 + V_2$$

$$C_1 V_3 - V_2 + C_2 V_2 = C_3 V_3$$

Re-ordenando y factorizando los volúmenes V_2 y V_3 se tiene que:

$$C_1 V_3 + C_1 V_2 + C_2 V_2 = C_3 V_3$$

$$C_2 V_2 - C_1 V_2 = C_3 V_3 - C_1 V_3$$

$$V_2(C_2 - C_1) = V_3(C_3 - C_1)$$

$$V_2 = \frac{V_3(C_3 - C_1)}{(C_2 - C_1)}$$

ECUACIÓN II. 3

De esta forma sencilla se estima V_2 y V_1 se obtiene por la diferencia de V_3 y V_2 y así se puede preparar cada uno de los niveles de clorofila-a.

Anexo III

Diseño de experimentos.

Existen diversos métodos para analizar las interacciones que se establecen entre un factor de respuesta (y) y las variables o factores controlables (x). Para el análisis del comportamiento de una respuesta se sugiere investigar los factores que modifican de manera significativa el comportamiento de “ y ” variando de forma ordenada “ x ”. El método tradicional sugiere la observación de diversos puntos en la matriz experimental, el método central compuesto sugiere la observación de solo algunos puntos cruciales, los cuales al reducir el dominio experimental minimizan los tiempos de experimentación y análisis.

Los diseños experimentales de tipo factorial permiten estimar los efectos en un factor de respuesta (variable dependiente), para cada uno de los factores involucrados (las variables independientes) y para las interacciones de dos ó más factores. Tienen la ventaja de poder obtener información importante, con pocas observaciones o pruebas, debido a que los datos obtenidos permiten desarrollar modelos de regresión que consisten en una ecuación polinomial cuyo orden depende de la cantidad de factores y niveles involucrados en un experimento.

El método superficie-respuesta es un procedimiento secuencial, usualmente, cuando un punto se encuentra en un lugar remoto del óptimo hay una pequeña curvatura. El objetivo de la superficie-respuesta es guiar a dicho punto rápida y eficientemente por medio de una función, hasta llegar lo más cercano posible al punto óptimo y determinar una región donde se satisfacen requerimientos de operación de un proceso (Montgomery, 2005).

Los modelos estadísticos también pueden servir para determinar si un factor tiene influencia significativa en un fenómeno, permitiría definir si un cambio de los niveles o valores de un factor (dentro del intervalo en el cual se trabajó) influye significativamente sobre el valor de una respuesta esperada.

El diseño de experimentos factorial de tipo central compuesto permite obtener información del fenómeno al hacer variar de forma simultánea y secuencial las variables controlables o factores (x). Las variables a estudiar o factores de respuesta (y) son estimadas a partir de regresiones del tipo “Superficie de Respuesta”, es decir, modelos matemáticos polinomiales que toman en cuenta los factores y las interacciones entre éstos de manera tal que describen el comportamiento dentro del intervalo estudiado, así de esta forma se pueden optimizar las variables de respuesta.

La forma general del modelo matemático es como se observa en la Ecuación III.1

$$\begin{aligned}
 Y &= f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \\
 &= \beta_0 + \beta_1 * X_1 + \beta_2 * X_2 + \dots + \beta_n * X_n + \beta_{11} * X_1^n + \beta_{11} * X_1^n + \dots \\
 &\quad + \beta_{nn} * X_n^2 + \beta_{12} * X_1 * X_2 + \beta_{n-1n} * X_{n-1} * X_n
 \end{aligned}$$

ECUACIÓN III. 1

Con el fin de facilitar la solución de la matriz resultante de los datos obtenidos, los valores que toman los factores son codificados. La representación esquematizada de los valores codificados se ilustra en la Figura 3.1. En esta figura los valores de los intervalos extremos o aristas del cubo se codifican como +1 y -1, los valores promedio de este intervalo o valores centrales se codifican como cero y los valores (α), situados fuera del volumen del cubo, se codifican como puntos +1.3531 y -1.3531.

En función de las combinaciones de los anteriores valores codificados de las variables seleccionadas se pueden obtener modelos matemáticos o superficies de respuesta de diferente grado de complejidad (variables a la potencia uno y al cuadrado) que corresponden a la regresión multi-variable.

Los datos experimentales se analizan con el paquete estadístico DESIGN EXPERT 8.0 el cual determina los coeficientes (valores de β_n) para el modelo de superficie de respuesta, por medio del método de ANOVA (análisis de varianzas). Este programa determina los modelos que se aproximan de mejor manera a los valores experimentales. Este método de diseño de experimentos permite identificar los puntos que son más críticos y que pueden predecir el comportamiento de la variable o factor de respuesta, lo que puede traer consigo una reducción de pruebas y del tiempo de análisis. Sin embargo, mientras más puntos experimentales se tengan, como en el caso de un método factorial de tipo central compuesto, mayor complejidad del modelo y de precisión para la estimación de los resultados.

Debido a lo anterior, se seleccionó un diseño factorial de tipo central compuesto para realizar las pruebas de coagulación-floculación con agua de presa. Para este diseño de experimentos se seleccionaron tres variables: turbiedad inicial y dosis de coagulante y floculante, para combinación de estos reactivos.

FIGURA III. 1 Hoja de registro de datos en las pruebas de coagulación-floculación realizadas en laboratorio.

Sedimentación																					
Preoxidante-Coagulante					PreOX-C		corrida	Fecha													
		Codificado			Real			Dosis		Respuestas											
Prueba	Jarra	Clorofila-a	Oxidante	Coagulante	Clorofila-a	Oxidante	Coagulante	Oxidante	Coagulante	Color residual (rC)		Turbiedad residual (rT)		pHf	Producción de lodos (P-lodos)	Aluminio residual (rAl)	Pre-oxidante residual (rCl)	Clorofila-a residual (rClor-a)			
					µg/L	mg/L	mg/L	mL stock	mL de stock	U Pt-Co	promedio	rT (UNT)	promedio						---	mg/L	mg/L
1	1																				
2	2																				
3	3																				
4	4																				
5	5																				
6	6																				
1'	1'																				
2'	2'																				
3'	3'																				
4'	4'																				
5'	7																				
6'	6'																				
Lodo																					
No.	Filtro	Filtro +Sólidos Secos	Sólidos		No.	Filtro	Filtro	Sólidos													
1					1'																
2					2'																
3					3'																
4					4'																
5					5'																
6					6'																
R1					R2																

Anexo IV

TECNICAS ANALITICAS

Medición de Sólidos de Lodo Totales.

La determinación de Sólidos totales (ST) se realizó basada en la NMX-AA-034-SCFI-2001. El método realizado fue el siguiente:

- Se toma un volumen de filtración de 50 mL, se filtra al vacío con papel filtro de 0.45 micras.
- Se realiza un secado a los filtros a 100° C por dos horas en estufa.
- Se realiza el pesado de filtros en una balanza analítica y se anota en la bitácora.

Preparación de filtros a peso constante:

- Se rotulan las charolas de aluminio.
- Se colocan los filtros en las charolas y se introducen en una mufla a 550 °C de 15 – 20 minutos, después del tiempo transcurrido se colocan en desecación a 120°C en una estufa.

Después del tiempo transcurrido se colocan en un desecador para su enfriamiento y por último se pesan en una balanza analítica.

Medición de turbiedad

La medición de turbiedad (NTU) se realiza con un turbidímetro Tubiquant 1000 IR Merck TM. El método realizado fue el siguiente:

- Se enciende el Turbidímetro y se calibra. Para calibrar se presiona la tecla “Cal”, N=1, y se coloca la celda de calibración, se espera a que se estabilice la lectura. Se repite el procedimiento hasta llegar a N=4 y se presiona la tecla Enter. El equipo está calibrado.
- Para realizar la medición, se llena la celda de medición con la muestra de agua (10mL).
- La celda se limpia y se inserta dentro del equipo de medición; la marca en la tapa debe coincidir con la marca en el equipo, esto es necesario.
- Se presiona Enter, y se tiene que esperar para que se estabilice la lectura. Se anota el valor leído en la bitácora.

Medición de color

La medición de color en unidades PtCo se realiza en un espectrofotómetro HACH^R modelo DR/5000. El método realizado fue el siguiente:

- Se enciende el espectrofotómetro seleccionando el programa pre-almacenado, en este caso el No. 120 para la medición de color en U Pt-Co,
- Se realiza la medición del blanco con agua destilada con N=0, y se espera a que se estabilice la lectura hasta llegar a N=2, presionar Enter. El equipo está calibrado.
- Para realizar la medición se llena la celda con 10 mL de la muestra de agua.
- La celda se limpia y se inserta dentro del equipo de medición y se cierra con la tapa del equipo. Se presiona la tecla medir y se espera a que la lectura de medición se estabilice y se anota en la bitácora.

Medición de Aluminio

En solución débilmente ácida amortiguada con acetato, los iones aluminio forman con cromazurol S un compuesto violeta azulado que se determina fotométricamente, para ello se realizan los siguientes pasos:

- Se toma una muestra de 5 mL en un tubo de ensaye, el valor del pH debe encontrarse en el intervalo de 3 – 10 (si es necesario, ajustar con solución de hidróxido sódico o con ácido sulfúrico).

- Se agrega una micro-cuchara del reactivo Al-1 y se agita vigorosamente hasta que el reactivo se haya disuelto completamente.
- Posteriormente se añade 1.2 mL del reactivo Al-2 y se mezcla.
- Finalmente se añaden 0.25 mL del reactivo Al-3 y se mezcla

Se deja en reposo durante 2 minutos (tiempo de reacción), se introduce la muestra de medición en la cubeta y se realiza la medición en el fotómetro.

