



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

INSTITUTO DE CIENCIAS QUÍMICAS Y AMBIENTALES

“Análisis comparativo del proceso de floculación-coagulación en la potabilización de agua de río, usando como fuente de captación el Río Daule y el Río Babahoyo en la Provincia del Guayas.”

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO QUÍMICO

Presentada por:

María Gabriela Yagual Vincés

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2012

AGRADECIMIENTO

A Dios por permitirme vivir para terminar esta etapa. A mis queridos padres y novio por su amor eterno y ayuda incondicional.

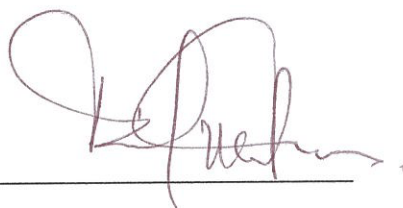
Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mi director de tesis, Ing. Francisco Torres, que pese a las contrariedades del tiempo supo destinarle un espacio y recursos para guiarme y encaminarme a la culminación de este trabajo. De igual forma agradezco a la ESPOL y a los profesores que aportaron de alguna u otra forma en mi formación.

DEDICATORIA

A mis padres, Bolivar Yagual y Leonor
Vinces. A mi novio Francisco Alvarado.

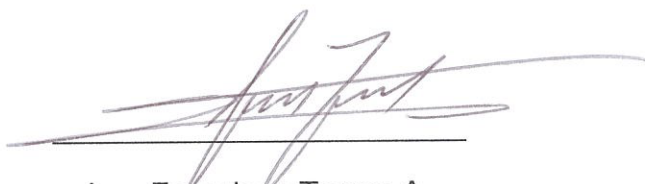
MARÍA GABRIELA YAGUAL VINCES

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



Ph.D David Matamoros C.

DIRECTOR ICQA



Ing. Francisco Torres A.

DIRECTOR DE TESIS



Ph.D. Luis Domínguez G.

VOCAL PRINCIPAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de este Proyecto de Tesis de Grado, nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

A handwritten signature in dark ink, which appears to read "María Gabriela Yagual Vincés", is written over a horizontal line.

MARÍA GABRIELA YAGUAL VINCÉS

RESUMEN

El agua es primordial para la preservación de los seres vivos y es indispensable que se encuentre dentro de parámetros de calidad para el consumo humano. Por lo general, el agua cruda, no se encuentra en estado óptimo para su consumo, y debido a esto, se requiere de la aplicación de procesos de potabilización de agua. La coagulación y floculación son procesos de vital importancia en el tratamiento de aguas para fines de potabilización. Parte importante de estos procesos es la adición de agentes químicos, que mediante su eficiente acción, permiten que el agua se clarifique.

Sin embargo, dependiendo de la fuente de captación, el agua adquiere diferentes características físicas, químicas y microbiológicas, siendo así que no todos los reactivos que se aplican funcionan con la misma eficiencia y se obtienen diferentes resultados. El tema de tesis de grado propuesto tiene como fin evaluar el desempeño de una alternativa de floculante que permita tener los resultados esperados de calidad del agua. Adicionalmente, se pretende observar el comportamiento de la floculación y coagulación en agua de diferentes fuentes de captación para determinar si el tratamiento es aplicable en las dos fuentes evaluadas.

La tesis ha sido desarrollada en cinco capítulos que se dividen entre la introducción al tema, marco teórico, metodología aplicada, análisis de resultados y conclusiones. El Capítulo I presenta el planteamiento del problema, la justificación para la elaboración de esta tesis, objetivos y la hipótesis planteada. En el Capítulo 2 se describen las bases teóricas del estudio realizado, presentando la información recopilada mediante búsqueda bibliográfica de estudios similares, literatura referente a la potabilización de agua e información disponible.

El Capítulo 3 indica cuáles fueron los métodos de laboratorio empleados y los métodos analíticos para el análisis de resultados, debido a que la recolección de datos fue efectuada experimentalmente. En el Capítulo 4 se presentan y analizan los resultados obtenidos, a fin de llegar a la comprobación de la hipótesis. Finalmente, el Capítulo 5 acoge las conclusiones de la tesis.

ABREVIATURAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
AWWA	American Water Works Association
DBO5	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
FP	Floculante Praestol
FQ	Floculante Químico
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
INOCAR	Instituto Nacional Oceanográfico de la Armada
INPC	Instituto Nacional de Pesca
MAGAP	Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca
MÁX	Máximo
MIN	Mínimo
Min	Minuto
NMP	Número más Probable
NTE	Norma Técnica
NTU	Nephelometric Turbidity Unit
pH	Potencial de Hidrógeno
ppm	Partes por Millón
RB	Río Babahoyo
RD	Río Daule

RPM	Revoluciones por Minuto
SM	Standard Methods
SNI	Sistema Nacional de Información
SST	Sólidos Suspendidos Totales
ST	Sólidos Totales
TULSMA	Texto Unificado de la Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente
UV	Ultra-violeta

SIMBOLOGÍA

H_2S	Ácido sulfhídrico
H_2SO_4	Ácido sulfúrico
EDTA	Ácido etilendiaminotetraacético
H_2O	Agua
Al	Aluminio
NH_3	Amoníaco
$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	Bicarbonato cálcico
CaCO_3	Carbonato cálcico
KCL	Cloruro de Potasio
$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Cloruro férrico hidratado
S_d	Desviación Estándar
CO_2	Dióxido de carbono
$^{\circ}\text{C}$	Grado Centígrado
G	Gradiente de velocidad
OH	Hidróxido
$\text{Al}(\text{OH})_3$	Hidróxido de aluminio, anfótero
$\text{Fe}(\text{OH})_3$	Hidróxido de hierro
μ_d	Hipótesis nula
H_o	Hipótesis nula
H^+	Ion hidronio

km	Kilómetro
km ²	Kilómetro cuadrado
$\bar{x}$	Media aritmética
$\bar{d}$	Media de diferencias
m ³ /s	Metro cúbico por segundo
μm	Micrómetro
uS/cm	Microsiemens por centímetro
mg/l	Miligramo por litro
ml	Mililitro
mm	Milímetro
mV	Milivoltio
nm	Nanómetro
n	Número de observaciones
Fe ₂ O ₃	Óxido férrico
O ₂	Oxígeno gaseoso
%	Por ciento / porcentaje
P	Potencia
S	Segundo
Al ₂ (SO ₄) ₃ ·	Sulfato de aluminio hidratado
CaSO ₄	Sulfato de calcio
Fe ₂ (SO ₄) ₃	Sulfato férrico
μ	Viscosidad

V

Volumen

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
AGRADECIMIENTO.....	II
DEDICATORIA.....	III
RESUMEN.....	VI
ABREVIATURAS.....	VIII
SIMBOLOGÍA.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XV
ÍNDICE DE TABLAS.....	XVII
1. INTRODUCCIÓN	2
1.1 Planteamiento del Problema	2
1.2 Objetivos	7
1.3 Justificación.....	8
1.4 Hipótesis.....	12
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	14
2.1 Proceso de Potabilización del Agua	14
2.2 Calidad del Agua	19
2.3 Teoría de la Floculación/Coagulación	28
2.3.1 Coloides	28
2.3.2 Proceso de Floculación	37
2.3.3 Proceso de Coagulación	42
2.3.4 Coagulantes	51
2.3.5 Prueba de Jarras.....	55
3. METODOLOGÍA	60
3.1 Colección del Agua a Tratar	60
3.2 Recolección de Datos	61
3.3 Equipos Utilizados en los Experimentos	63

3.4	Métodos y Procedimientos Empleados en la Caracterización del Agua	66
3.5	Procesamiento de Datos	76
3.6	Comprobación de la Hipótesis.....	77
4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS	82
4.1	Observaciones	83
4.2	Determinación de la Dosis Óptima de Reactivos	90
4.2.1	Dosis Óptima de Coagulante.....	93
4.2.2	Dosis Óptima de Floculante	97
4.3	Influencia en Otros Parámetros de la Calidad del Agua	102
4.3.1	Potencial de Hidrógeno	102
4.3.2	Conductividad.....	104
4.3.3	Sólidos Suspendidos.....	106
4.3.4	Sólidos Totales	107
4.3.5	Dureza.....	109
4.4	Comprobación Estadística de la Hipótesis	109
4.5	Consideraciones.....	112
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	116

APÉNDICES
BIBLIOGRAFÍA

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Ubicación geográfica de los ríos Babahoyo y Daule.....	5
Figura 1-2: Ubicación Sub-cuenca Drenajes Menores.....	10
Figura 2-1: Diagrama de tratamiento de agua potable.....	16
Figura 2-2: Capas y potenciales eléctricos formados en partículas coloidales	31
Figura 2-3: Representación de capa de Stern, potencial zeta y doble capa .	32
Figura 2-4: Representación del proceso de floculación a nivel de partículas aglomeradas	40
Figura 2-5: Coagulación: adición de coagulantes neutraliza cargas en la superficie coloidal.	43
Figura 2-6. Estructuras de polímeros de carácter aniónico y catiónico	48
Figura 2-7: Estructuras de polímeros no iónicos.....	49
Figura 2-8: Diagrama de diseño y operación de la alúmina para el proceso de coagulación.....	54
Figura 2-9: Secuencia de la ejecución de una prueba de jarras	57
Figura 3-1: Equipo de prueba de Jarras y sus partes principales	63
Figura 3-2: Equipo de medición de pH.....	67
Figura 3-3: Balanza analítica	70
Figura 3-4: Filtros de fibra de vidrio	71
Figura 3-5: Equipo de succión al vacío	71
Figura 3-6: Estufa	71
Figura 3-7: Diseño experimental	78
Figura 4-1: Flóculos formados con floculante químico (RD)	84
Figura 4-2: Flóculos formados con Praestol (RD).....	84
Figura 4-3: Flóculos formados con floculante químico (RB)	84
Figura 4-4: Flóculos formados con Praestol (RB)	84
Figura 4-5: Comparación de la dimensión del flóculo	85
Figura 4-6: Agua clarificada con Floculante químico (RD).....	88
Figura 4-7: Agua clarificada con Praestol (RD).....	88
Figura 4-8: Agua clarificada con floculante químico (RB)	89
Figura 4-9: Agua clarificada con Praestol (RB).....	89
Figura 4-10: Turbidez vs. dosis de sulfato de aluminio en agua de RD	93
Figura 4-11: Turbidez vs. dosis de sulfato de aluminio en agua de RB	95
Figura 4-12: Turbidez vs. dosis de floculantes en agua de RD con 65 ppm , dosis óptima, de sulfato de aluminio	97

Figura 4-13: Turbidez vs. dosis de floculantes en agua de RB con 130 ppm, dosis óptima, de sulfato de aluminio	98
Figura 4-14: Turbidez vs. dosis de floculantes en agua de río Babahoyo con 65 ppm de sulfato de aluminio	100
Figura 4-15: Turbidez vs. dosis de floculantes en agua de río Daule con 260 ppm de sulfato de aluminio	101
Figura 4-16: Turbidez vs. Dosis de floculantes en agua de río Babahoyo con 260 ppm de sulfato de aluminio	101
Figura 4-17: pH vs. dosis de sulfato de aluminio	103
Figura 4-18: Conductividad vs. dosis de floculantes en dosis óptima de coagulante para RB	104
Figura 4-19: Conductividad vs. dosis de floculantes en dosis óptima de coagulante para RB	105
Figura 4-20: SST vs. dosis de floculantes en dosis óptima de coagulante para RB	106
Figura 4-21: SST vs. dosis de floculantes en dosis óptima de coagulante para RD	107
Figura 4-22: ST vs. Dosis de floculantes en dosis óptima de coagulante para río Daule	108
Figura 4-23: ST vs. Dosis de floculantes en dosis óptima de coagulante para río Babahoyo	108
Figura 4-24: Remoción de turbidez obtenida en las pruebas ejecutadas para las muestras de río Daule (RD) y río Babahoyo (RB) mediante la aplicación de floculante químico (FQ) y floculante Praestol 650 TR (FP)	110

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I: Características generales de los ríos Daule y Babahoyo.....	11
Tabla II: Estándares de calidad.....	15
Tabla III: Límites máximo permisibles aguas que únicamente requieren tratamiento convencional	27
Tabla IV: Restricciones entre coagulación y floculación	46
Tabla V: Metodología Empleada en las pruebas de jarras	62
Tabla VI: Materiales y metodología empleada en la caracterización del agua	65
Tabla VII: Resumen de resultados obtenidos en la caracterización del agua posterior a su tratamiento con agentes coagulantes y floculantes.....	82
Tabla VIII: Índice de Willcomb.....	86
Tabla IX: Eficiencia por % de remoción de turbidez en dosis	109
Tabla X: Diferencia entre pares de resultados por fuente de agua cruda, media y desviación estándar	111

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del Problema

Actualmente en la ciudad de Guayaquil, según el reporte anual de la empresa concesionada para las actividades de potabilización de agua, en el periodo 2010-2011 se captó y potabilizó un promedio mensual de aproximadamente 31 000 000 m³. Dicho volumen tiene como fuente de captación el Río Daule. A su vez, el agua es tratada en tres plantas de tratamiento de agua cruda, haciendo uso de químicos como sulfato de aluminio líquido, cloro líquido, Praestol 650 TR y cal. Sustancias como el sulfato de aluminio, cal y cloro son fácilmente disponibles en el mercado local, sin embargo, el polímero Praestol 650 TR es disponible gracias a gestiones de importación. La presente tesis propone encontrar una alternativa de floculante que pueda ser de mayor disponibilidad y no requiera de importaciones para su acceso.

La fuente de captación es un factor importante en el proceso de potabilización de agua. De acuerdo a la AWWA¹, los factores que afectan el diseño de la planta de agua y su localización incluyen

¹ American Water Works Association.

las características de la fuente de agua, capacidad requerida presente y futura, variaciones en la calidad de agua, condiciones climáticas, fuentes de contaminación existentes y potenciales, protección de la vida acuática, variaciones en el nivel del agua, navegación, sedimentos del fondo. Todos estos factores son inherentes de la fuente de captación.

La captación se puede realizar en distintos cuerpos de agua como lagos, agua subterránea y ríos. Por lo general, según el Manual de Nalco [14], el agua proveniente de cuerpos de agua superficiales, como ríos, suele tener menor dureza que el agua de cuerpos subterráneos y pueden proveer agua de buena calidad para la potabilización mediante métodos primarios. Sin embargo, las características químicas, la contaminación biológica y los sólidos suspendidos presentes en el agua cruda pueden variar según la época del año en Guayaquil. Especialmente, los niveles de turbidez y los sólidos suspendidos pueden ser muy altos, más aún en época de lluvia. Puede haber afectación por la escorrentía de sectores agrícolas que pueden agregar fosfatos y nitratos.

En el caso particular de la ciudad de Guayaquil, la principal fuente de captación para agua potable es el Río Daule. El mismo es el segundo tributario de la Cuenca del Río Guayas, con una longitud de 126 km. El punto de captación de agua es un lugar denominado “La Toma” localizado a aproximadamente 26 km de la ciudad de Guayaquil. A la altura de este punto, el río Daule se encuentra sujeto a la influencia de las mareas. Del río Daule se extraen, mediante un sistema de bombas, alrededor de 19 m³/s para el tratamiento de potabilización que abastece a la ciudad de Guayaquil.

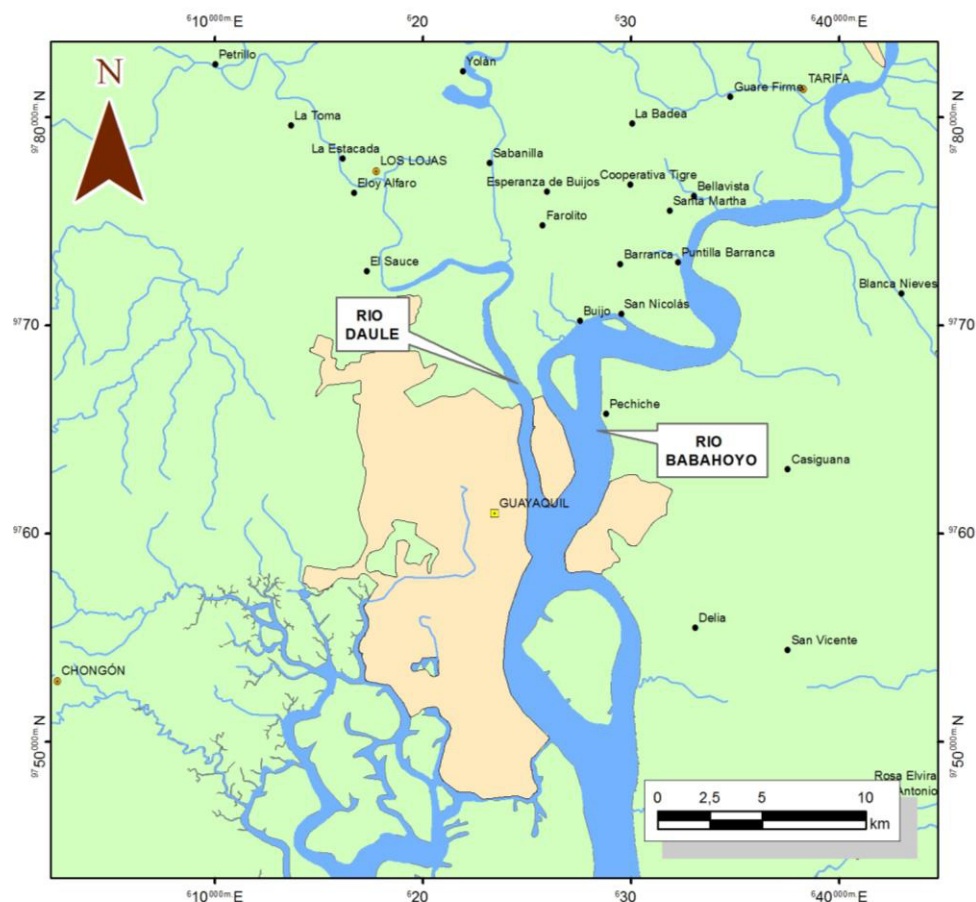


Figura 1-1: Ubicación geográfica de los ríos Babahoyo y Daule

Fuente: MAGAP, 2002. Disponible en www.sni.gob.ec

El río Daule confluye con el río Babahoyo para formar el Río Guayas. En la FIGURA 1.1 se muestra la localización geográfica de los dos cuerpos de agua y su punto de confluencia.

Adicionalmente, la tesis propone la aplicación de los procesos de potabilización para agua proveniente del Río Babahoyo. Existen

notables diferencias entre el agua proveniente del Río Daule con respecto a la del Río Babahoyo. Estas diferencias implican distintas condiciones de operación para el proceso de potabilización del agua, por lo cual es probable que el tratamiento empleado en el agua de la primera fuente no funcione correctamente en el agua de la segunda fuente mencionada. Dicho esto, las principales diferencias se deben a la calidad del agua (pH, salinidad, sólidos suspendidos, sólidos totales, color, turbidez, etc.) de las dos fuentes y las interferencias que esto pueda ocasionar en la potabilización de las mismas. Un sistema de tratamiento siempre busca tener la eficiencia más alta posible; por lo tanto, la tesis deberá concluir si es aplicable el mismo proceso de coagulación y floculación en las dos fuentes de captación.

En el manejo de los sistemas de potabilización es usual utilizar al menos dos coagulantes-floculantes para elevar el nivel de clarificación del agua. Las sustancias empleadas y su desempeño dependen de la calidad del agua con la cual se trabaje. Por este motivo es de importancia para una posible alternativa de

captación, conocer si funciona el tratamiento convencional de agua aplicado.

Esta tesis no ahonda en el diseño integral de un sistema de potabilización de agua dulce, pero si comprende la comparación de dos sustancias coadyuvantes de la coagulación (Praestol 650 TR y un floculante químico comercial) y determinar si estos reactivos junto con el sulfato de aluminio son aplicables para el tratamiento de agua del Río Babahoyo.

1.2 Objetivos

Entre los objetivos para la comprobación de la hipótesis se encuentran:

- a) Analizar eficiencia de los floculantes usados en las pruebas de laboratorio para la determinación de la dosis óptima del floculante en función de la turbidez;
- b) Caracterizar parámetros básicos del agua cruda y tratada de los ríos Daule y Babahoyo, confrontándola con la normativa vigente;

- c) Analizar el efecto de los agentes coagulantes y floculantes en el sistema coloidal del agua proveniente de los ríos Daule y Babahoyo;
- d) Determinar si los procesos ensayados son aplicables para las fuentes de captación mencionadas.

1.3 Justificación

En el proceso de potabilización de agua cruda que abastece a Guayaquil se llegan a emplear hasta 26 645 745 kg de sustancias químicas por año. Debido a que el 75% de estos reactivos son empleados para los proceso de coagulación y floculación, es importante la búsqueda de nuevos reactivos que puedan resultar en mayor eficiencia del proceso.

La fuente de captación de agua es el Río Daule debido a su cercanía con la ciudad y las características del cuerpo de agua, así como la calidad de la misma.

Adicionalmente, es importante encontrar nuevas fuentes de agua cruda que puedan convertirse en agua potable para el abastecimiento de sectores rurales o alejados.

Pese a las diferencias existentes entre las fuentes de captación mencionadas, se comparten características como que los dos ríos tienen usos agrícolas, recreativos, son atravesados a diario por los habitantes de sus orillas y cercanías, así como estas personas le dan uso doméstico a sus aguas.

Según la FIGURA 1.2, donde se presentan las sub-cuencas aportantes de la cuenca del Río Guayas, la sección de los ríos Daule y Babahoyo en la cual se realizó la captación de agua cruda se encuentra dentro de la sub-cuenca 5207 – Drenajes Menores. La sub-cuenca ha sido denominada con este nombre y código por el SNI y representa el 9,5% del área total de la cuenca del Río Guayas.

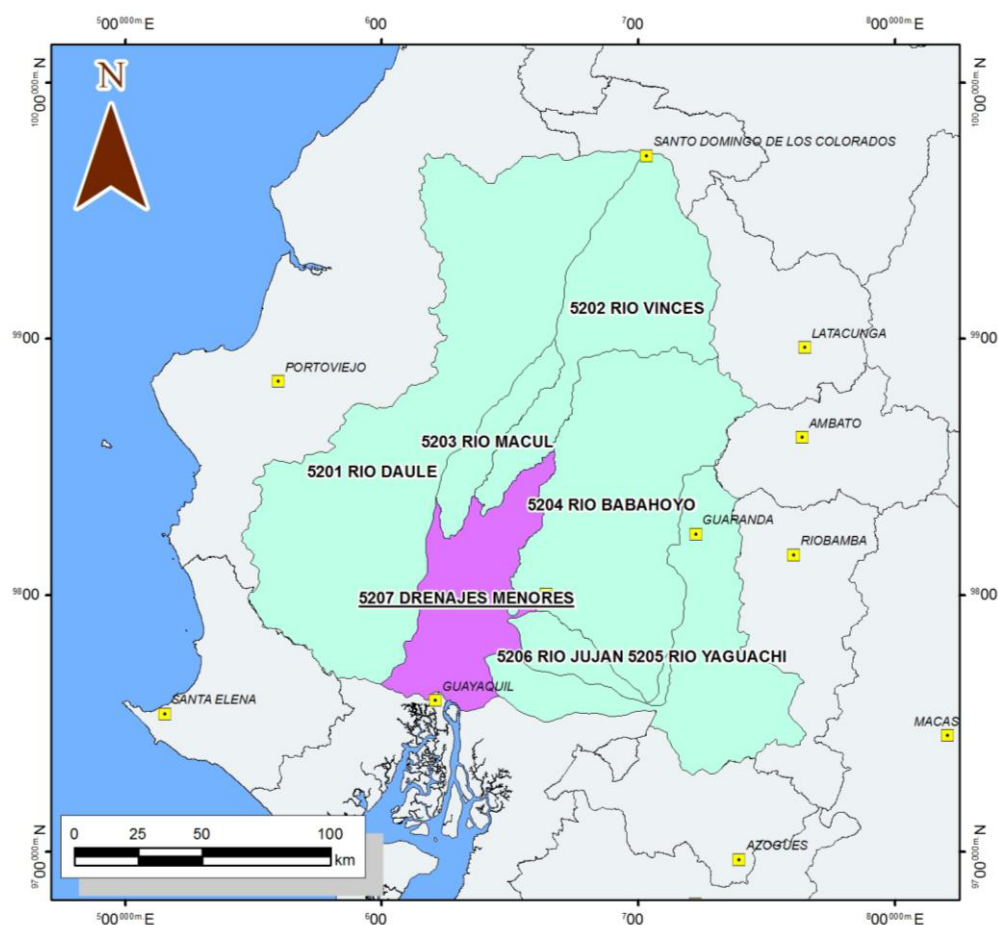


Figura 1-2: Ubicación Sub-cuenca Drenajes Menores

Fuente: MAGAP, 2002. Disponible en www.sni.gob.ec

En la siguiente TABLA I se presenta información general sobre las características de estos cuerpos de agua. Para los fines de esta tesis se ha escogido como alternativa de captación, el agua del río Babahoyo, en las inmediaciones cercanas al Buijo Histórico del cantón Daule. Según lo que se aprecia en la tabla, el río Babahoyo tiene aproximadamente el doble de caudal que el río Daule.

Tabla I: Características generales de los ríos Daule y Babahoyo

Río	Superficie (km ²)	Caudal Promedio Anual (m ³ /s)		Longitud (km)
		MAX	MIN	
Daule	12 050	450	25	126
Babahoyo	7 530	1000	50	175

Fuente: INPC, 1998 [9]

Debido a las características mostradas del río Babahoyo, este puede constituirse en una fuente de captación de agua cruda alterna al río Daule.

Es importante indicar que el escoger una nueva fuente de captación de agua puede tener efectos positivos a nivel social, económico y ambiental. En referencia al aspecto social, una nueva planta puede abastecer a sectores que actualmente no cuentan con facilidades de acceso a agua potable, lo cual constituye una mejora en la calidad de vida de los habitantes de estos fragmentos. A largo plazo, se disminuirían costos en redes de abastecimiento por las distancias cercanas y hasta podría implicar una redistribución de la captación del agua que permita tener una menor afectación a los cuerpos de agua. Es evidente en el sentido

económico que se podría realizar ahorros en la inversión por consumibles empleados en la potabilización del agua cruda, disminuyendo el costo de operación por m³ de agua tratada.