Preparación de la muestra de clorofila-a

- Homogeneizar la muestra de agua mediante agitación manual. En el caso del agua cruda se requiere un volumen de 100 mL y en el caso del agua tratada el volumen requerido es de 200 mL.
- Instalar el dispositivo de filtración con conexión a vacío, utilizando filtros Whatman GF/F de 55 mm.
- Filtrar el volumen respectivo de cada muestra.
- Colocar el filtro dentro de un tubo de ensaye (tubo de centrifuga), este último envuelto previamente con papel aluminio.
- Agregar al tubo con el filtro dentro, 10 mL de una solución de acetona al 90% v/v hasta cubrir completamente el filtro.
- Guardar el tubo con muestra por un lapso de 8 – 12 horas en oscuridad a 4 °C.
- Transcurrido el tiempo de maceración, triturar el filtro lo mejor posible con una varilla de vidrio y añadir 10 ml de acetona al 90%.
- Filtrar el contenido del tubo de ensaye para disminuir la turbidez de la muestra, utilizando una jeringa de 60 mL, un portafiltro swinnex y un filtro Whatman GF/F de 25 mm.

Cuantificación de clorofila-a

A cada muestra se le mide la absorbancia (Abs) a 665, 645, 630 y 750nm Mediante el espectrofotómetro HACH™ DR/2010 y se mide el volumen del extracto filtrado.

La concentración de la clorofila-a se determina mediante la Ecuación IV. 1

$$C_a = \frac{[1.6(Abs_{665} - Abs_{750}) - 1.31(Abs_{645} - Abs_{750}) - 0.14(Abs_{630} - Abs_{750})] \bar{V}_e}{V_f L} * 1000 \quad \text{?}$$

ECUACIÓN IV. 1 Ecuación para la determinación de clorofila-a

Dónde:

- C_a = concentración de clorofila-a (mg/L)
- Abs_x = absorbancia a x nm.
- V_e : volumen del extracto o sobrenadante (L)
- V_f : volumen filtrado (L)
- L : longitud de la celda (cm)

Medición de Cloro residual Libre

La medición del cloro libre residual se realiza mediante el método DPD 10069 de HACH utilizando un espectrofotómetro HACH^R modelo DR/5000 y el reactivo para cloro libre DPD HACH^R cat. 14070-99. El método realizado fue el siguiente:

- Se desliza la tapa donde se coloca la celda y se coloca el adaptador para la celda de Cl₂ residual, desatornillando el adaptador y colocándolo de manera correcta.
- Se enciende el espectrofotómetro selecciona el programa pre-almacenado en este caso para la medición de cloro libre, en un rango de 0.1-10.0 mg/L. La longitud de onda de 530 nm se selecciona automáticamente.
- Se llena la celda de plástico con la muestra de agua problema hasta la marca de 5 ml y se tapa.
- La celda se limpia y se inserta dentro del aparato de medición. Se presiona la tecla “cero” y en la pantalla aparece 0.0 mg/L Cl₂.
- Se remueve la celda del aparato, se quita la tapa y se vacía el contenido de un sobre de reactivo DPD para cloro libre. Se tapa la celda y se agita por 20 segundos para disolver el contenido. Un color rosa aparece cuando hay presencia de cloro.
- Inmediatamente después se pone la celda dentro del aparato de medición, se cierra el compartimiento, se oprime la tecla de “medición” y se lee la concentración en la pantalla en mg/L de cloro (en la forma de Cl₂).

Medición de pH

La medición de pH se realiza en un medidor multi-parámetros. El método realizado fue el siguiente:

- Se conecta en el medidor multi-parámetros el electrodo de medición de pH.
- Se enciende el equipo. Para realizar la medición se enjuaga el electrodo con agua destilada y se sumerge el electrodo en la muestra, se presiona la tecla “measure/print” y se espera a que se estabilice la lectura. Se anota el valor indicado en la bitácora.

ANEXO V

Resultados experimentales

TABLA V. 1 Resultados de las pruebas de pre-oxidación-coagulación-floculación-sedimentación POx-CF-S, combinación: Hipoclorito de sodio-sulfato de aluminio STD-PA2-sedimentación.

Hipoclorito de sodio-Sulfato de aluminio STD-PA2-Sedimentación											
Prueba	Clorofila-a	Oxidante	Coagulante	Color	Turbiedad	pH	Sólidos de Lodo	Clorofila-a residual	Aluminio residual	Hierro residual	Oxidante residual
				U Pt-Co	UNT	---	mg/L	µg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	-1.35313	0	0	7.0	3.50	5.19	49.1	0.00	1.5	0.2	1.6
2	-1	-1	-1	3.5	2.98	5.84	61.1	0.00	1.1	0.19	0.2
3	-1	-1	1	10.5	6.24	4.08	71.5	0.00	1.6	0.32	0.3
4	-1	1	-1	1.0	3.18	6.02	44.4	0.00	1.1	0.17	2.5
5	-1	1	1	29.0	6.78	4.15	75.4	0.00	5.3	0.33	2.5
6	0	-1.35313	0	7.5	2.95	5.12	80.8	0.00	1.2	0.19	0.3
7	0	0	-1.35313	0.0	3.53	6.04	43.2	0.00	1.4	0.21	1.3
8	0	0	0	4.5	4.29	5.09	74.5	0.00	11.7	0.21	1.1
9	0	0	0	8.5	3.32	5.24	77.1	0.00	1.8	0.19	1.2
10	0	0	0	1.0	4.10	5.61	68.6	0.00	1.9	0.22	1.5
11	0	0	1.35313	12.5	7.15	4.16	83.8	0.00	7.1	0.33	1.6
12	0	1.35313	0	1.0	4.07	5.09	77.4	0.00	1.3	0.2	2.8
13	1	-1	-1	9.0	4.03	5.94	41.9	0.00	1.4	0.2	0.1
14	1	-1	1	32.5	7.57	4.24	98.4	0.00	5.3	0.33	0.5
15	1	1	-1	0.0	2.65	5.89	74.1	0.96	1.6	0.18	2.4
16	1	1	1	21.5	7.01	4.34	100.2	0.00	4.9	0.28	1.7
17	1.35313	0	0	0.5	4.45	5.88	70.6	0.00	1.1	0.21	1.6

TABLA V. 2 Resultados de las pruebas de pre-oxidación-coagulación-floculación-sedimentación POx-CF-S, combinación: Hipoclorito de sodio-sulfato de aluminio STD-PA2-sedimentación (duplicado).

Hipoclorito de sodio-Sulfato estándar-PA2-Sedimentación, duplicado											
Prueba	Clorofila-a	Oxidante	Coagulante	Color	Turbiedad	pH	Sólidos de Lodo	Clorofila-a residual	Aluminio residual	Hierro residual	Oxidante residual
				U PtC o	UNT	---	mg/L	µg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	-1.35313	0	0	8.5	3.75	5.30	53.4	0.00	1.4	0.21	1.7
2	-1	-1	-1	9.5	3.28	5.85	40.8	0.00	1.7	0.18	0.3
3	-1	-1	1	27.0	7.65	4.20	71.4	0.00	2.4	0.35	0.1
4	-1	1	-1	0.0	3.71	6.05	46.1	0.00	1.1	0.18	2.6
5	-1	1	1	25.0	7.02	4.25	76.4	0.00	6.1	0.32	2.7
6	0	-1.35313	0	9.0	4.62	5.14	78.5	0.00	1.4	0.18	0.2
7	0	0	-1.35313	0.0	3.34	6.20	46.1	0.00	0.8	0.18	1.1
8	0	0	0	13.0	5.29	5.17	77.2	0.00	1.6	0.21	1.2
9	0	0	0	7.0	3.84	5.24	79.0	0.00	1.4	0.19	1.3
10	0	0	0	6.0	5.33	5.58	73.0	0.99	2.5	0.24	1.1
11	0	0	1.35313	13.5	7.47	4.21	86.3	0.00	6.9	0.33	1.4
12	0	1.35313	0	10.5	3.89	5.14	77.0	0.91	1.6	0.21	3.0
13	1	-1	-1	16.0	2.94	6.06	63.8	0.00	1.4	0.18	0.2
14	1	-1	1	29.5	8.32	4.42	96.4	0.00	6.5	0.32	0.2
15	1	1	-1	0.0	3.13	5.90	68.2	0.00	1.4	0.18	2.4
16	1	1	1	29.5	7.46	4.63	99.8	0.00	4.5	0.30	1.7
17	1.35313	0	0	2.5	4.36	5.28	78.3	0.00	1.3	0.21	1.9

TABLA V. 3 Resultados de las pruebas de pre-oxidación-coagulación-floculación-sedimentación POx-CF-S, combinación: Hipoclorito de sodio-PDADMAC-PA1-sedimentación.