1.4 Hipótesis

El Floculante Químico no comercial es más eficiente en la remoción de turbidez que el floculante Praestol 650 TR en condiciones de laboratorio para cada fuente de agua empleada.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Proceso de Potabilización del Agua

En el proceso de potabilización de agua se desarrollan una serie de operaciones unitarias con el fin de lograr agua apta para el consumo humano. Las aguas tratadas en este tipo de proceso, deben cumplir ciertos estándares que garanticen su calidad. En el Ecuador, los estándares de calidad del agua potable se encuentran dados en la Norma NTE INEN 1108:2011 (ver APÉNDICE E), la norma está basada en las directrices indicadas por la OMS² en sus Guías para la Calidad del Agua Potable del año 2006. Adicionalmente, en ciudades como Guayaquil, la empresa concesionaria para las actividades de potabilización del agua debe cumplir con estándares contractuales. Los mencionados estándares se encuentran enlistados en la siguiente tabla:

² Organización Mundial de la Salud

Tabla II: Estándares de calidad

Parámetro	Unidad	Límites Permisibles	
		Contrato de Concesión	Norma INEN 1108:2006
Cloro libre residual	mg/l	0,3 – 1,5	0,3 – 1,5
Coliformes totales	NMP/100 ml	Ausencia	-
Coliformes fecales	NMP/100 ml	Ausencia	< 1,1 NMP/100 ml
Bacterias aerobias totales	NMP/100 ml	Máximo 30	Máximo 100
Turbiedad	NTU	Máximo 10	Máximo 5

Fuente: Interagua , 2011 [10]

El agua que generalmente se consume en zonas urbanas proviene de ríos, manantiales y pozos. En Guayaquil la fuente de agua cruda, es el Río Daule. La potabilización del agua, en la mayoría de las plantas de tratamiento de agua potable, se lleva a cabo como se indica en el siguiente diagrama de bloques:

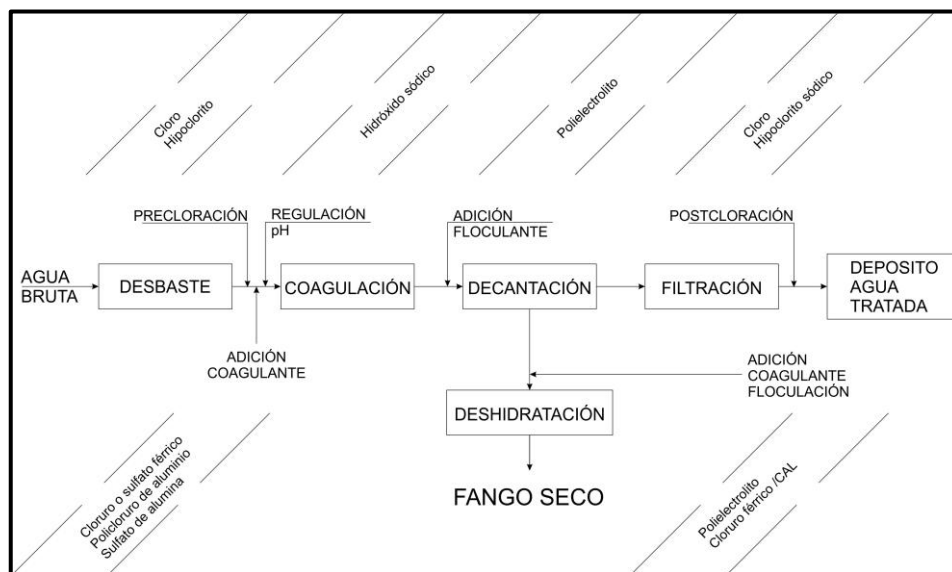


Figura 2-1: Diagrama de tratamiento de agua potable

Fuente: Company, 2000 [6]

Como se observa en la FIGURA 2.1, las principales operaciones unitarias envueltas en la potabilización del agua son:

- Captación de agua cruda
- Desbaste
- Tratamiento químico
- Decantación
- Filtración
- Desinfección
- Distribución

La captación consiste en el bombeo del agua cruda desde el cuerpo de agua que se ha seleccionado como fuente de captación.

Durante el desbaste se eliminan sólidos grandes que puedan estar presentes en el agua como ramas de árboles entre otros. En ciertas plantas se realiza una pre-cloración del agua, que es una desinfección previa al proceso de clarificación. Posteriormente, se aplican agentes coagulantes y floculantes con agitación y mediante decantación se logra precipitar la materia suspendida. Dentro de la clarificación del agua se incluye el filtrado del líquido, los filtros suelen ser de arena para la eliminación de restos de partículas en suspensión. Existen plantas de tratamiento que incluyen filtros de carbón activado para la eliminación de olores y sabores. Finalmente el agua es desinfectada para eliminar agentes bacterianos y microorganismos. Después de ser tratada, el agua es almacenada y distribuida a la población mediante redes hidráulicas.

En la ciudad de Guayaquil operan tres plantas para la potabilización del agua. Las mismas se denominan:

- Planta Convencional,
- Planta Lurgi
- Planta Nueva

La Planta Convencional cuenta con módulos para floculación, clarificación, filtración y cisternas. La planta presta la posibilidad de aplicar pre-cloración (pre-desinfección), ayudante de floculación (polímero), post-cloración (desinfección) y alcalinizante.

La planta Lurgi sigue el concepto de reactores de lodos de contacto acompañados con sedimentación acelerada. Emplea cuatro reactores cilíndricos de doble propósito floculación-clarificación, llamados "Sedimat". Está provista de un sistema mecánico de mezcla lenta, para facilitar el choque entre los flóculos presentes. La zona central de contacto de sólidos recibe una lechada de cal para mejorar las características del manto de lodo y corregir el pH.

La planta Nueva es de tipo contacto-recirculación de lodos y sedimentación. Tiene seis clarificadores por contacto de lodo y dieciséis filtros rápidos a gravedad para cada sector de trabajo. Tiene clarificadores que sustituyen las funciones de floculador y decantador presentes en las plantas convencionales. El agua clarificada es posteriormente filtrada y recolectada en canales centrales que transportan el agua hacia los reservorios.

Es importante indicar que el proceso de potabilización tiene variables según el tipo de agua cruda que se vaya a tratar.

2.2 Calidad del Agua

La calidad del agua define el punto inicial y final del tratamiento que va a recibir. Según la calidad del agua cruda y el uso para la cual va a ser empleada, se debe tener en cuenta que tipo de tratamiento aplicar según los parámetros listados a continuación [11].

Parámetros Físicos

Turbidez: Mide la cantidad de materia insoluble en suspensión presente en el agua [7]. Se expresa en términos de la capacidad de transmisión de la luz al interponer la muestra de agua a un haz luminoso. Equipos como turbidímetros se basan en la difracción de la luz al chocar esta con las partículas en suspensión. Generalmente se mide en NTU o UNF con referencia a un patrón.

Conductividad Eléctrica: Es la capacidad del agua para conducir corriente eléctrica. Se mide a través de conductímetros y en base a la resistencia al paso de la electricidad en la solución acuosa comparada con un patrón.

Sabor y Olor: Indican la calidad estética del agua y son determinados mediante sistemas organolépticos de tipo subjetivo.

Color: Es la medida de la capacidad para absorber ciertas radiaciones del espectro visible. Muestra la posible contaminación natural del agua y tiene efectos en la estética del agua. Generalmente medido a través de patrones a base de platino y cobalto [6].

Parámetros Químicos

pH: Matemáticamente es el logaritmo del inverso de la concentración del ion hidronio:

$$\text{pH} = \log \left(\frac{1}{[\text{H}^+]} \right)$$

Si el agua se encuentra a 25°C, el valor del pH es igual a 7 y el agua es neutra, si es ácida tendrá valores inferiores a 7 y si es ácida serán mayores a 7.

Dureza y Alcalinidad: Está dada por la presencia de sales disueltas de calcio y magnesio, que pueden ocasionar incrustaciones en tuberías y equipos [7]. Si, por otro lado, las aguas carecen de dureza, es decir son “blandas”, estas pueden adquirir un carácter agresivo. La dureza se presenta en las formas de Dureza Total que mide el contenido de los iones de calcio y magnesio; Dureza Permanente, vinculada a aniones fuertes, es medida después de hacer ebullición el agua, filtrarla y recuperar su volumen inicial y Dureza Temporal, es de carácter inestable y vinculada bicarbonatos, es el resultado de la resta de las dos anteriores. La alcalinidad también mide la capacidad de neutralizar ácidos.

Sólidos Totales: Son los sólidos totales que están contenidos en el agua, estos están formados por dos grupos:

Sólidos Disueltos: Materia disuelta en el agua, se determina mediante la evaporación del agua filtrada.

Sólidos en Suspensión: Indica la cantidad de sólidos suspendidos que pueden ser retenidos en un filtro de 0.45 μm .

Aniones: Se refiere a los iones negativos que pueden estar presentes en la muestra de agua. Entre ellos se suelen encontrar cloruros, sulfatos, bicarbonatos y carbonatos, en ciertas ocasiones se encuentran nitratos, fosfatos y fluoruros. Existen otros tipos de aniones que pueden no siempre estar presentes y son indeseables, como los sulfuros, sílice y aniones de metales anfóteros [6].

Cationes: Los iones positivos más frecuentes en el agua son: Sodio y Potasio. También se encuentra comúnmente cationes de Calcio y Magnesio, que conforman la dureza del agua. Con menor frecuencia se encuentran aniones de hierro $2+$ y $3+$ y manganeso $2+$ y $4+$.

Metales Tóxicos: Son metales cuyo control debe ser figurado en el origen de los mismos y totalmente evitados, de ser posible para fines de agua potable. Entre los metálicos tóxicos se encuentran plomo, cadmio arsénico, cromo y bario.

Gases Disueltos: Entre los gases que comúnmente se encuentran disueltos en el agua podemos listar el dióxido de carbono CO_2 (que da el origen a carbonatos y bicarbonatos), el oxígeno disuelto O_2 (totalmente necesario para que se pueda dar la vida en los cuerpos de agua), ácido sulfhídrico H_2S (ocasiona malos olores y corrosión de tuberías y equipos), amoníaco NH_3 (se encuentra en equilibrio con el ion amonio y es indicador de la contaminación del agua). Es muy importante eliminar este último gas, antes de la desinfección del agua debido a su capacidad de formar cloraminas (compuesto tóxico) en reacción al cloro [6].

Materia Oxidable: Está constituida por el contenido orgánico de las aguas, ya sean de origen natural o antropógena. Esta última suele generar contaminantes como aceites y grasas, carbohidratos y tensoactivos; por otro lado, la natural genera gases. Los indicadores de este tipo de contaminación son:

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅): Es la cantidad de Oxígeno, en ppm, que es consumida en la eliminación de materia orgánica bio-degradable durante 5 días a una temperatura constante de 20°C y ausencia de luz. Este parámetro se encuentra entre 300-400 ppm, por lo general, en aguas residuales domésticas. En fuentes de captación de agua para potabilización este parámetro está en el orden de 1 a 10 ppm cuando no hay procesos contaminantes.

Demanda Química de Oxígeno (DQO): Es la cantidad de oxidante químico (dicromato), empleada para lograr la oxidación de materia oxidable contenida en la muestra de agua. Para su determinación en agua potable se suele emplear permanganato potásico y se denomina Oxidabilidad. Para aguas residuales domésticas el rango de este parámetro está entre 400-600 ppm, siendo mayor para agua de efluentes industriales. Si la relación DBO/DQO está entre 1-0.6, se considera que el agua contiene materia biodegradable. Si la relación es menor a este rango, se considera que la materia es menos bio-degradable [6].

Carbón Orgánico Total: Mide la contaminación a través de gas carbónico producido durante la calcinación de una muestra catalizada.

Absorbancia UV a 250nm: Mide el carácter óptico que se aplica a aguas transparentes. El estudio de la absorbancia se basa en la absorción de la radiación ultravioleta por parte de la materia orgánica.

Parámetros Biológicos

Coliformes: Generalmente, dada por la bacteria *Escherichia Coli* y otros coliformes o microorganismos capaces de fermentar glucosa y lactosa. Se mide en NMP en 100 ml de agua, por medio de un método estadístico.

Bio-toxicidad: Entre la gama de especies para determinar la bio-toxicidad del agua se encuentran bacterias (*Photobacterium*, *Pseudomonas*, etc.), algas (*Chlorella*, *Dunaliella*), invertebrados

(crustáceos como la *Daphnia*, *Artemia*, *Gammarus*) o peces (trucha, carpa). Este parámetro es común en las aguas residuales.

De acuerdo a la legislación ecuatoriana en el TULSMA³ Libro VI. De la Calidad Ambiental, Anexo 1, los límites máximos permisibles para aguas que requieren sólo tratamiento convencional para agua potable son los expuestos en la TABLA III.

³ Texto Unificado de la Legislación Secundaria del Medio Ambiente

Tabla III: Límites máximo permisibles aguas que únicamente requieren tratamiento convencional

Parámetros	Unidad	Límite Máximo Permissible
Aceites y Grasas	mg/l	0,3
Aluminio	mg/l	0,2
Cloruro	mg/l	250
Cobre	mg/l	1,0
Coliformes Fecales		600
Color	unidades de color	100
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	mg/l	2,0
Dureza	mg/l	500
Manganeso (total)	mg/l	0,1
Materia flotante		Ausencia
Nitrato	mg/l	10,0
Nitrito	mg/l	1,0
Olor y sabor		Es permitido olor y sabor removible por tratamiento convencional
Oxígeno disuelto	mg/l	No menor al 80% del oxígeno de saturación y no menor a 6mg/l
Plata (total)	mg/l	0,05
Potencial de hidrógeno		6-9
Sólidos disueltos totales	mg/l	1 000
Sulfatos	mg/l	400
Temperatura	°C	Condición Natural + o – 3 grados
Turbiedad	UTN	100

Fuente: Ministerio del Ambiente, 2002 [13]

Nota: La tabla completa se encuentra disponible en el APÉNDICE F

2.3 Teoría de la Floculación/Coagulación

2.3.1 Coloides

El agua alberga en suspensión partículas procedentes del suelo (por el arrastre de las corrientes), minerales disueltos y materia orgánica en descomposición ya sea de fuentes naturales en el curso del agua o por vertidos domésticos o industriales. En conjunto éstas son las partículas que se eliminan en el proceso de coagulación – floculación. Mediante el proceso estudiado en la fase experimental de este trabajo, estas partículas son convertidas en partículas insolubles de mayor peso que pueden ser separadas con facilidad del agua con el fin de obtener agua clarificada.

Las partículas forman campos de fuerza en su seno, las que tienen entre 10^{-7} y 10^{-9} m de diámetro forman una solución coloidal [14]. Dentro de un sistema estable, estas partículas pueden mantenerse en suspensión. Cabe recalcar, que ningún sistema de este tipo puede ser completamente estático debido a perturbaciones térmicas y de movimientos brownianos. Aunque este tipo de

soluciones no son “verdaderos coloides” como lo es la leche entre otros, son las características coloidales, las que permiten la suspensión de la materia en el agua. En la mayoría de los casos, las partículas en el agua tienen carga negativa en su superficie [14] lo que causa que se repelan entre sí. Adicionalmente, la interacción entre partículas se ve afectada por las fuerzas de Van der Waals, que son fuerzas de atracción débil y de rango corto.

De manera general, cualquier elemento que aumente la carga de la superficie mantiene las partículas suspendidas. Sin embargo, si se neutralizan las cargas superficiales entonces las partículas se aglomeran y desestabilizan la solución.

Las propiedades físico-químicas presentes en estos sistemas coloidales son afectadas por factores como:

- Tamaño de partícula
- Forma y flexibilidad de la partícula

- Propiedades superficiales
- Interacciones entre partículas
- Interacciones entre las partículas y el disolvente

Así mismo, los sistemas coloidales estables en aguas de río pueden ser tanto hidrofílicos como hidrofóbicos. Según Company (2000) [6] la mayoría de los contaminantes presentes en el agua de cualquier tipo suelen ser de carácter hidrofílico. Sustancias insolubles como arcillas o grasas se encuentran en el grupo de carácter hidrofóbico.

Para explicar la estabilidad de los coloides se debe tomar en cuenta la teoría de la doble capa eléctrica. Las cargas superficiales del coloide atraen iones de carga opuesta que establecen carga neutra entre la partícula y su alrededor inmediato. Dentro de la zona de carga eléctrica neutra se impone una capa difusa de cargas eléctricas que se extiende hasta el seno del agua debido al continuo movimiento de las partículas de agua.

Las zonas que se forman según los potenciales eléctricos, son:

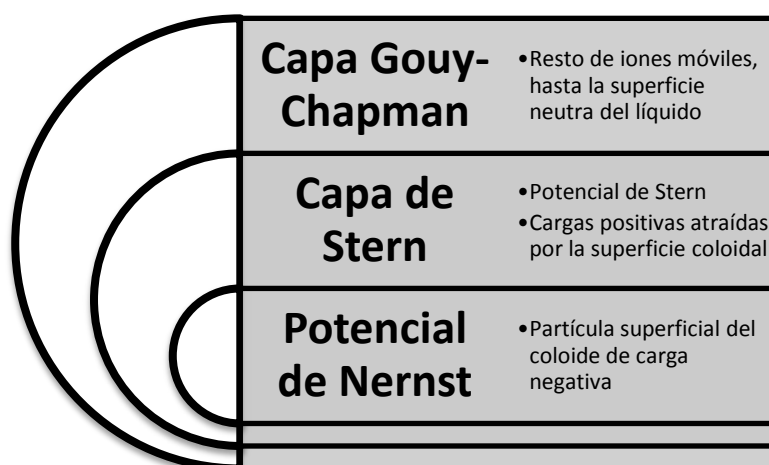


Figura 2-2: Capas y potenciales eléctricos formados en partículas coloidales

En el siguiente gráfico, se presenta un esquema de la distribución de las capas en el coloide negativo. El potencial de Nernst se encuentra en la superficie de la partícula coloidal, y es de carga eléctrica negativa. En la capa de Stern se presenta el potencial del mismo nombre y consta de cargas positivas que son atraídas hacia la superficie coloidal gracias a la superficie negativa del coloide. Finalmente, la capa de Gouy-Chapman es la más alejada de la superficie de la partícula coloidal y está compuesta por iones móviles; esta capa se extiende hasta el seno del líquido.

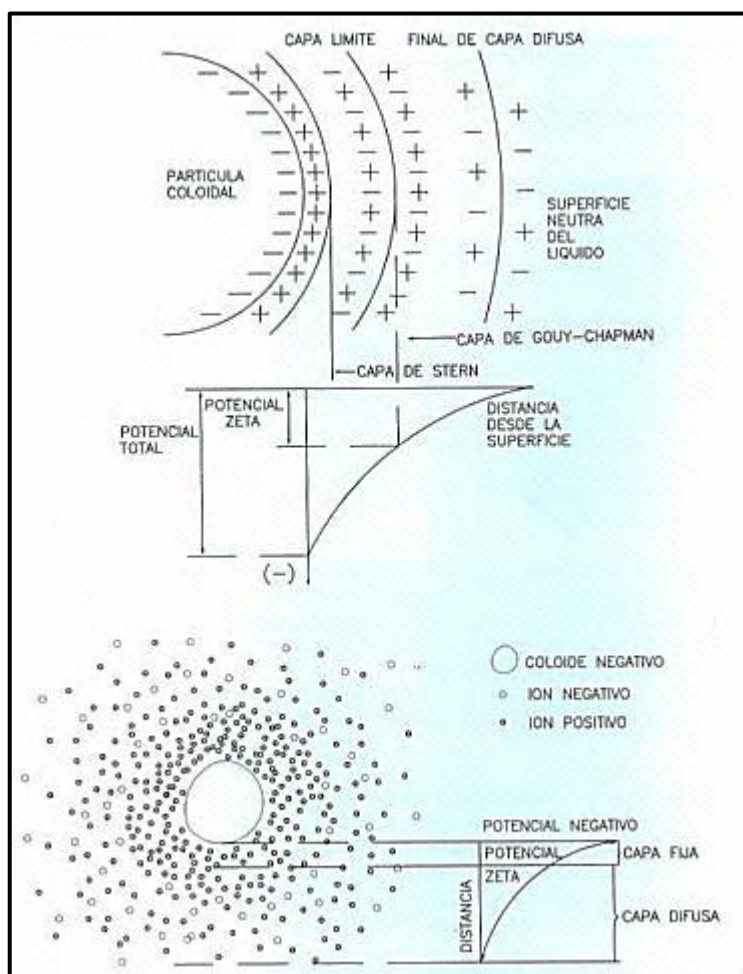


Figura 2-3: Representación de capa de Stern, potencial zeta y doble capa
Fuente: Company, 2000 [6]

En la capa difusa se presenta un umbral, conocido como capa límite, que fija el sector a partir del cual las moléculas permanecen unidas a la propia partícula en su movimiento. La doble capa eléctrica que rodea a cada partícula coloidal crea una zona de potencial eléctrico que es proporcional a la masa de agua existente, esto es que

varía a lo largo de la distancia que separa a la partícula del líquido. Dicho potencial aumenta conforme aumenta la proximidad a la partícula. Entonces se tiene que la superficie coloidal es el potencial total (o de Nernst) y la capa límite de agua adherida a la partícula es el potencial Zeta.

Según NALCO (2009) [14], el potencial Zeta es una medida de la carga electrostática en una partícula, con unidades [mV]. En coloides de agua natural con rango de pH 5-8, el valor usual del potencial Zeta es -14 a -30 mV, la carga de la partícula es proporcional a la negatividad del número. En el proceso de floculación se obtiene un potencial Zeta ligeramente negativo, sin ser necesaria la neutralización completa de la partícula. En caso de que se agreguen coagulantes positivos en demasía, puede ocurrir que la carga se torne positiva y se produzca re-suspensión de los coágulos formados. El potencial Zeta es determinado indirectamente por medio de datos obtenidos mediante la observación del movimiento de la partícula en un microscopio.

Mediante la doble capa y el potencial Zeta es posible impedir la aproximación de las partículas, de tal forma que puedan actuar las fuerzas de atracción de Van der Waals⁴, ocasionando que se agrupen los coloides. Debido a que el potencial electrostático es menor a medida que se aleja de la superficie de la partícula, es más factible conseguir atracción electrostática reduciendo el potencial Zeta, o reduciendo el espesor de capa iónica, el potencial disminuye de forma más rápida según cuán débil es el espesor de la capa iónica.

Desestabilización de los Coloides

La formación de flóculos depende de la capacidad de ruptura de la estabilidad de los coloides. En otras palabras, se puede decir que depende de la posible reducción del potencial Zeta existente entre la partícula y

⁴Las fuerzas de Van der Waals, denominadas de esta forma en honor al científico neerlandés Johannes Diderik van der Waals, son las fuerzas intermoleculares de atracción o repulsión.

la capa límite [7]. Existen dos formas de reducción según el sistema coloidal:

- Compresión del espesor de la capa coloidal por efecto de la adición de contraniones⁵ simples. Esto generalmente se realiza con cationes monovalentes para facilitar la atracción de las partículas cargadas por disminuir la fuerza electrostática repulsiva.
- Adsorción de contraniones en la superficie de la partícula. Es posible con cambios de carga en la partícula en presencia de compuestos adsorbidos. Para esto se emplean especies hidrolizadas de sales bivalentes o trivalentes de alta densidad eléctrica y bajo peso molecular.

En resumen, el espesor de la doble capa y la densidad electrónica superficial inciden sobre la estabilidad de la suspensión. Estos son sensibles a la concentración iónica y valencia de iones presentes en el agua, permitiendo que se modifiquen con contraiones adecuados. Sin embargo, existen otras fuerzas que determinan la desestabilización del sistema coloidal:

⁵ Iones de carga opuesta a los aniones.

Movimiento browniano: Las partículas coloidales se encuentran en estado de constante movimiento. Este movimiento produce colisiones entre las partículas, lo cual ocasiona desprendimientos de energía. Mientras mayor número de colisiones se produzcan, mayor oportunidad de agregación existe; sin embargo, estas colisiones no son suficientes para generar suficiente número de nucleaciones fruto de la colisión en caso de no existir una desestabilización previa del coloide. Las colisiones son creadas mediante hidráulica como flujos, zonas de mezcla rápida o de turbulencia y variando condiciones de agitación [14].

Fuerzas de Van der Waals: La fuerza de Van der Waals se presenta como la fuerza cohesiva atómica existente entre las moléculas es resultante de la atracción entre todos los átomos. Teniendo en cuenta aquello, el efecto agregador o de formación de aglomeración de partículas sólo tiene lugar cuando las fuerzas de atracción superan las fuerzas electrostáticas de repulsión [14].

Fuerza de gravedad: La fuerza de gravedad se presenta en menor escala y se encarga de la sedimentación de las partículas en el agua. Sin embargo, existen partículas que debido a su peso y tamaño necesitarían tiempo infinito.

2.3.2 Proceso de Floculación

El proceso de floculación sigue al de coagulación con el fin de mejorar la decantación de las partículas agrupadas. Se esperan como resultados de una mejor calidad de flóculos, en comparación con los obtenidos solo con coagulación. Las mejoras son referentes al tamaño del flóculo, estructura y rapidez en la formación de los mismos.

Cabe recalcar, que la floculación se diferencia de la coagulación en que éste último conlleva la anulación de fuerzas repulsivas entre las partículas coloidales. Los resultados esperados en la coagulación son micro-flóculos, mientras que los esperados de la floculación son flóculos de mayor tamaño y densidad. La calidad del

flóculo puede ser calificada según el Índice de Willcomb⁶ y el tamaño de diámetro [8].

Los aditivos empleados en el proceso de floculación son denominados coadyuvantes de coagulación o floculantes e interactúan con los coágulos a través de dos pasos:

1. **Neutralización de cargas:** tiene lugar de la misma manera que la neutralización efectuada por sales metálicas durante la coagulación. El floculante es de carga opuesta a la del coloide y, por tanto, lo neutraliza. El efecto es de disminución de las fuerzas repulsivas [14].

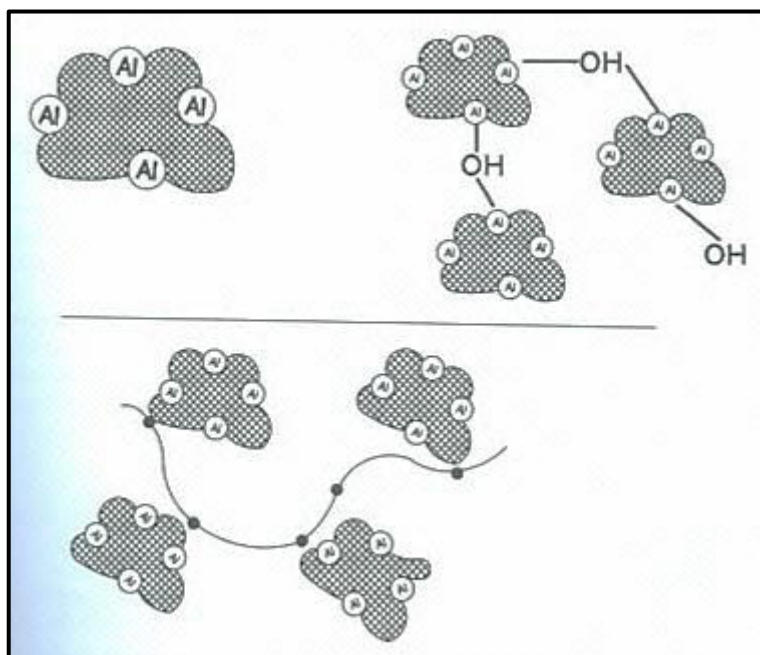
2. **Mecanismos de creación de puentes:** este mecanismo requiere que el polímero (coadyuvante de la coagulación) sea adsorbido por una partícula y cuando otra partícula se encuentre lo suficientemente cercana, se forme un puente físico entre las dos partículas [7]. Así crecen los flóculos, formando puentes con otras partículas

⁶ Índice numérico que asigna un valor cuantitativo a la calidad de los flóculos.

hasta que el flóculo alcance un tamaño óptimo. Para que se lleve a cabo este mecanismo se requiere que el floculante sea adsorbido⁷ por dos o más coágulos. El floculante debe extenderse lo suficiente como para alcanzar otras partículas, a pesar de las fuerzas de repulsión presentes. El polímero adsorbido no debe cubrir la superficie de la partícula completamente; más bien debe dejar un espacio libre suficiente para permitir la adsorción de los polímeros por otras partículas.