Hipoclorito de sodio-pDADMAC-PA1-sedimentación									
Prueba	Clorofila-a	Oxidante	Coagulante	Color	Turbiedad	pH	Sólidos de Lodo	Clorofila-a residual	Oxidante residual
				<i>U PtCo</i>	<i>UNT</i>	<i>---</i>	<i>mg/L</i>	<i>µg/L</i>	<i>mg/L</i>
1	-1.35313	0	0	0.0	0.48	7.05	15.6	0.08	0.4
2	-1	-1	-1	5.0	0.01	7.24	13.2	0.07	0.3
3	-1	-1	1	0.0	0.01	6.96	21.4	0.00	0.2
4	-1	1	-1	5.5	0.35	7.31	15.5	0.00	0.8
5	-1	1	1	7.0	0.24	7.28	15.0	0.00	2.8
6	0	-1.35313	0	1.5	0.66	7.06	22.1	0.10	0.1
7	0	0	-1.35313	40.0	8.16	7.10	29.0	0.06	0.3
8	0	0	0	5.0	4.23	7.05	23.1	0.10	0.7
9	0	0	0	0.0	2.83	7.13	20.5	0.10	0.9
10	0	0	0	7.5	1.22	7.10	22.0	0.06	0.2
11	0	0	1.35313	8.5	1.31	7.07	18.8	0.00	0.2
12	0	1.35313	0	0.5	0.93	7.14	22.3	0.06	2.7
13	1	-1	-1	13.0	1.83	7.26	26.0	0.41	0.2
14	1	-1	1	13.0	1.59	7.11	29.2	0.37	0.2
15	1	1	-1	15.5	2.47	7.10	34.2	0.06	0.4
16	1	1	1	11.5	1.24	7.29	31.9	0.00	2.0
17	1.35313	0	0	7.0	1.44	7.16	27.8	0.00	0.2

TABLA V. 4 Resultados de las pruebas de pre-oxidación-coagulación-floculación-sedimentación POx-CF-S, combinación: Hipoclorito de sodio-PDADMAC-PA1-sedimentación (Duplicado).

Hipoclorito de sodio-pDADMAC-PA1-Sedimentación, duplicado									
Prueba	Clorofila-a	Oxidante	Coagulante	Color	Turbiedad	pH	Sólidos de Lodo	Clorofila-a	Oxidante residual
				U PtCo	UNT	---	mg/L	µg/L	mg/L
1	-1.35313	0	0	1.0	0.10	7.17	61.7	0.00	0.3
2	-1	-1	-1	25.5	2.07	7.28	10.9	0.17	0.1
3	-1	-1	1	0.0	0.09	7.12	21.2	0.04	0.1
4	-1	1	-1	5.0	0.17	7.28	15.6	0.04	0.6
5	-1	1	1	46.5	1.09	7.24	15.1	0.00	2.3
6	0	-1.35313	0	1.5	0.78	7.14	22.0	0.17	0.1
7	0	0	-1.35313	26.5	3.66	7.29	22.8	0.06	0.2
8	0	0	0	9.0	1.78	7.15	23.2	0.06	0.8
9	0	0	0	9.0	0.73	7.19	23.4	0.11	1.0
10	0	0	0	9.0	0.26	7.27	20.1	0.04	0.3
11	0	0	1.35313	19.0	0.23	7.27	22.0	0.00	0.2
12	0	1.35313	0	0.0	1.63	7.28	23.1	0.00	2.4
13	1	-1	-1	47.5	12.74	7.30	23.6	0.92	0.1
14	1	-1	1	46.5	2.57	7.09	26.7	0.25	0.2
15	1	1	-1	3.0	0.04	7.29	40.2	0.03	0.4
16	1	1	1	17.5	1.73	7.31	33.3	0.08	1.8
17	1.35313	0	0	8.5	0.81	7.35	40.1	0.00	0.2

Análisis estadístico

Reportes ANOVA de los resultados experimentales

Combinación: Hipoclorito de sodio- pDADMAC-PA1

Para las gráficas siguientes los puntos color rojo significan que se encuentran por encima del valor teórico, mientras que los puntos de color rosa se encuentran por debajo del valor teórico.

TABLA V. 5 Análisis estadístico y de varianza de contenido de color residual para la combinación Hipoclorito de Sodio- pDADMAC.

Hipoclorito de sodio – pDADMAC – PA1 (Sedimentación)					
Coeficiente	Color				
	Suma de cuadrados	G.L	Media de cuadrados	Valor F	Valor P
Modelo	3.321.603.353	9	369.07	2.791	0.0215
A - Clorofila inicial	367.80	1	367.80	2.782	0.1084
B - Oxidante	77.02	1	77.02	0.582	0.4528
C - Coagulante	40.60	1	40.60	0.307	0.5846
AB	702.25	1	702.25	5.311	0.0302
AC	0.56	1	0.56	0.004	0.9485
BC	451.56	1	451.56	3.415	0.0770
A2	3.84	1	3.84	0.029	0.8660
B2	20.60	1	20.60	0.156	0.6965
C2	1657.36	1	1657.36	12.534	0.0017
Residual	3173.49	24	132.23		
Falta de ajuste	718.53	5	143.71	1.112	0.3869
Error total	2454.96	19	129.21		
Cor Total	6495.10	33			

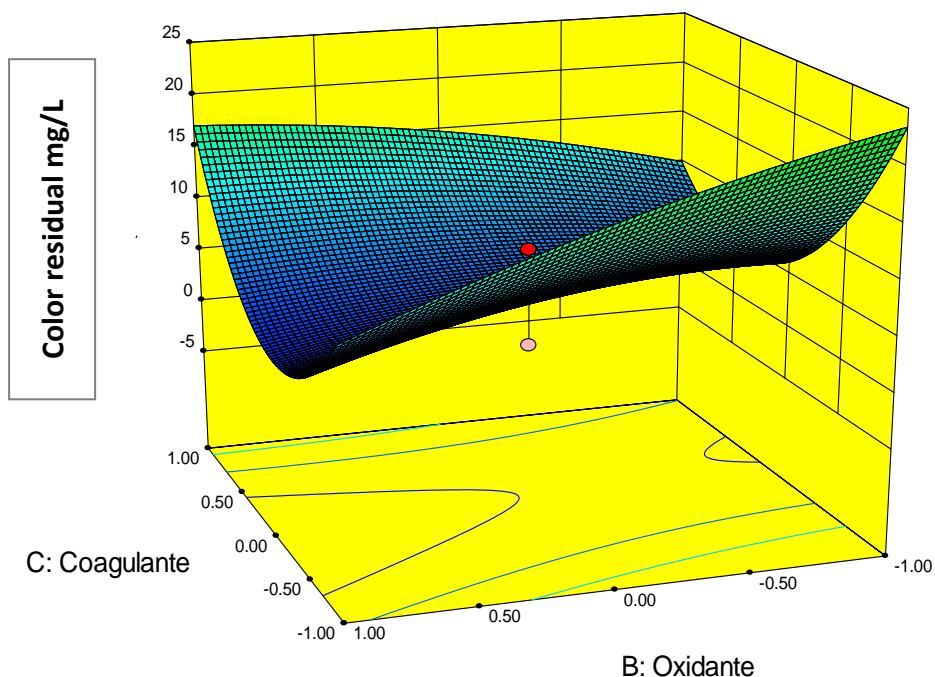


FIGURA V. 1 Superficie de respuesta estimada Factor A: Clorofila inicial=0.00 del contenido residual de Color.

TABLA V. 6 Análisis estadístico y de varianza de contenido turbiedad residual para la combinación Hipoclorito de Sodio-PDADMAC.

Hipoclorito de sodio – pDADMAC – PA1 (Sedimentación)					
Coeficiente	Turbiedad				
	Suma de cuadrados	G.L	Media de cuadrados	Valor F	Valor P
Modelo	982.798.988	9	10.92	2.398	0.0422
A - Clorofila inicial	21.56	1	21.56	4.733	0.0397
B - Oxidante	6.25	1	6.25	1.373	0.2528
C - Coagulante	26.88	1	26.88	5.902	0.0230
AB	10.43	1	10.43	2.291	0.1432
AC	4.81	1	4.81	1.055	0.3145
BC	11.66	1	11.66	2.561	0.1226
A ²	4.06	1	4.06	0.891	0.3545
B ²	2.04	1	2.04	0.449	0.5092
C ²	10.58	1	10.58	2.323	0.1406
Residual	109.31	24	4.55		
Falta de ajuste	21.66	5	4.33	0.939	0.4783
Error total	87.65	19	4.61		
Cor Total	207.59	33			

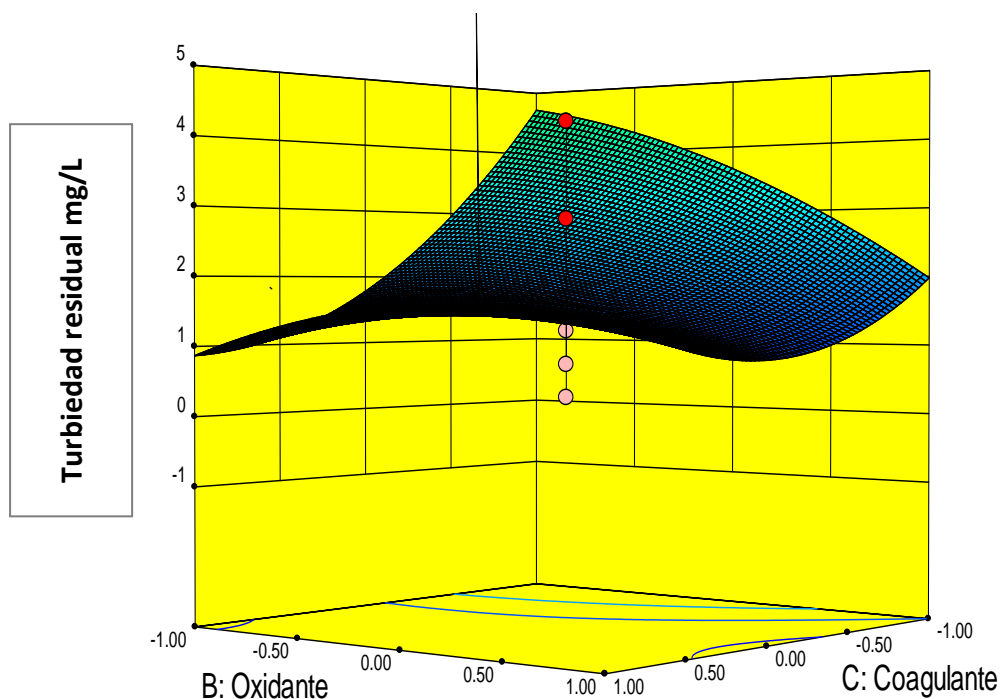


FIGURA V. 2 Superficie de respuesta estimada Factor A: Clorofila inicial=0.00 del contenido residual de Turbiedad.