En la FIGURA 2-4 se presenta gráficamente la formación de los flóculos mediante coadyuvantes de la coagulación.

⁷ La adsorción es un proceso físico-químico en el cual átomos, iones o moléculas son retenidas en la superficie de un material. El material sólido atrae a la sustancia adsorbida mediante fuerzas electromagnéticas u otro tipo de enlaces químicos.



**Figura 2-4: Representación del proceso de
floculación a nivel de partículas aglomeradas**
Fuente: Company, 2000 [6]

Para que se realice el proceso de floculación, las partículas deben cargarse de energía de tal manera que puedan combinarse para formar flóculos más densos y compactos. La formación de los flóculos es mejorada con la aplicación de agitación, sin embargo, se debe tener en cuenta que los grandes flóculos se pueden romper con facilidad.

Expresando el proceso de floculación de forma matemática, hidráulicamente se habla del gradiente de velocidad que se da entre dos partículas en el seno del fluido, o factor G, y por tanto define la cantidad de choques entre partículas. Este factor está relacionado con la entrada de energía por unidad de volumen según la siguiente ecuación:

$$G = (P/[V \cdot \mu])^{0.5}$$

Donde,

G: gradiente de velocidad, s^{-1}

P: potencia de entrada, $ft \cdot lb/s$, W

V: volumen, ft^3 , m^3

μ : viscosidad, $lb \cdot s/ft^2$, $Pa \cdot s$

El factor G es aplicable tanto para el proceso de floculación como para el proceso de coagulación, siendo

mayor para este último (900/s aproximadamente). Para el proceso de floculación se estiman 200/s en aguas cálidas. El factor G es ampliamente usado para el diseño y dimensionamiento de plantas de tratamiento de agua.

2.3.3 Proceso de Coagulación

La coagulación es un proceso físico-químico mediante el cual se remueve la turbidez y el color producido por, en su mayoría, partículas coloidales. Consiste en la mezcla de un coagulante químico, con la ayuda de agitadores que permitan la correcta dispersión del producto. El propósito general de este proceso es ayudar a la sedimentación de las partículas suspendidas en el agua. A nivel de las partículas coloidales se reducen las cargas eléctricas en la superficie como se aprecia en la FIGURA 2-5.

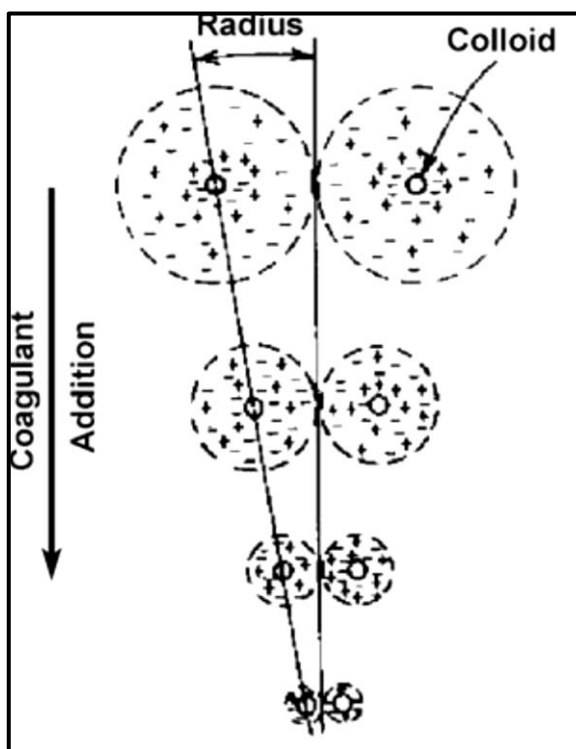


Figura 2-5: Coagulación: adición de coagulantes neutraliza cargas en la superficie coloidal.

Fuente: NALCO, 2009 [14]

Los mecanismos que pueden inducir a la desestabilización del coloide, previo a la aglomeración son:

1. Compresión de la doble capa eléctrica, por adición de electrolitos simples. A partir de esta esta compresión se disminuye la repulsión entre partículas y las fuerzas de Van der Waals provocan

la atracción de las mismas, causando la aglomeración.

2. Adición de sales que actúen directamente sobre el potencial Zeta del coloide. Esto se logra cuando electrolito logra formar partículas de carga positiva que logran ser adsorbidas por la superficie del coloide y reducen el potencial Zeta.
3. Formación de un precipitado por arrastre de partículas. Si el precipitado es un floculo denso, entonces se puede crear una malla que barre al resto de partículas coloidales.

Para lograr la coagulación óptima se requieren sales que tengan iones de menor tamaño relativo. Durante la coagulación se logra desestabilizar las partículas y estas a su vez logran formar flóculos con la ayuda de floculantes. Los resultados obtenidos del proceso de coagulación son básicamente los siguientes:

- Reducción de la turbidez del agua
- Reducción del color

- Reducción de compuestos orgánicos
- Reducción de colonias bacterianas

Se requiere de mezclado para que la adición de coagulantes pueda desestabilizar el sistema coloidal. Para que las partículas se aglomeren, estas deben colisionarse unas con otras y la mezcla genera las colisiones deseadas. Entre los factores que afectan el proceso de coagulación se encuentran los siguientes [3]:

- Características de la fuente de agua
- Temperatura
- Aguas anaeróbicas
- Sólidos Suspendidos

La coagulación y floculación desestabilizan los coloides (jugando con sus cargas), logrando que se agrupen en masas mas grandes y puedan sedimentarse. Esto se

obtiene comúnmente con adicionando agentes floculantes y coagulantes y con mezcla.

Por lo general en los procesos de coagulación y floculación se los lleva a cabo al mismo tiempo, de tal forma que no siempre se detecta la diferencia entre los dos.

Cada proceso tiene sus propias restricciones físicas al momento de ejecutarse, en la TABLA IV se presenta un resumen de estas limitaciones.

Tabla IV: Restricciones entre coagulación y floculación

Variable	Coagulación	Floculación
Naturaleza de los sólidos	Numerosas partículas finas	Geles largos y dispersos
Tipo de químico aplicado	Bajo peso molecular con carga neutralizadora	Aglutinante con alto peso molecular con
Energía requerida	Mezcla rápida	Agitación lenta
Gradiente de velocidad	Alto	Bajo
Tiempo de retención	Segundos	Minutos

Fuente: NALCO, 2009 [14]

Floculantes

Conocidos como polielectrólitos, son cadenas largas de moléculas orgánicas solubles en agua y conformadas por bloques pequeños llamados monómeros. Suelen tener sitio para el intercambio de iones, por lo cual tienen carga iónica. Estas moléculas reaccionan con la materia coloidal neutralizando su carga o creando puentes entre las partículas individuales, para formar precipitados o flóculos [14]. En la actualidad son de origen sintético y pueden actuar solos o como coadyuvantes para coagulación. Los polielectrolitos pueden ser clasificados de la siguiente forma [6]:

- Catiónicos: Cargados positivamente (poliacrilamidas catiónicas y poliaminas).
- Aniónicos: Cargados negativamente (polímeros de acrilamida-acrilato).
- No iónicos: No son polielectrolitos en sentido estricto aunque exhiben en esta categoría (poliacrilamidas).

En la FIGURA 2-6 se muestran las estructuras de los polímeros aniónicos y catiónicos.

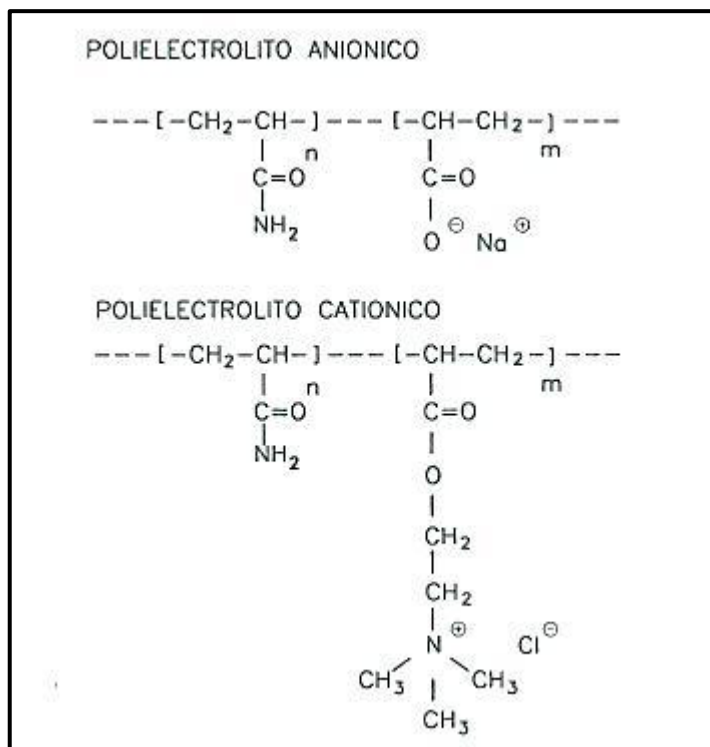


Figura 2-6. Estructuras de polímeros de carácter aniónico y catiónico

Fuente: Company, 2000 [6]

La estructura de este polímero no iónico se presenta en la FIGURA 2-7.

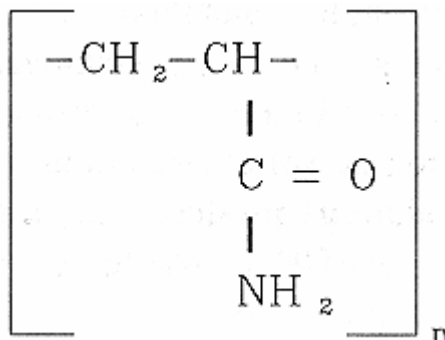


Figura 2-7: Estructuras de polímeros no iónicos

Fuente: Ashland, 2008 [4]

Los polielectrolitos catiónicos son poliaminas que se hidrolizan en agua. Por lo general, son constituidos por copolímeros de acrilamida con monómeros catiónicos y poliaminas. Debido a que la hidrólisis da OH^- , a pH alto se fuerza la reacción y el polímero se vuelve no iónico. La aplicación de los polímeros catiónicos se beneficia en un rango de pH entre 4 y 8 [14].

Los polímeros aniónicos incorporan a su estructura un grupo carboxilo que se ioniza en el agua. En medio ácido los grupos carboxílicos pueden no estar ionizados, de tal forma que no se manifiesta el carácter aniónico del polímero. El pH bajo influye en la reacción transformando el polímero aniónico en no iónico. Presentan la mayor

efectividad con valores de pH en un rango de 7 y 14, aumentando su eficacia con el aumento de la alcalinidad del agua. Por lo general, son formados por copolímeros de acrilamida (acrilato) o poliacrilamidas hidrolizadas. Los polímeros aniónicos son empleados como coadyuvantes de la floculación junto con sales de aluminio debido a que las partículas con carga positiva, se enlazan electrostáticamente con los grupos activos de las moléculas [6].

Los polímeros no iónicos en solución acuosa y pH neutro, en medio ácido o básico pueden adquirir carácter aniónico por hidrólisis parcial de los grupos amida [14]. Los polímeros no iónicos son capaces de absorber partículas positivas como negativas y son especialmente eficaces con pH inferior a 6. Son muy efectivos en suspensiones con alto contenido de sales, es decir, con alta conductividad [6].

Para este trabajo de investigación se emplearon dos polímeros, uno no iónico y otro aniónico.

El Praestol 650 TR es un polímero aniónico cuyo nombre completo es: *1-Propanaminium, N,N,N-trimethyl-3-[(1-oxo-2-propenyl)amino]-, chloride, polymer with 2- propenamide*. Es un polímero de poliacrilamida modificada, mientras el floculante químico es una poliacrilamida de carga neutra. El Praestol 650 TR es un producto seco y el floculante químico es líquido [4].

2.3.4 Coagulantes

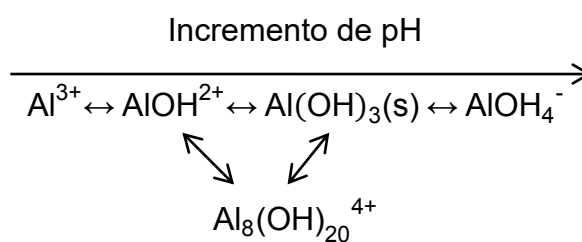
Los coagulantes metálicos como sales de Hierro y Aluminio son los generalmente usados para la remoción de materia orgánica y clarificación de aguas pues tienen la ventaja de trabajar como coagulantes-floculantes al mismo tiempo [7].

Sin embargo, tienen el inconveniente de ser muy sensibles a un cambio de pH. Si éste no se encuentra dentro del intervalo adecuado, el resultado es una pobre clarificación y pueden llegar a solubilizarse [7]. Los coagulantes más utilizados son:

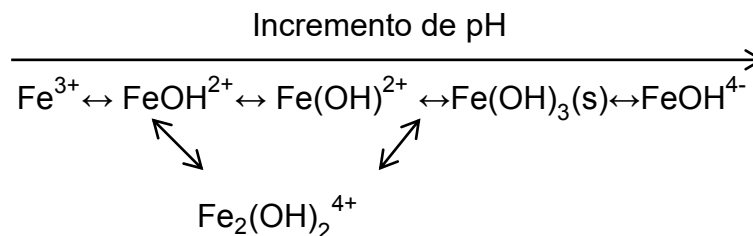
- Sulfato de Aluminio, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$
- Sulfato Férrico, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$
- Cloruro Férrico, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Las sales de aluminio y hierro provocan la formación de iones metálicos hidrolizados y una serie de reacciones de hidrólisis que resultan en complejos con alta carga eléctrica y corto tiempo de vida. A continuación, se presentan las secuencias de reacciones de las sales sulfato de aluminio y cloruro férrico [6].

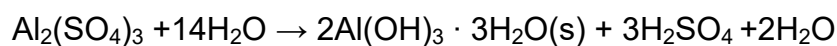
Sulfato de aluminio:



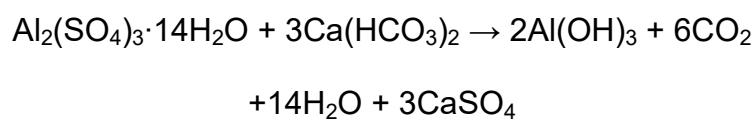
Cloruro férrico:



En contacto con el agua, el sulfato de aluminio se comporta según la siguiente reacción, formando ácido sulfúrico como producto, lo cual produce problemas operacionales como la disolución del precipitado [7].



Si el agua contiene bicarbonatos, en caso de existir el suficiente grado de alcalinidad y correcta formación de CO_2 , se forma la siguiente reacción donde el pH no se disminuye drásticamente y esto no provoca problemas operacionales [7].



El sulfato de aluminio es comercializado en presentaciones sólido o líquido. Para los fines de este trabajo se utilizó sulfato de aluminio líquido. La solución es un líquido ámbar que contiene 8,5% de alúmina. En el caso del tratamiento de agua de la ciudad de Guayaquil, el sulfato de aluminio debe cumplir con las siguientes especificaciones [10]:

- Gravedad específica: 1.315 min.
- Alúmina soluble total como Al_2O_3 : 8% min.
- Hierro soluble total expresado como Fe_2O_3 : 0,35% máx.
- Materia insoluble en agua: 0,20% máx.

2.3.5 Prueba de Jarras

Esta prueba tiene como fin simular la mezcla dentro de la planta de tratamiento de aguas. La prueba contempla parámetros como intensidad de agitación y duración, debido a la incidencia de estos factores en el tamaño y densidad de los flóculos formados gracias al proceso [8]. Mediante las pruebas de jarras se puede determinar las

dosis más efectivas de coagulante para un agua específica. A través de ella también se puede determinar velocidades de sedimentación. El equipo empleado para realizar las pruebas de jarras es descrito en el Capítulo 3 y puede ser observado en la Figura 3-1.

En la Figura 2-9 se presenta la típica secuencia de una prueba de jarras.

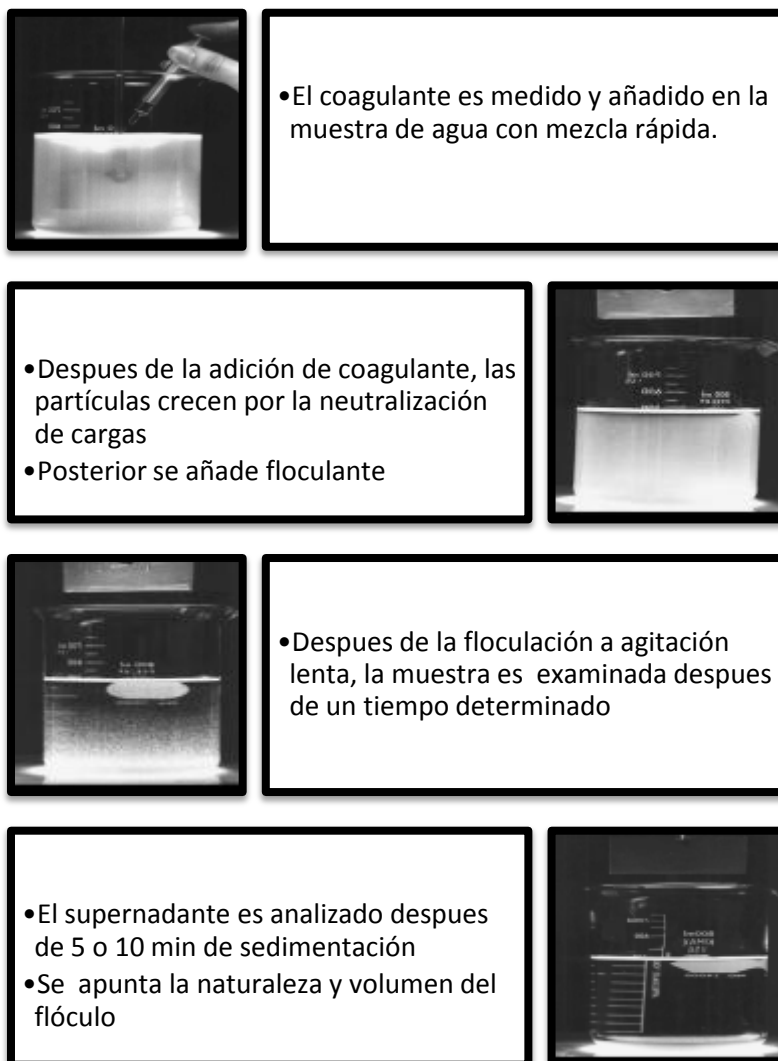


Figura 2-9: Secuencia de la ejecución de una prueba de jarras

Fuente: NALCO, 2009 [14]

Generalmente, los equipos de pruebas de jarras consisten en seis reactores *batch* de dos litros de capacidad volumétrica y agitadores para cada uno. La prueba consiste en agregar las dosis de químicos a cada reactor y

llevarlos a mezcla rápida por un minuto a 100 rpm. Posterior a esto, la mezcla se realiza de forma lenta por 30 minutos a 30 rpm. Una vez terminado el proceso, se debe esperar a que culmine la sedimentación de los flóculos formados. La calidad agua tratada es posteriormente analizada mediante la caracterización de parámetro físico-químicos como pH, sólidos suspendidos, sólidos totales, turbidez, alcalinidad, dureza, salinidad, entre otros. En el Capítulo 3. Metodología se listan y describen los parámetros caracterizados como parte de la presente investigación. Adicionalmente, se indican los métodos de análisis y sus respectivos procedimientos.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

3. METODOLOGÍA

3.1 Colección del Agua a Tratar

Las muestras de agua fueron recogidas en horario de la mañana en el caso del río Daule, en un punto cercano a la fuente de captación de agua “La Toma”. La muestra del Río Babahoyo fue tomada en el pueblo Cortijo Histórico en horas de la tarde. Cabe recalcar que los horarios de toma de muestra correspondieron a marea baja según el Instituto Oceanográfico de la Armada⁸ (INOCAR). Las muestras se recolectaron en el mes de noviembre de 2011, en horas de la mañana con lloviznas precedentes al día de muestreo.

La recolección y análisis de las muestras de agua de río, así como de agua tratada se realizó siguiendo los lineamientos de los *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* 20^{va}. Edición. Las muestras de agua fueron puntuales en los dos casos. El agua de río fue colectada en bidones plásticos de 20 litros, los mismos que fueron lavados en el laboratorio y preparados para lo indicado. Previo a la colección del volumen de

⁸ <http://inocar.mil.ec/>

agua, se realizaron enjuagues in-situ con el agua de río. Después de coleccionar las muestras de agua cruda, éstas fueron mantenidas en refrigeración hasta el momento de su análisis y tratamiento.

El agua tratada, por otra parte, fue coleccionada directamente desde el equipo de jarras, luego de la sedimentación de los sólidos. Los envases para el agua tratada fueron de plástico, lavados y enjuagados con el agua tratada. Estos tenían capacidad para coleccionar medio litro de agua. Se emplearon envases plásticos en todos los casos, debido a que éstos no producen interferencias en los parámetros que fueron caracterizados con posterioridad.

3.2 Recolección de Datos

Se revisó información referente al proceso de floculación y coagulación durante la potabilización del agua. Como fuente de revisión se tomaron en cuenta los procesos empleados para estos fines en la ciudad de Guayaquil por parte de la concesionaria INTERAGUA C. Ltda. Después de reunir la información teórica se procedió a la selección de los floculantes y coagulante a emplear durante la experimentación. Se determinó la variación en la

cantidad de los reactivos empleados y la dosis óptima de coagulante y floculantes mediante las pruebas de jarras. Las pruebas fueron llevadas a cabo como se indica en la Tabla V:

Tabla V: Metodología Empleada en las pruebas de jarras

Fase		RPM	Tiempo (min)
Primera	Mezcla rápida	100	1
Segunda	Mezcla lenta	30	30

Fuente: Yagual, 2012

Las pruebas fueron realizadas usando los reactivos bajo el esquema que se presenta en el APÉNDICE A: Antes y después de las pruebas se realizó la caracterización de los siguientes parámetros físico – químicos del agua cruda y del agua después de cada tratamiento:

- pH
- Sólidos suspendidos
- Sólidos totales

- Turbiedad
- Conductividad
- Dureza

3.3 Equipos Utilizados en los Experimentos

Para la prueba de jarras se empleo un equipo diseñado expresamente con el propósito de realizar este tipo de pruebas.



Figura 3-1: Equipo de prueba de Jarras y sus partes principales

Fuente: <http://www.hach.com>

Las pruebas de jarras pueden ser realizadas con vasos de precipitación y agitadores mecanizados individuales. Sin embargo, para el presente estudio se hizo uso de un equipo especialmente diseñado para este fin. El mismo consta de una serie de agitadores motorizados, la velocidad de los agitadores es regulada por una perilla situada al lado derecho del equipo. La frecuencia de agitación es expresada en Revoluciones por Minuto (RPM) y es presentada en un panel digital. El equipo puede realizar hasta 6 pruebas simultáneas, donde cada jarra de forma cúbica tiene volumen de 2 litros de líquido.

Los equipos y materiales empleados en la caracterización del agua se presentan en la siguiente tabla, ordenados según el parámetro para el que fueron utilizados:

Tabla VI: Materiales y metodología empleada en la caracterización del agua

Parámetro	Materiales y Equipos	Metodología
pH	Medidor de pH digital Sartorius PB-11	SM 4500-H ⁺ B
Sólidos suspendidos	Filtros de fibra de vidrio (0,45 μ m) Bomba de vacío Estufa Desecador Silica Gel Balanza analítica Campana para succión Kitasato Mangueras Vidrio reloj Probeta Pinzas Piseta Agua destilada	SM 2540 D
Sólidos totales	Estufa Balanza analítica Beaker Probeta Agua destilada Pinzas Piseta	SM 2540 B
Turbiedad	Medidor de turbiedad digital	SM 2130 B
Conductividad	Medidor de conductividad digital	SM 2510 B
Dureza	Bureta Matraz Soporte universal Indicador Negro de Eriocromo T EDTA	SM 2340 C

Fuente: Yagual, 2012

3.4 Métodos y Procedimientos Empleados en la Caracterización del Agua

Prueba de Jarras

La prueba de jarras se llevó a cabo con el procedimiento que sigue los lineamientos de la norma ASTM D2035-80:

- a) Preparar los seis vasos del equipo, agregando en ellos 2 litros de agua a tratar.
- b) Añadir diferentes dosis del coagulante y de los floculantes.
- c) Agitar de forma enérgica (100 rpm) durante 1 minuto y a continuación de una forma más lenta (30 rpm) durante 30 minutos.
- d) Finalizado el periodo de agitación, levantar el agitador, teniendo cuidado de no romper los flóculos formados, y dejar sedimentar por 20 minutos.
- e) Tomar una muestra de cada vaso para medir los parámetros de caracterización.

Como bitácora se mantuvieron registros en base al formato disponible en el APÉNDICE B.

Parámetros Caracterización del Agua

pH: La medición del potencial de Hidrógeno en las muestras de agua se llevó a cabo mediante el uso de un equipo medidor de pH, el cual consiste en un electrodo que es sumergido en la muestra para su posterior lectura.