TABLA V. 7 Análisis estadístico y de varianza de contenido solido de lodos para la combinación Hipoclorito de Sodio-PDADMAC.

Hipoclorito de sodio – pDADMAC – PA1 (Sedimentación)					
Coeficiente	Producción de lodo				
	Suma de cuadrados	G.L	Media de cuadrados	Valor F	Valor P
Modelo	119.860.578	9	133.18	1.756	0.1305
A - Clorofila inicial	468.03	1	468.03	6.170	0.0204
B - Oxidante	39.52	1	39.52	0.521	0.4774
C - Coagulante	0.00	1	0.00	0	0.9947
AB	98.01	1	98.01	1.292	0.2669
AC	26.01	1	26.01	0.343	0.5636
BC	765.625	1	765.625	100.928.847	0.3251
A ²	341.75	1	341.75	4.505	0.0443
B ²	876.765.941	1	876.765.941	115.580.049	0.293
C ²	610.520.462	1	610.520.462	0.80482124	0.3786
Residual	182.058.952	24	758.578.965	0	0
Falta de ajuste	619.559.516	5	123.911.903	196.025.592	0.1313
Error total	1201.03	19	632.121.053	0	0
Cor Total	3019.20	33	0	0	0

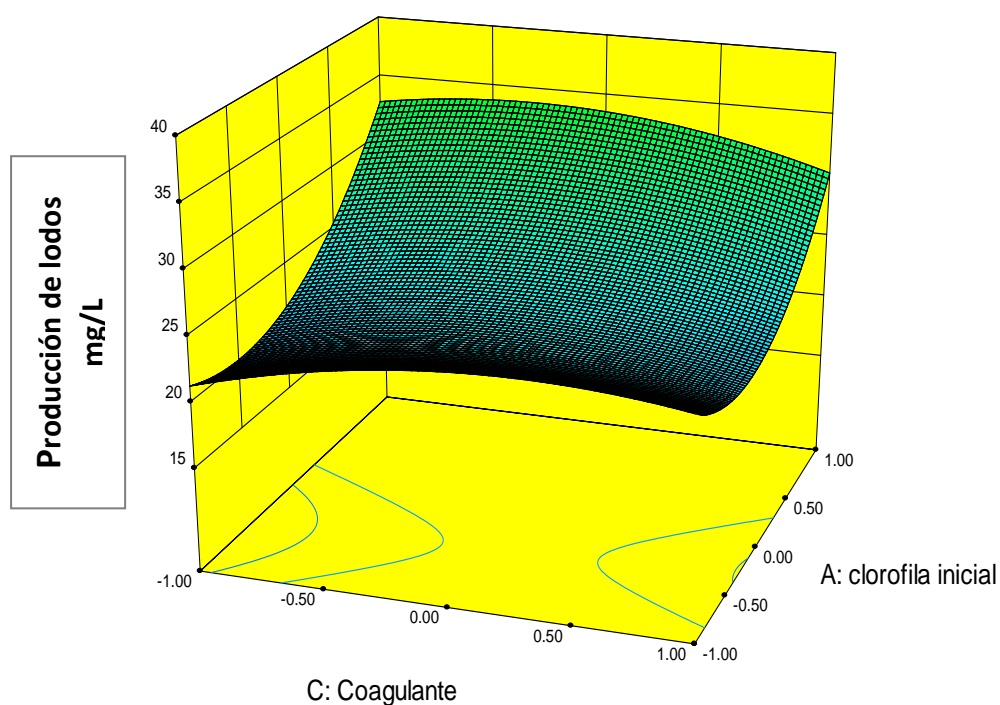


FIGURA V. 3 Superficie de respuesta estimada Factor A: Clorofila inicial=0.00 del contenido de producción de lodo.

TABLA V. 8 Análisis estadístico y de varianza de contenido oxidante residual para la combinación Hipoclorito de Sodio-PDADMAC.

Hipoclorito de sodio – pDADMAC – PA1 (Sedimentación)					
Coeficiente	Suma de cuadrados	G.L	Oxidante residual		
			Media de cuadrados	Valor F	Valor P
Modelo	197.517.583	9	2.19	22.150	< 0.0001
A - Clorofila inicial	0.23	1	0.23	2.301	0.1424
B - Oxidante	11.43	1	11.43	115.398	< 0.0001
C - Coagulante	1.85	1	1.85	18.648	0.0002
AB	0.23	1	0.23	2.277	0.1443
AC	0.02	1	0.02	0.158	0.6948
BC	2.805.625	1	2.805.625	283.164.361	< 0.0001
A ²	0.23	1	0.23	2.289	0.1433
B ²	26.365.225	1	26.365.225	26.609.729	< 0.0001
C ²	0.33207419	1	0.33207419	335.153.761	0.0796
Residual	237.794.756	24	0.09908115	0	0
Falta de ajuste	159.294.756	5	0.31858951	771.108.371	0.0004
Error total	0.785	19	0.04131579	0	0
Cor Total	22.13	33	0	0	0

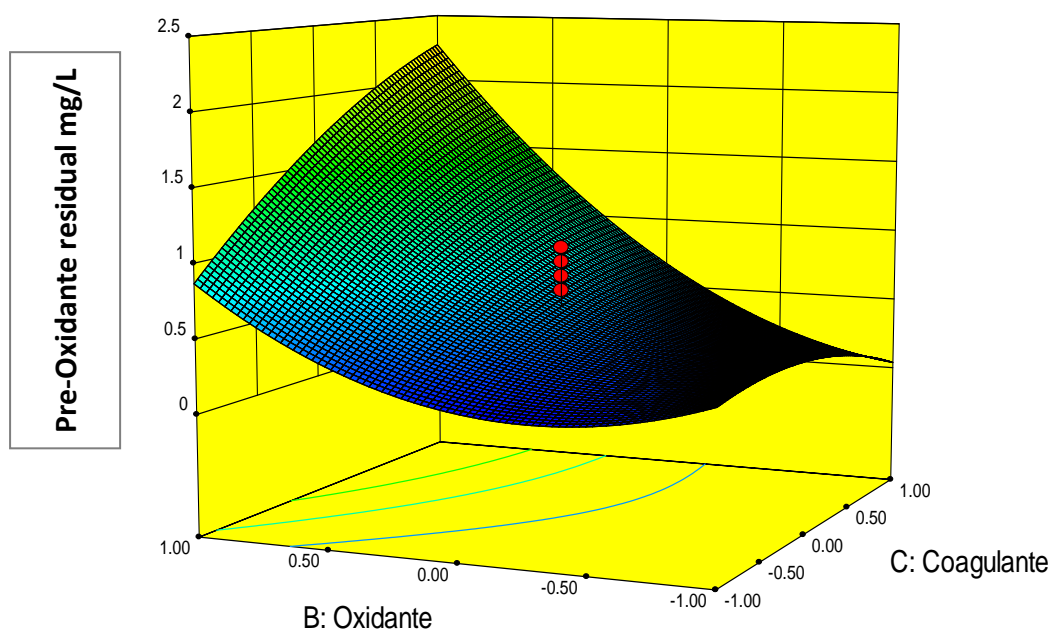


FIGURA V. 4 Superficie de respuesta estimada Factor A: Clorofila inicial=0.00 del contenido residual de Oxidante.

TABLA V. 9 Análisis estadístico y de varianza de contenido residual de clorofila-a para la combinación Hipoclorito de Sodio-PDADMAC.

Hipoclorito de sodio – pDADMAC – PA1 (Sedimentación)					
Coeficiente	Clorofila residual				
	Suma de cuadrados	G.L	Media de cuadrados	Valor F	Valor P
Modelo	0.62	6	0.10	7.118	0.0001
A - Clorofila inicial	0.12	1	0.12	8.490	0.0071
B - Oxidante	0.23	1	0.23	15.914	0.0005
C - Coagulante	0.06	1	0.06	3.801	0.0617
AB	0.15	1	0.15	10.237	0.0035
AC	0.02	1	0.02	1.049	0.3148
BC	0.05	1	0.05	3.219	0.084
A2	0	0	0	0	0
B2	0	0	0	0	0
C2	0	0	0	0	0
Residual	0.39	27	0.01	0	0
Falta de ajuste	0.24	8	0.03	3.560	0.011
Error total	0.16	19	0.01	0	0
Cor Total	1.02	33	0	0	0

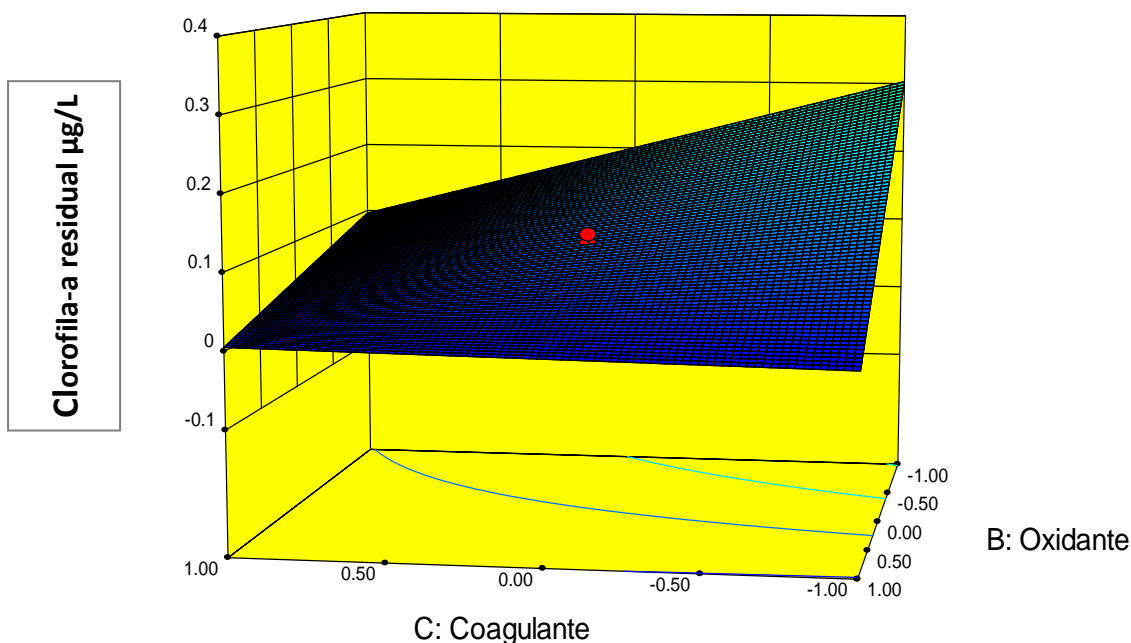


FIGURA V. 5 Superficie de respuesta estimada Factor A: Clorofila inicial=0.00 del contenido residual de clorofila-a.

TABLA V. 10 Análisis estadístico y de varianza de contenido de pH final para la combinación Hipoclorito de Sodio-PDADMAC.

Hipoclorito de sodio – pDADMAC – PA1 (Sedimentación)					
Coeficiente	PH final				
	Suma de cuadrados	G.L	Media de cuadrados	Valor F	Valor P
Modelo	0.16	8	0.020	2.86	0.0209
A - Clorofila inicial	8.017E-0.003	1	8.017E-0.003	1.16	0.2925
B - Oxidante	0.046	1	0.046	6.66	0.161
C - Coagulante	0.023	1	0.023	3.27	0.0824
AB	4.9E-0.003	1	4.9E-0.003	0.71	0.4085
AC	8.10E-0.003	1	8.1 E-0.003	1.17	0.2901
BC	0.055	1	0.055	7.96	0.0092
B2	2.52E-0.003	1	2.532 E-0.003	0.37	0.5512
C2	0.011	1	0.011	1.60	0.2176
Residual	0.17	25	6.93 E-0.003		
Falta de ajuste	0.034	6	5.676 E-0.003	0.77	0.5998
Error total	0.14	19	7.331 E-0.003		
Cor Total	0.33	33			

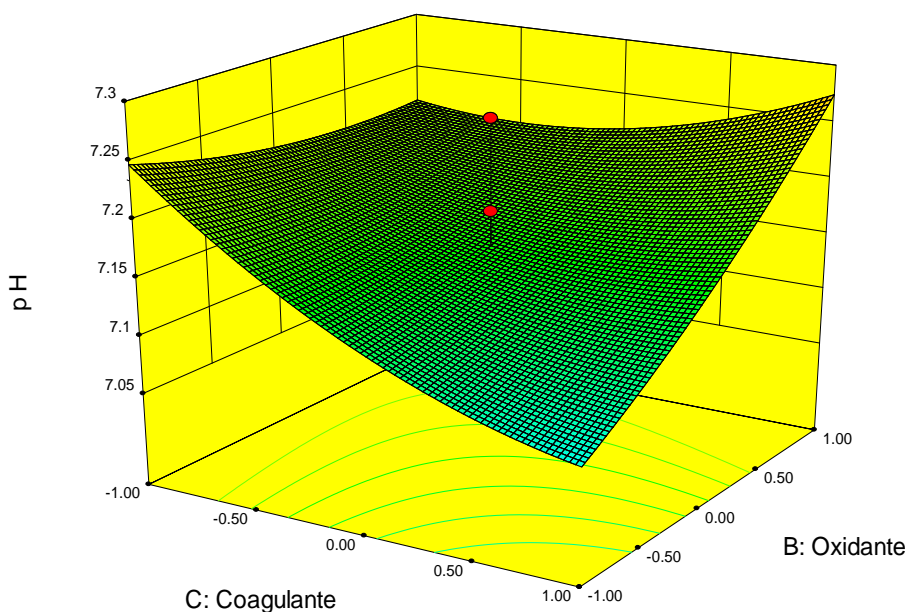


FIGURA V. 6 Superficie de respuesta estimada Factor A: Clorofila inicial=0.00 del contenido de pH final.

Combinación: Hipoclorito de sodio – SA STD –PA2

TABLA V. 11 Análisis estadístico y de varianza de contenido color residual para la combinación Hipoclorito de Sodio- SA STD.

Hipoclorito de sodio – SA STD – PA2 (Sedimentación)					
Coeficiente	Color				
	Suma de cuadrados	G.L	Media de cuadrados	Valor F	Valor P
Modelo	2.451.827.735	8	306.48	8.632	< 0.0001
A - Clorofila inicial	10.42	1	10.42	0.293	0.5929
B - Oxidante	62.78	1	62.78	1.768	0.1956
C - Coagulante	1726.69	1	1726.69	48.631	< 0.0001
AB	102.52	1	102.52	2.887	0.1017
AC	0	0	0	0	0
BC	112.89	1	112.89	3.180	0.0867
A2	81.99	1	81.99	2.309	0.1411
B2	190.58	1	190.58	5.368	0.0290
C2	163.97	1	163.97	4.618	0.0415
Residual	887.64	25	35.51	0	0
Falta de ajuste	533.31	6	88.88	4.766	0.0040
Error total	354.33	19	18.65	0	0
Cor Total	3339.47	33	0	0	0

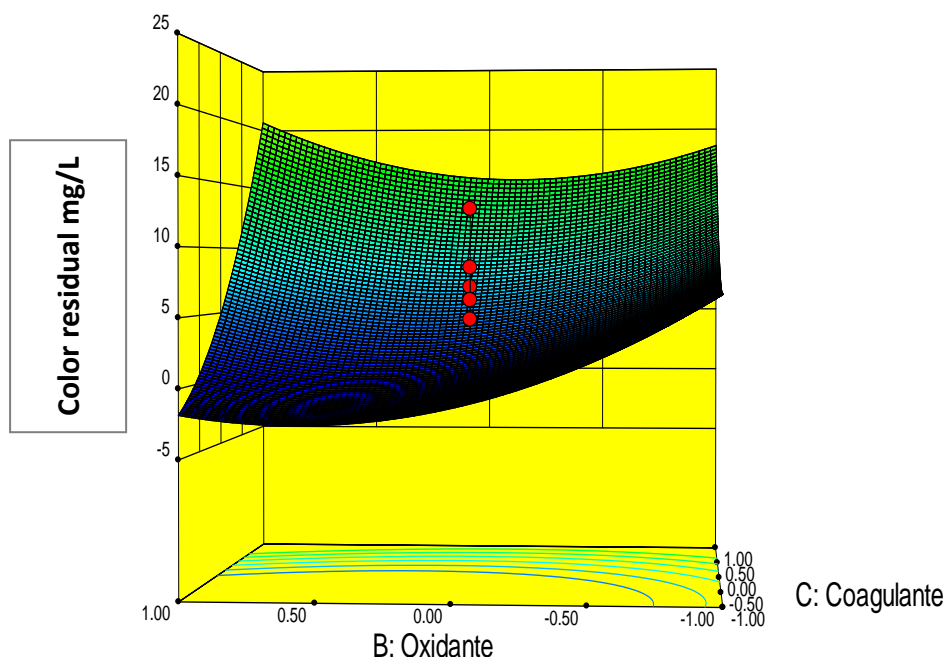


FIGURA V. 7 Superficie de respuesta estimada Factor A: Clorofila inicial=0.00 del contenido residual de Color.

TABLA V. 12 Análisis estadístico y de varianza de contenido turbiedad residual para la combinación Hipoclorito de Sodio- SA STD.