Figura 3-2: Equipo de medición de pH

Fuente: Yagual, 2012

Para estas mediciones se empleó un electrodo de vidrio que contiene solución electrolítica, cloruro de potasio (KCl), en su interior. La medición y el equipo empleado se ajustan a la norma establecida en el Manual *SM 4500- H^+ B*. El procedimiento se efectuó de la siguiente manera:

- a) Calibrar el equipo con soluciones *buffer* de pH definido 4,1; 7,0 y 10,1.
- b) Una vez calibrado, enjuagar el electrodo con agua destilada hasta que no queden residuos de la sustancia de almacenaje o calibradora.
- c) Insertar el electrodo en la muestra de agua.
- d) Apuntar la lectura del equipo

Sólidos Suspendidos: Los sólidos suspendidos se caracterizaron según lo indicado en la norma 2540 D del *SM*. El procedimiento empleado se detalla como sigue:

- Preparación del Filtro de Fibra de Vidrio (0,45 μm)
 - e) Insertar el disco con la cara rugosa hacia arriba en el aparato de filtrado.
 - f) Filtrar al vacío y lavar el disco con tres volúmenes sucesivos de 20 ml de agua destilada. Continuar succionando hasta eliminar todo vestigio de agua

- g) Quitar el filtro del aparato de filtrado, trasladar a un vidrio reloj o crisol.
- h) Secar en el horno a 103 – 105°C durante una hora.
- i) Enfriar en un desecador para equilibrar la temperatura y luego pesar.
- j) Repetir el ciclo de secado, enfriamiento, desecado y pesado hasta obtener un peso constante o hasta que la pérdida de peso sea menor de 0,5 mg entre pesadas sucesivas. Consérvese en el desecador hasta que se necesite.
- k) Comprobar el peso inmediatamente antes de usar.

- Preparación del Patrón de Control

Pesar $0,350 \pm 0,0005$ g de Silicato de Aluminio en un vaso de precipitados de 100 ml. Trasvasar la sal a un matraz aforado de 1000 ml, asegurándose de no dejar restos en el vaso. Enrasar con agua destilada a 1000 ml. Esta solución contiene 350 mg/l de sólidos en suspensión.

- Determinación de las Muestras

- a) Armar el aparato de filtrado y el filtro. Agitar fuertemente la muestra hasta lograr su homogeneización.

- b) Filtrar el volumen medido de muestra bien mezclada por el filtro de fibra de vidrio y el vacío.
- c) Lavar tres veces con volúmenes sucesivos de 10 ml de agua destilada, permitiendo el drenaje completo del filtro entre los lavados y succionar durante tres minutos después de terminar el filtrado.

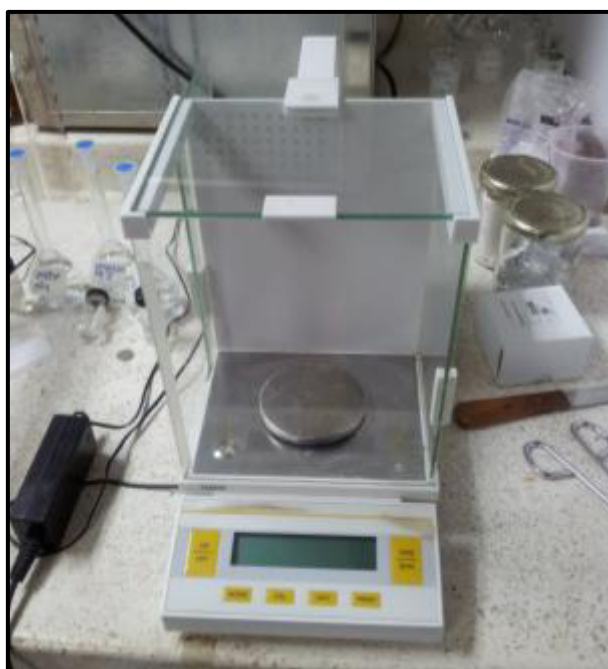


Figura 3-3: Balanza analítica
Fuente: Yagual, 2012



Figura 3-4: Filtros de fibra de vidrio
Fuente: Yagual, 2012



Figura 3-5: Equipo de succión al vacío
Fuente: Yagual, 2012



Figura 3-6: Estufa
Fuente: Yagual, 2012

- d) Separar cuidadosamente el filtro del aparato y trasladar a un vidrio de reloj.
- e) Secar en el horno a $103 - 105\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante una hora como mínimo y dejar enfriar en el desecador y pesar.
- f) Repetir el ciclo de secado y enfriamiento, hasta obtener un peso constante o hasta que la pérdida de peso sea menor del 4 por 100 del peso previo o menor de 0,5 mg, escoger la menor de ambas.

Sólidos Totales: El procedimiento fue realizado en concordancia con SM 2540 B y se describe de la siguiente forma

- Preparación del Vaso
 - a) Lavar el vaso de precipitación para eliminar residuos y enjuagarlo con agua destilada.
 - b) Secar en la estufa a $103 - 105^{\circ}\text{C}$ durante una hora.
 - c) Enfriar en el desecador para equilibrar la temperatura y pesar.

- d) Repetir el ciclo de secado, enfriamiento, desecación y pesado hasta obtener un peso constante o hasta que la pérdida de peso sea menor de 0,5 mg entre pesadas sucesivas. Consérvese en desecador hasta que se necesite.
- e) Comprobar el peso inmediatamente antes de usar.

- **Determinación de las Muestras**

- a) Agitar fuertemente la muestra hasta lograr su homogeneización.
- b) Medir el volumen deseado
- c) Colocar el volumen de agua medido en el vaso.
- d) Secar en la estufa a 103 – 105 °C durante 24 horas, dejar enfriar en un desecador y pesar.
- e) Repetir el ciclo de secado, enfriamiento, desecación hasta obtener un peso constante o hasta que la pérdida de peso sea menor del 4 por 100 del peso previo o menor de 0,5 mg, escoger la menor de ambas.

Turbidez: El método empleado para determinar la turbidez en las muestras es el método Nefelométrico y está descrito a detalle en el *SM 2130 B*. Para la aplicación de este método se empleó un turbidímetro. Este equipo permite leer la turbidez mediante comparaciones de la dispersión de la luz entre la muestra y un patrón, a condiciones determinadas en el laboratorio. Durante la aplicación del mismo se tuvo cuidado con burbujas y otras interferencias al método. El procedimiento se describe según lo siguiente:

- a) Agitar la muestra gentilmente, esperar que las burbujas de aire desaparezcan.
- b) Colocar la muestra en la celda de medición, limpia y seca para proceder a la lectura del equipo.
- c) Apuntar la lectura del equipo

Conductividad: Este parámetro fue medido con un equipo medidor de conductividad, el mismo que permite la compensación automática de temperatura. El equipo sigue las directrices del *SM 2510 B*. El procedimiento de medición fue el siguiente:

- a) Colocar la muestra en la celda de medición, limpia y seca.

- b) Enjuagar tres veces el sensor de conductividad con la muestra.
- c) Colocar el sensor dentro de la muestra.
- d) Apuntar la lectura del equipo.

Dureza: La dureza se analizó de acuerdo al *SM 2340 C*. Este método corresponde a un proceso de titulación con EDTA. Como indicador se usó el Negro de Eriocromo T. Luego de preparadas todas las soluciones de reactivos, esto es la solución buffer de pH 10 (cloruro de amonio e hidróxido de amonio), solución de EDTA e indicador.

- a) Armar el sistema de titulación compuesto por pinzas, nueces, sostenedor universal, matraz de Erlenmeyer y bureta.
- b) Escoger el volumen de la muestra a analizar y colocarla en el matraz.
- c) Adicionar 2 o 3 gotas de indicador y 1 ml de solución buffer.
- d) Registrar el volumen inicial de EDTA.

- e) Titular con EDTA gradual y lentamente, agitando la muestra de forma continua.
- f) Verificar el volumen final de EDTA una vez haya cambiado la muestra de púrpura a azul.

3.5 Procesamiento de Datos

Los resultados obtenidos de las pruebas de jarras, es decir los parámetros de calidad del agua medidos fueron ordenados y recopilados a fin de facilitar el análisis de los mismos.

Para la determinación de la dosis óptima de coagulante y floculantes se hizo uso de gráficos Turbidez Vs. Dosis. Con estos gráficos se pudo apreciar y analizar el comportamiento de la turbidez en relación a las dosis de reactivos aplicados. Adicionalmente, se realizaron gráficos que relacionan las dosis con potencial de hidrógeno, conductividad, sólidos suspendidos y sólidos disueltos. De esta forma se analizó el efecto de los reactivos sobre los distintos parámetros de calidad del agua.

Se escogió la turbidez como parámetro de respuesta para la determinación de la dosis óptima de reactivos. Esto debido a la importancia del mismo en la calidad del agua potable. Se debe tener en cuenta que la turbidez del agua potable entregada a los usuarios no debe sobre pasar los 5 NTU según la norma NTE INEN 1108:2011 para la calidad del agua potable.

La eficiencia del proceso fue determinada mediante el porcentaje de remoción de turbidez. La ecuación correspondiente para este porcentaje es la siguiente:

$$\% \text{ remoción} = \frac{\text{turbidez inicial} - \text{turbidez final}}{\text{turbidez inicial}} \times 100\%$$

3.6 Comprobación de la Hipótesis

Para la comprobación de la hipótesis se siguió el siguiente diseño experimental:

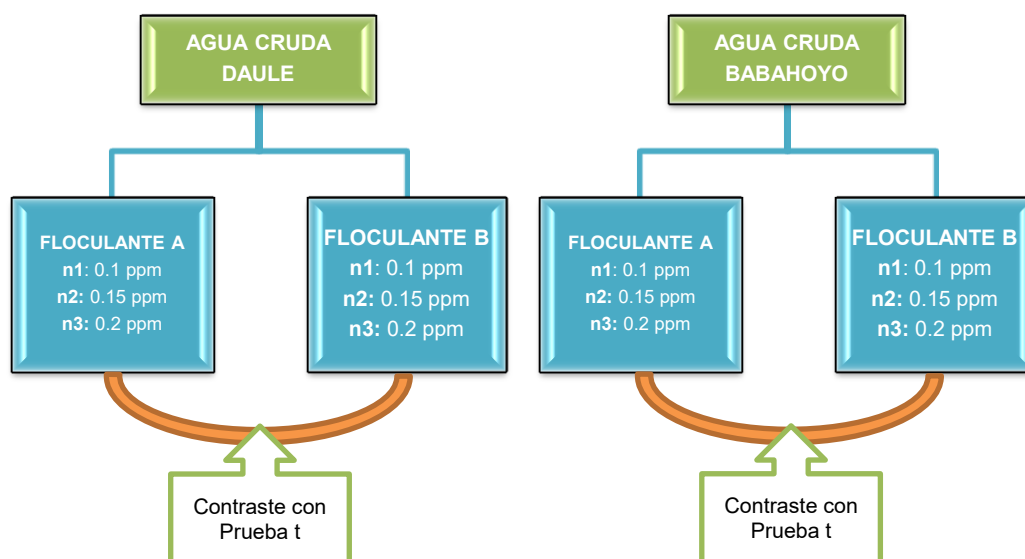


Figura 3-7: Diseño experimental
Fuente: Yagual, 2012

A fin de verificar la hipótesis planteada se practicó la prueba estadística *t*. Dentro del análisis quimiométrico, esta prueba es empleada para determinar si los métodos empleados producen resultados significativamente diferentes. La prueba pareada permite identificar diferencias separando el método de aplicación de un tratamiento y los métodos o tratamientos aplicados [12]. Es decir, para los fines de este estudio se verifica si es estadísticamente significativa la diferencia entre los resultados obtenidos con Praestol y el floculante químico artesanal, a distintas concentraciones de los mismos.

Para contrastar los datos se observa la diferencia, d , entre cada par de resultados dados por los dos floculantes. Si no existen diferencias entre los dos resultados, entonces estas diferencias se obtienen de una población media, $\mu_d=0$. Para probar la hipótesis nula, se prueba si $\bar{d}$ difiere significativamente de cero utilizando el estadístico t [12].

El cálculo del estadístico t en el caso de resultados emparejados se define por la siguiente ecuación:

$$t = \bar{d} \sqrt{n} / S_d$$

Donde $\bar{d}$ y S_d son la media y la desviación estándar, respectivamente, de d , la diferencia entre los valores pareados.

El número de grados de libertad de t es $n-1$.

Si el valor calculado de $|t|$ es menor al valor crítico tabulado de t , entonces no se rechaza la hipótesis nula que sostiene lo siguiente:

H₀: $\mu_d=0$, no existe diferencia estadísticamente significativa en los niveles de remoción de turbidez obtenidos como resultado de la aplicación de los distintos floculantes.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS

El detalle de los resultados y datos colectados se encuentra disponible en el APÉNDICE C del presente documento. A continuación se presenta un resumen de los resultados por experimento realizado:

Tabla VII: Resumen de resultados obtenidos en la caracterización del agua posterior a su tratamiento con agentes coagulantes y floculantes

Prueba	pH		Turbidez NTU		SST ppm		ST ppm		Conductividad (uS/cm)		Dureza (mg/l de CaCO ₃)	
	$\bar{x}$	Sd	$\bar{x}$	Sd	$\bar{x}$	Sd	$\bar{x}$	Sd	$\bar{x}$	Sd	$\bar{x}$	Sd
1(a)	4,7	0,8	22,8	15,8	40,8	2,2	232,0	97,0	322,3	149,9	0,6	0,1
2(b)	4,6	0,5	3,3	2,8	45,0	5,1	209,7	76,9	220,0	72,0	0,5	0,0
3(c)	4,8	0,8	14,1	17,2	35,8	4,0	232,0	71,6	213,0	70,8	0,5	0,0
4(d)	4,5	0,6	34,6	26,8	37,5	5,4	244,2	100,8	244,4	90,1	0,5	0,0
5(f)	4,6	0,5	19,9	15,1	54,8	7,4	76,3	57,0	174,8	105,1	0,4	0,1
6(g)	4,5	0,4	14,4	7,1	44,8	4,6	181,8	65,7	204,5	79,8	0,5	0,0
7(h)	4,5	0,7	8,8	5,0	50,7	11,5	181,7	57,5	247,0	115,4	0,5	0,0
8(i)	4,4	0,6	22,1	13,3	45,2	4,0	199,2	65,1	259,3	116,3	0,5	0,1
9(j)	4,7	0,6	8,5	4,9	38,8	1,6	938,0	83,4	2037,7	213,1	1,6	0,2
10(k)	4,8	0,6	11,6	8,9	34,8	3,2	900,8	54,1	1985,3	209,1	1,9	0,5
11(l)	4,7	0,6	10,5	8,8	42,6	1,8	1076,5	72,5	2001,5	214,0	1,6	0,2
12(m)	4,7	0,6	10,6	10,0	42,3	2,9	1003,0	35,5	2023,5	147,7	2,3	0,3
13(n)	4,7	0,6	11,5	10,2	49,8	5,5	956,3	80,4	1989,7	221,4	1,7	0,3
14(o)	4,7	0,5	4,5	2,8	42,5	1,9	914,8	79,3	1978,7	215,2	1,7	0,1
15(p)	4,6	0,6	4,1	1,2	45,3	3,6	974,5	69,1	2012,3	239,5	1,5	0,0

Fuente: Yagual, 2012

4.1 Observaciones

Durante la ejecución de las pruebas de jarras se observó lo siguiente:

Flóculos

Se percibieron notables diferencias entre los flóculos generados con el Praestol y los generados en presencia del floculante químico. La diferencia consistía primordialmente en el tamaño, siendo de mayor consistencia y tamaño los flóculos obtenidos con Praestol. Cabe notar que los flóculos producidos por el floculante químico eran similares a los vistos en las pruebas realizadas con sulfato de aluminio únicamente.