Hipoclorito de sodio – SA STD – PA2 (Sedimentación)					
Turbiedad					
Coefficiente	Suma de cuadrados	G.L	Media de cuadrados	Valor F	Valor P
Modelo	89.767.488	7	12.82	30.748	< 0.0001
A - Clorofila inicial	0.82	1	0.82	1.967	0.1726
B - Oxidante	0.10	1	0.10	0.245	0.6251
C - Coagulante	77.92	1	77.92	186.823	< 0.0001
AB	0.62	1	0.62	1.487	0.2336
AC	0.58	1	0.58	1.394	0.2484
BC	0	0	0	0	0
A ²	0.14	1	0.14	0.347	0.5608
B ²	0	0	0	0	0
C ²	9.58	1	9.58	22.975	< 0.0001
Residual	10.84	26	0.42	0	0
Falta de ajuste	3.79	7	0.54	1.460	0.2401
Error total	7.05	19	0.37	0	0
Cor Total	100.61	33	0	0	0

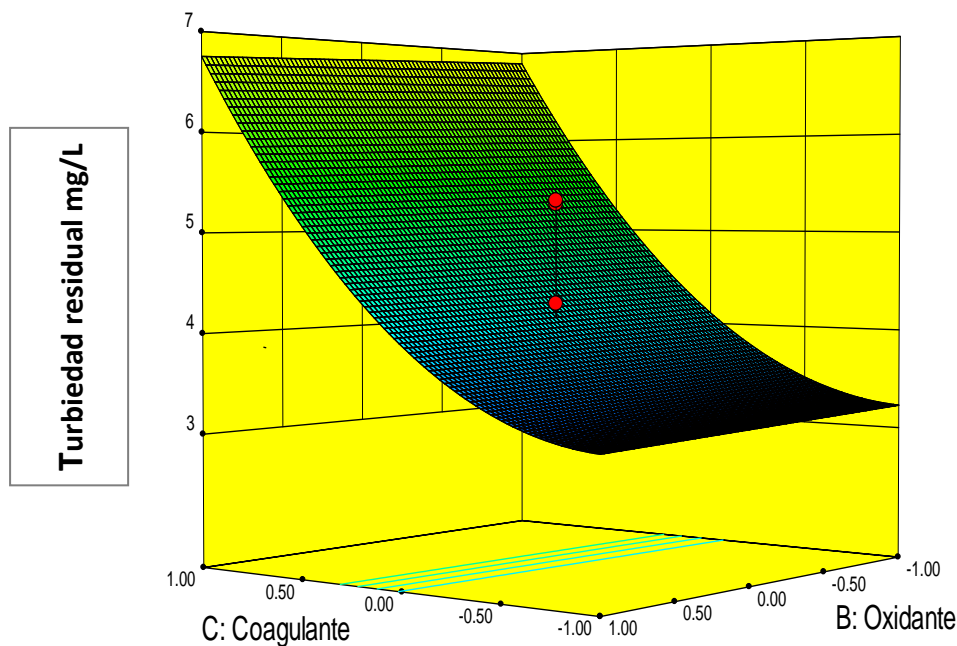


FIGURA V. 8 Superficie de respuesta estimada Factor A: Clorofila inicial=0.00 del contenido residual de Turbiedad.

TABLA V. 13 Análisis estadístico y de varianza de contenido solido de lodo para la combinación Hipoclorito de Sodio- SA STD.

Hipoclorito de sodio – SA STD – PA2 (Sedimentación)					
Producción de lodo					
Coefficiente	Suma de cuadrados	G.L	Media de cuadrados	Valor F	Valor P
Modelo	847.805.486	8	1059.76	28.672	< 0.0001
A - Clorofila inicial	2046.65	1	2046.65	55.372	< 0.0001
B - Oxidante	45.76	1	45.76	1.238	0.2764
C - Coagulante	5508.28	1	5508.28	149.026	< 0.0001
AB	122.66	1	122.66	3.318	0.0805
AC	123.77	1	123.77	3.348	0.0792
BC	0	0	0	0	0
A ²	257.76	1	257.76	6.974	0.0141
B ²	227.86	1	227.86	6.165	0.0201
C ²	145.32	1	145.32	3.932	0.0585
Residual	924.05	25	36.96	0	0
Falta de ajuste	337.42	6	56.24	1.821	0.1484
Error total	586.63	19	30.88	0	0
Cor Total	9402.10	33	0	0	0

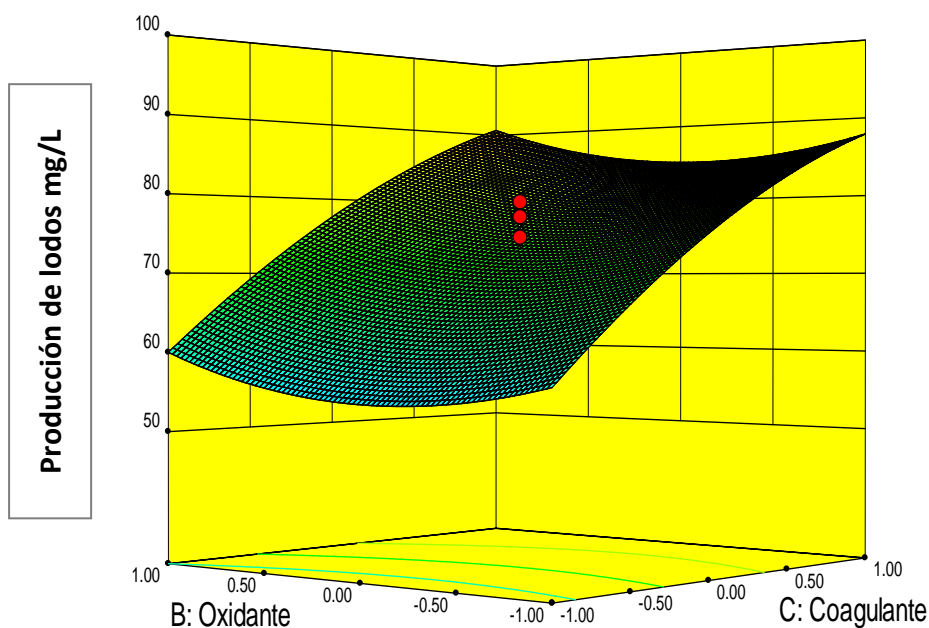


FIGURA V. 9 Superficie de respuesta estimada Factor A: Clorofila inicial=0.00 del contenido residual de producción de lodos.

TABLA V. 14 Análisis estadístico y de varianza de contenido pH para la combinación Hipoclorito de Sodio- SA STD.

Hipoclorito de sodio – SA STD – PA2 (Sedimentación)					
pH					
Coefficiente	Suma de cuadrados	G.L	Media de cuadrados	Valor F	Valor P
Modelo	1.524.859	6	2.54	100.287	< 0.0001
A - Clorofila inicial	0.15	1	0.15	6.022	0.0209
B - Oxidante	0.01	1	0.01	0.529	0.4731
C - Coagulante	14.64	1	14.64	577.579	< 0.0001
AB	0	0	0	0	0
AC	0.05	1	0.05	2.087	0.1600
BC	0	0	0	0	0
A ²	0	0	0	0	0
B ²	0.22	1	0.22	8.800	0.0062
C ²	0.17	1	0.17	6.706	0.0153
Residual	0.68	27	0.03	0	0
Falta de ajuste	0.16	8	0.02	0.752	0.6469
Error total	0.52	19	0.03	0	0
Cor Total	15.93	33	0	0	0

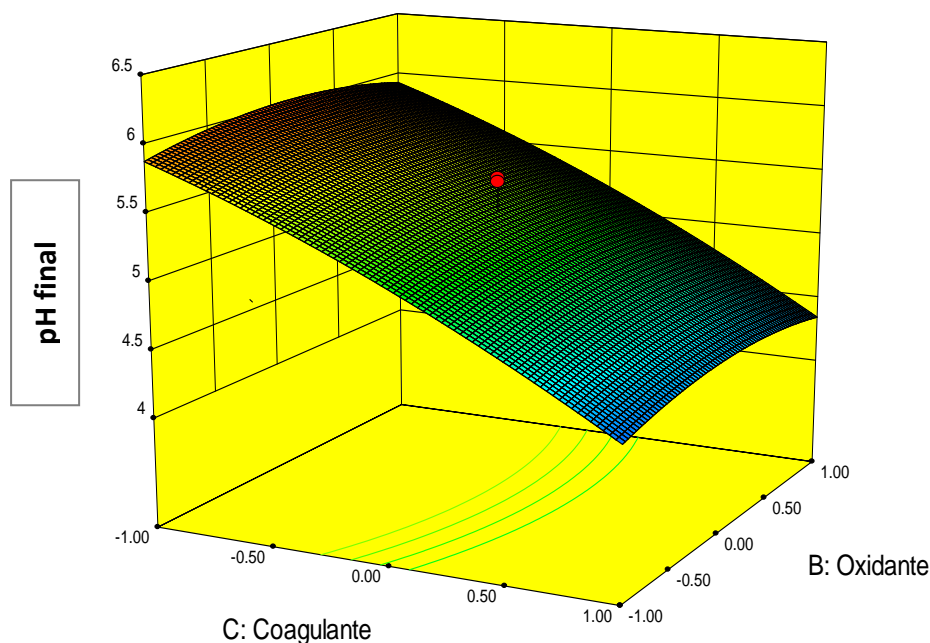


FIGURA V. 10 Superficie de respuesta estimada Factor A: Clorofila inicial=0.00 de pH.

TABLA V. 15 Análisis estadístico y de varianza de contenido oxidante residual para la combinación Hipoclorito de Sodio- SA STD.

Hipoclorito de sodio – SA STD – PA2 (Sedimentación)					
Oxidante residual					
Coefficiente	Suma de cuadrados	G.L	Media de cuadrados	Valor F	Valor P
Modelo	249.822.852	6	4.16	68.632	< 0.0001
A - Clorofila inicial	0.13	1	0.13	2.114	0.1575
B - Oxidante	24.23	1	24.23	399.359	< 0.0001
C - Coagulante	0.00	1	0.00	0.025	0.8755
AB	0.30	1	0.30	4.986	0.0340
AC	0	0	0	0	0
BC	0.16	1	0.16	2.637	0.1160
A ²	0	0	0	0	0
B ²	0	0	0	0	0
C ²	0.16	1	0.16	2.672	0.1137
Residual	1.64	27	0.06	0	0
Falta de ajuste	1.31	8	0.16	9.474	< 0.0001
Error total	0.33	19	0.02	0	0
Cor Total	26.62	33	0	0	0

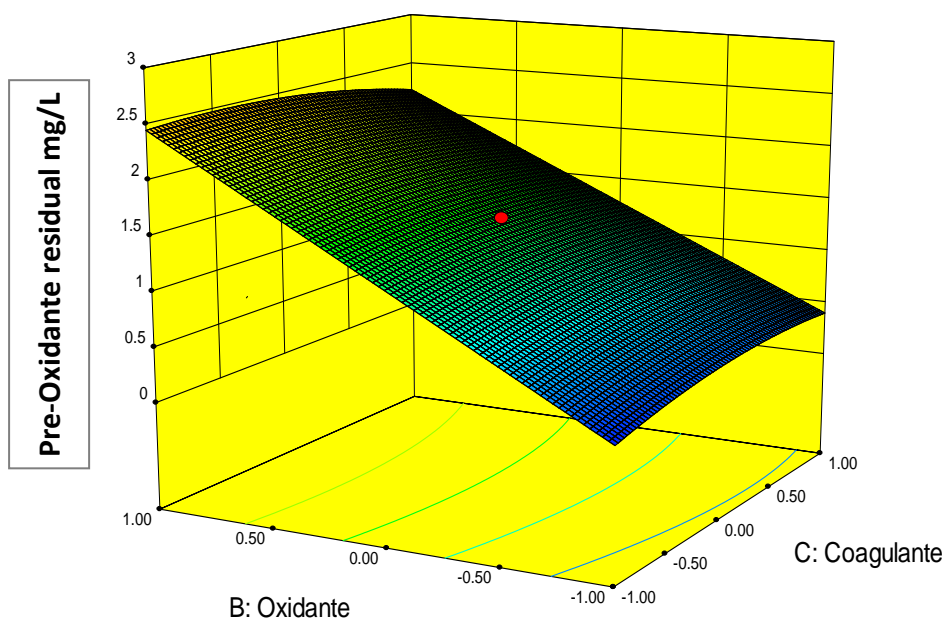


FIGURA V. 11 Superficie de respuesta estimada Factor A: Clorofila inicial=0.00 del contenido residual de oxidante.

TABLA V. 16 Análisis estadístico y de varianza de contenido residual de clorofila-a para la combinación Hipoclorito de Sodio- SA STD.

Hipoclorito de sodio – SA STD – PA2 (Sedimentación)					
Clorofila residual					
Coefficiente	Suma de cuadrados	G.L	Media de cuadrados	Valor F	Valor P
Modelo	0.46	6	0.08	1.018	0.4345
A - Clorofila inicial	0.04	1	0.04	0.528	0.4738
B - Oxidante	0.21	1	0.21	2.746	0.1091
C - Coagulante	0.04	1	0.04	0.528	0.4738
AB	0.06	1	0.06	0.769	0.3882
AC	0.06	1	0.06	0.769	0.3882
BC	0.06	1	0.06	0.769	0.3882
A ²	0	0	0		0
B ²	0	0	0	0	0
C ²	0	0	0	0	0
Residual	20.394.257	27	0.07553429	0	0
Falta de ajuste	0.34164362	8	0.04270545	0.47791976	0.8567
Error total	169.778.207	19	0.08935695	0	0
Cor Total	2.50	33	0	0	0

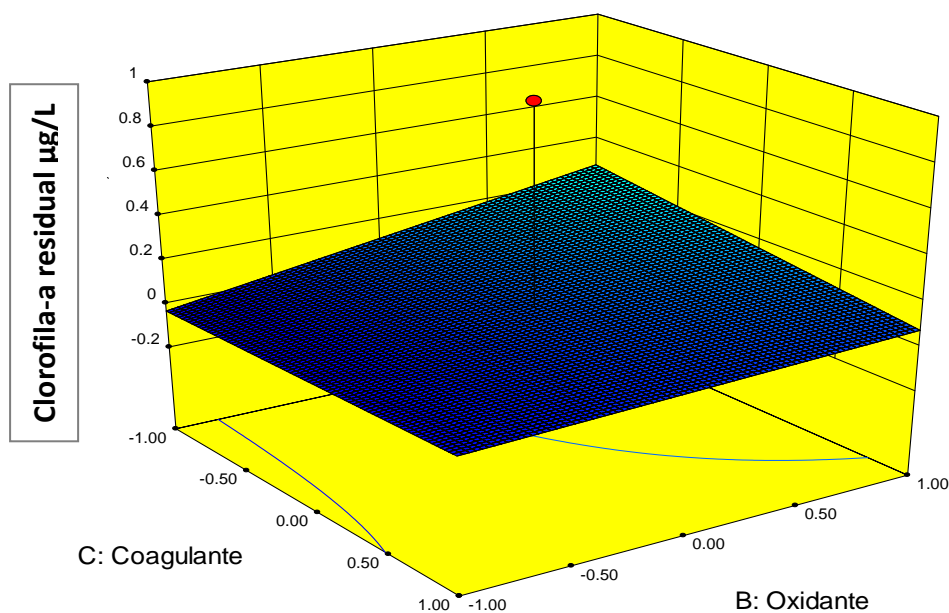


FIGURA V. 12 Superficie de respuesta estimada Factor A: Clorofila inicial=0.00 del contenido residual de clorofila-a.

TABLA V. 17 Análisis estadístico y de varianza de contenido aluminio residual para la combinación Hipoclorito de Sodio- SA STD.

Hipoclorito de sodio – SA STD – PA2 (Sedimentación)					
Aluminio residual					
Coefficiente	Suma de cuadrados	G.L	Media de cuadrados	Valor F	Valor P
Modelo	108.085.206	5	21.62	35.642	< 0.0001
A - Clorofila inicial	1.50	1	1.50	2.480	0.1265
B - Oxidante	1.07	1	1.07	1.771	0.1939
C - Coagulante	74.79	1	74.79	123.319	< 0.0001
AB	5.06	1	5.06	8.347	0.0074
AC	0	0	0	0	0
BC	0	0	0	0	0
A ²	0	0	0	0	0
B ²	0	0	0	0	0
C ²	25.65	1	25.65	42.292	< 0.0001
Residual	16.98	28	0.61	0	0
Falta de ajuste	14.34	9	1.59	11.477	< 0.0001
Error total	2.64	19	0.14	0	0
Cor Total	125.07	33	0	0	0

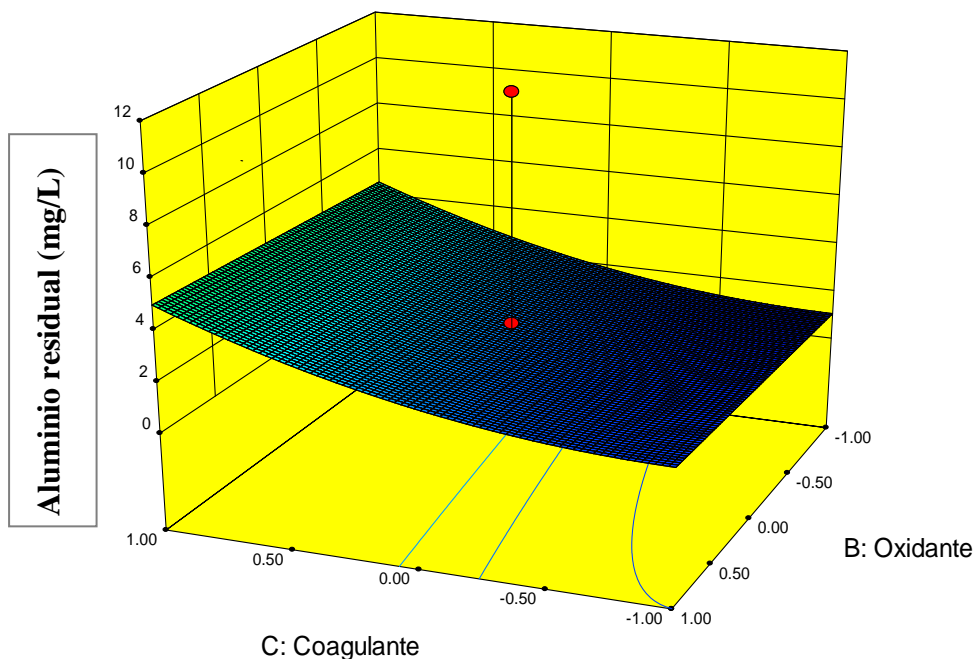


FIGURA V. 13 Superficie de respuesta estimada Factor A: Clorofila inicial=0.00 del contenido residual de Aluminio residual.

TABLA V. 18 Análisis estadístico y de varianza de contenido hierro residual para la combinación Hipoclorito de Sodio- SA STD.

Hipoclorito de sodio – SA STD – PA2 (Sedimentación)					
Hierro residual					
Coefficiente	Suma de cuadrados	G.L	Media de cuadrados	Valor F	Valor P
Modelo	0.10928619	4	0.03	82.039	< 0.0001
A - Clorofila inicial	0.00	1	0.00	0.411	0.5267
B - Oxidante	0.00	1	0.00	0.741	0.3964
C - Coagulante	0.09	1	0.09	272.676	< 0.0001
AB	0	0	0	0	0
AC	0	0	0	0	0
BC	0	0	0	0	0
A ²	0	0	0	0	0
B ²	0	0	0	0	0
C ²	0.02	1	0.02	54.328	< 0.0001
Residual	0.01	29	0.00	0	0
Falta de ajuste	0.01	10	0.00	3.419	0.0102
Error total	0.00	19	0.00	0	0
Cor Total	0.12	33	0	0	0

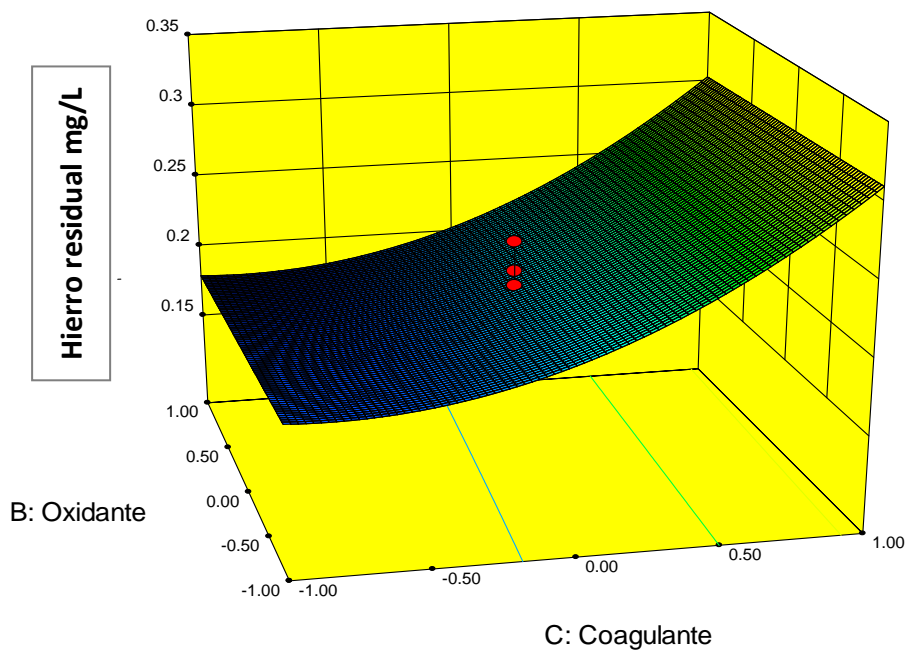


FIGURA V. 14 Superficie de respuesta estimada Factor A: Clorofila inicial=0.00 del contenido residual de Hierro residual.

Optimización de las dosis de Pre-oxidante y Coagulante-Floculante para el proceso de sedimentación

TABLA V. 19 Combinación: Hipoclorito de sodio – pDADMAC – PA1 (Sedimentación).

Codificados					
Clorofila α	$-\alpha$	-1	0	1	α
	-1.353	-1.000	0	1.000	1.353
Oxidante	-0.194	-0.340	-1.350	0.000	0.000
Coagulante	-0.250	0.000	0.000	0.000	0.000
Reales					
Clorofila, $\mu\text{g/L}$	14	22	45	68	76
Hipoclorito de sodio, mg/L	2.16	1.90	0.12	2.50	2.50
pDADMAC, mg/L	2.68	3.00	3.00	3.00	3.00
Respuestas					
Clorofila- α inicial	$-\alpha$	-1	0	1	α
Turbiedad	-0.47	0.13	1.77	2.19	2.08
Color aparente	0.5	-0.1	5.3	9.6	11.4
Clorofila residual	0.00	0.03	0.24	0.17	0.20
Cloro libre residual	0.27	0.33	0.45	0.36	0.22
Sólidos de lodo	27.1	24.9	17.8	33.8	39.5
pH final	7.14	7.12	7.12	7.18	7.19

TABLA V. 20 Combinación: Hipoclorito de sodio – SA STD – PA2 (Sedimentación).

Codificados					
Clorofila α	$-\alpha$	-1	0	1	α
	-1.353	-1.000	0	1.000	1.353
Oxidante	-0.020	0.000	-0.240	0.000	0.000
Coagulante	-1.090	-1.100	-0.950	-1.120	-1.130
Reales					
Clorofila, $\mu\text{g/L}$	14	22	45	68	76
Hipoclorito de sodio, mg/L	2.46	2.50	2.08	2.50	2.50
SA STD, mg/L	9.31	9.19	10.94	8.96	8.84
Respuestas					
Clorofila- α inicial	$-\alpha$	-1	0	1	α
Turbiedad	3.37	3.28	3.19	3.24	3.31
Color aparente	2.2	0.4	0.0	1.7	4.0
Clorofila residual	-0.02	0.02	0.09	0.24	0.28
Cloro libre residual	1.39	1.39	1.08	1.23	1.21
Sólidos de lodo	35.9	41.6	55.5	53.7	52.0
pH final	5.98	6.01	6.00	6.18	6.22
Aluminio residual	0.89	1.01	1.06	1.54	1.65
Hierro residual	0.19	0.19	0.18	0.18	0.18

ANEXO VI

MDM. Análisis del aspecto económico

Costos de dosificación de Pre-oxidante-Coagulante-floculante.

Los costos de dosificación de los reactivos para pre-oxidación y coagulación-floculación se calcularon en base a las dosis mínima y máxima optimizadas dentro de los cinco intervalos de clorofila-a, se consideró tomar estos valores extremos para evaluar cómo un intervalo el costo por dosificación de estos reactivos al tren de tratamiento. En la Tabla VI.1 se presentan las dosis seleccionadas para cada pre-oxidante, coagulante y floculante.

TABLA VI. 1 Dosis de optimas de pre-oxidante-coagulante y floculante

Proceso de clarificación	Pre-oxidante	Coagulante	Floculante	Dosis, mg/L.				
				Pre-oxidante		Coagulante		Floculante
				Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Constante
SEDIMENTACIÓN	Hipoclorito de sodio	pDADMAC	PA1	0.12	2.5	2.68	3.0	0.1
		SA STD	PA2	2.08	2.5	8.84	10.94	0.4

TABLA VI. 2 Tabla de costos e índices de costos.

Costo Cloro, Cl ₂	1.8843 USD/KG
Índice de costo ó costo relativo al Cloro líquido	
Cl ₂ /Cl ₂	1
ClO ₂ /Cl ₂	2.488
O ₃ /Cl ₂	70.75

El costo de cloro liquido es un costo en pesos por cilindro de 2000lb: 20,000 + IVA considerando un tipo de cambio \$11.83 pesos.

El costo del cloro fue tomado de una cotización con el proveedor.

En la siguiente tabla están los costos de los coagulantes y floculantes usados.

TABLA VI. 3 Tabla de costos de coagulantes y floculantes usados.

Coagulante	Pureza, % (m/m)	Costo USD/kg comercial	Costo USD/kg puro
pDADMAC	42	1.3	3.095
SA STD	7.55	0.1039	1.376
Floculante	Pureza, % (m/m)	Costo USD/kg comercial	Costo USD/kg puro
PA1	49	2.3	4.69
PA2	49	2.3	4.69

El costo sulfato de aluminio estándar es un costo en pesos por tonelada 1230 + IVA, considerando un tipo de cambio \$11.83 pesos.

Los costos relativos se tomaron a partir de la tabla expuesta en (Referencia de la AWWA de miguel) que consideran los costos de operación, producción, dosificación y mantenimiento a equipo, es importante mencionar que los costos de los reactivos no considera el IVA.

En la Tabla VI.4 siguiente se identifica los costos del pre-oxidante y costos del coagulante-floculante para poder evaluar económicamente cada reactivo.

TABLA VI. 4 Tabla de costos de reactivos.

Combinación	Dosificación de Oxidante (mg/L)		Dosificación Coagulante (mg/L)		Dosificación Floculante (mg/L)		Costo pre-oxidante dosificado (USD/m ³)		Costo Coagulante-Floculante (USD/m ³)		Costo de pre-oxidante-coagulante-floculante (USD/m ³)	
	Min	Max	Min	Máx	Min	Max	Min	Max	Min	Max.	Min	Max.
pDADMAC	0.12	2.5	2.68	3	0.1	0.1	0.0002	0.0047	0.0088	0.0098	0.0090	0.0145
SA STD	2.08	2.5	8.84	10.9 4	0.4	0.4	0.0039	0.0047	0.0141	0.0169	0.0180	0.0217

TABLA VI.4 Tabla de costos de reactivos (continuación).

Combinación	Costo de pre-oxidante (USD/año)		Costo de coagulante-floculante (USD/año)		Costo de pre-oxidante-coagulante-floculante (USD/año)	
	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx
pDADMAC	7,130.79	148,558.21	276,401.24	307,636.90	283,532.04	456,195.11
SA STD	123,600.4324	148,123.16	443,123.16	534,324.15	566,723.60	682,882.36

Cabe mencionar que los costos de producción de agua potable se basaron en los costos de los agente químicos utilizados (pre-oxidante, coagulante, y floculante) debido a que la planta potabilizadora en estudio ya se tiene instalado el proceso de pre-oxidación-coagulación-floculación-sedimentación y solo se requiere evaluar el cambio de coagulante debido al incremento en el costo del coagulante actual (Sulfato de aluminio). Con los resultados obtenidos se analizaron los escenarios planteados y se obtuvieron costos de producción por metro cubico para cada alternativa, en pesos mexicanos (1USD equivale a 11.80 pesos mexicanos), para mayor facilidad de los costos también se presentaron en USD/año.