Adicional a esto, los flóculos producidos con Praestol tendían a unirse entre sí formando cadenas; este fenómeno no sucedía con el uso del floculante químico. En las FIGURAS 4-1 y 4-2 se puede apreciar la diferencia entre los flóculos formados en la agitación por cada reactivo con agua del Río Daule y Babahoyo.



**Figura 4-1: Flóculos
formados con floculante
químico (RD)**
Fuente: Yagual, 2012



**Figura 4-2: Flóculos
formados con Praestol
(RD)**
Fuente: Yagual, 2012



**Figura 4-3: Flóculos
formados con floculante
químico (RB)**
Fuente: Yagual, 2012



**Figura 4-4: Flóculos
formados con Praestol
(RB)**
Fuente: Yagual, 2012

Según la FIGURA 4-5 el tamaño de los flóculos formados con floculante químico se encuentra en el rango de 1.5-2.25 mm de diámetro y los formados con Praestol en el orden de 3.0-4.5 mm, difiriendo entre sí en razón 1:2.

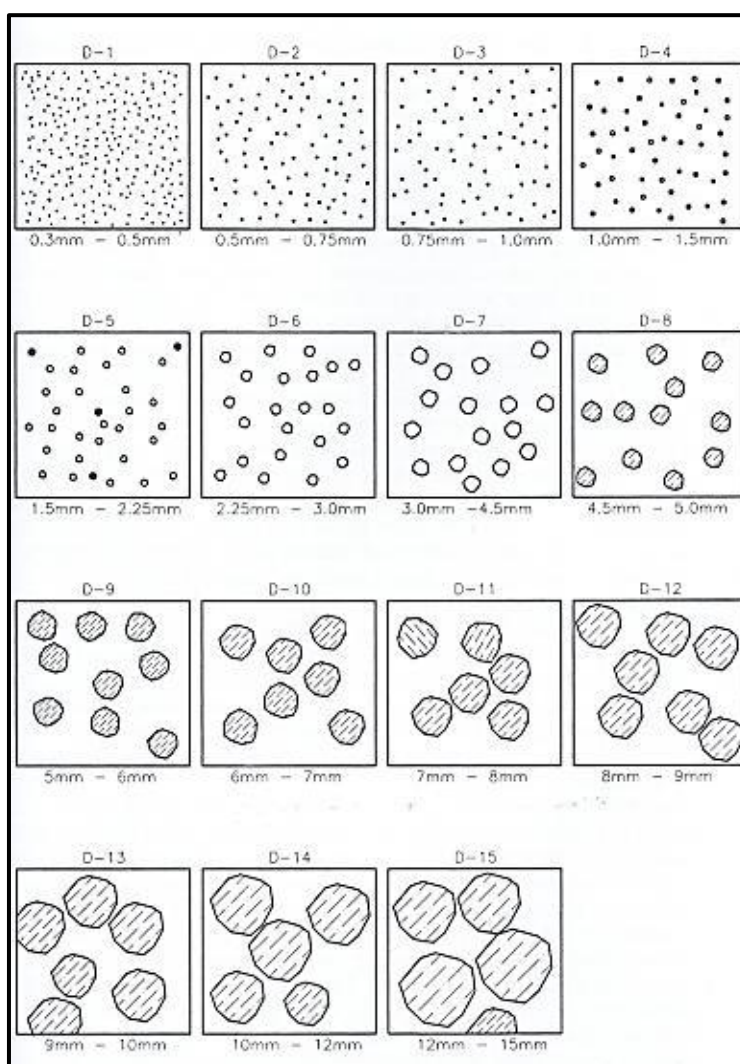


Figura 4-5: Comparación de la dimensión del flóculo

Fuente: Company, 2012 [6]

Debido a la alta turbidez inicial del agua del Rio Babahoyo, en las pruebas realizadas con esta agua se formó mayor cantidad de flóculos.

Con respecto al Índice de Willcomb, según la definición presentada en la TABLA VIII, los flóculos observados con Praestol entran dentro de la categoría 8. Por otro lado los flóculos formados con el floculante químico son de índice 4.

Tabla VIII: Índice de Willcomb

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

Fuente: Giordani, 2008 [8]

Tiempo de Sedimentación

El tiempo de sedimentación para todas las jarras varió entre 5-7 minutos. Los mayores tiempos se apreciaron en las jarras con altas dosis de sulfato de aluminio, siendo esto independiente del coadyuvante de coagulación empleado. Sin embargo, en jarras con bajas dosis de sulfato de aluminio y Praestol, se observó que los flóculos se sedimentaban formando más aglomeración en el centro de la jarra durante la agitación.

Remoción de Turbidez

Visualmente la cantidad de sólidos sedimentados se encontraba en alrededor de 1mm de altura en las jarras cúbicas. Al final de las pruebas se pudo observar agua clarificada, con ciertas partículas o flóculos pequeños suspendidos en la capa superior del volumen de agua. El agua proveniente del Río Babahoyo era visiblemente más turbia que la del Río Daule, sin embargo el tratamiento logró clarificarla notablemente. Las FIGURAS 4-6, 4-7, 4-8, 4-9 presentan ejemplos de agua clarificada de las distintas fuentes respectivamente con floculante químico y Praestol.



Figura 4-6: Agua clarificada con Floculante químico (RD)

Fuente: Yagual, 2012

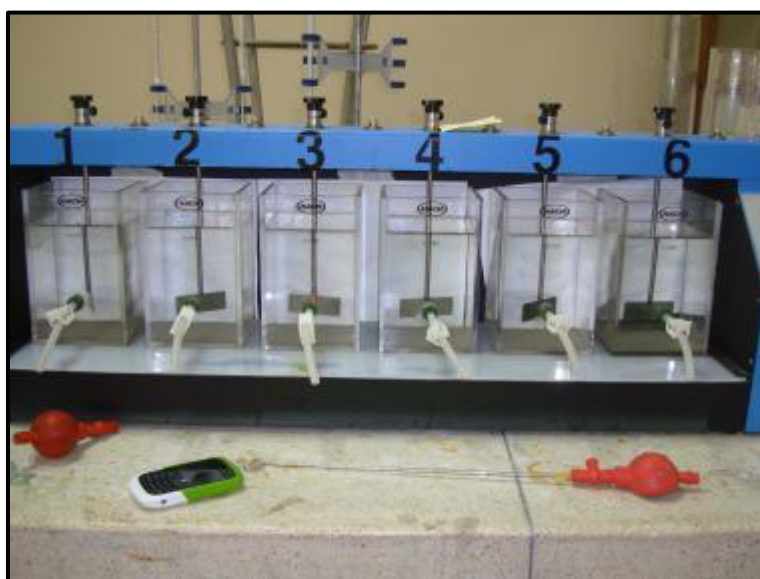


Figura 4-7: Agua clarificada con Praestol (RD)

Fuente: Yagual, 2012

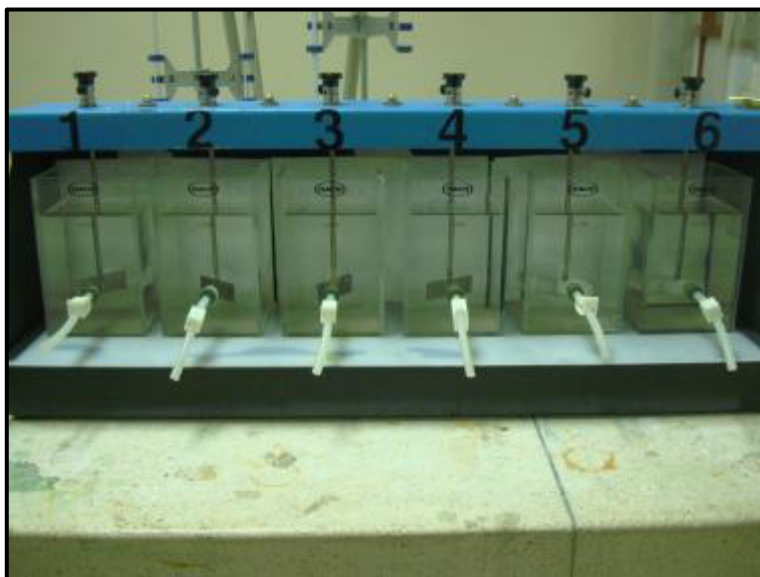


Figura 4-8: Agua clarificada con floculante químico (RB)

Fuente: Yagual, 2012

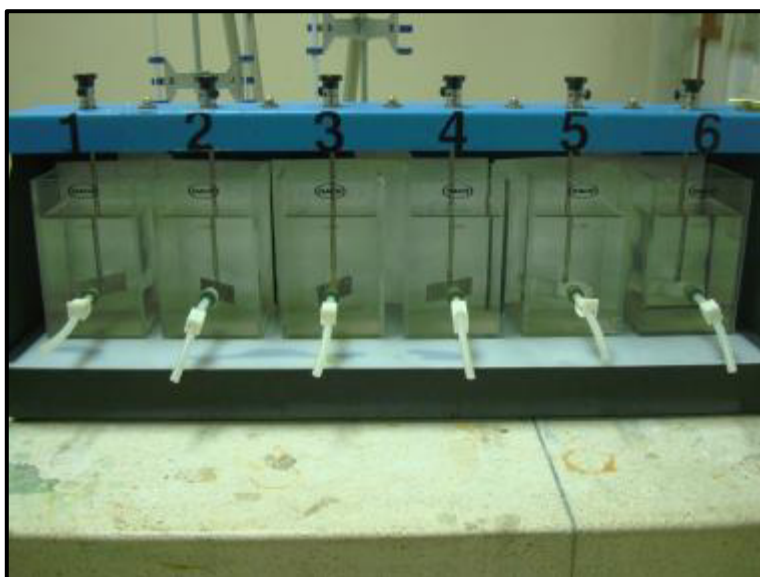


Figura 4-9: Agua clarificada con Praestol (RB)

Fuente: Yagual, 2012

En comparación con las jarras de menor dosis de sulfato de aluminio, se visibilizaba mayor grado de turbidez en las jarras con mayor dosis del reactivo. Esto se debe al efecto de re-suspensión que ocurre cuando la carga de la superficie de las partículas coloidales contenidas en el agua se vuelve positiva. Como se analizó en el Capítulo 2, la superficie de sustancias coloidales contenidas en el agua cruda suele ser de carga eléctrica negativa. El sulfato de aluminio provee la carga positiva necesaria para la neutralización de cargas en la superficie coloidal. Al existir un exceso de sulfato de aluminio, la carga del sistema coloidal se convierte en positiva de tal forma que las partículas llegan a repelerse entre sí, lo cual genera el efecto de re-suspensión.

4.2 Determinación de la Dosis Óptima de Reactivos

Para el análisis de dosis óptima se ha decidido emplear la turbidez como parámetro de control, ya que el uso de sustancias coagulantes y floculantes afectan directamente a este parámetro. Para obtener la dosis óptima se toma en cuenta la dosis que remueva la mayor cantidad de turbidez.

Se debe tener presente que la finalidad de este tratamiento es para agua potable, es decir, agua destinada al consumo humano. Este aspecto es importante debido a que la calidad del agua potable es regulada a través de normas como la Norma NTE INEN 1108:2011 dentro del Ecuador. Dicha norma estipula, entre otros parámetros de calidad, que la turbidez debe ser de máximo 5 NTU. Sin embargo, el valor promedio de turbidez que la empresa encargada entrega después de su tratamiento llega a 3 NTU. Por lo tanto, a fin de mantener el estándar de calidad ya impuesto en Guayaquil, 3 NTU será el valor referencial empleado para la determinación de la dosis óptima tanto de coagulante como floculantes.

La turbidez inicial de las distintas fuentes de agua fue:

- Río Daule: 50 NTU
- Río Babahoyo: 100 NTU

Estos valores se encuentran dentro del máximo permisible establecido en el TULSMA Anexo 1 del Libro VI para aguas que requieren únicamente tratamiento convencional.

El valor de la turbidez en el río Daule concuerda con los valores referenciales para este cuerpo de agua, que se manejan en la planta de tratamiento de “La Toma” en Guayaquil. Durante época seca, el valor tiende a ser 30 NTU y en época húmeda la turbidez llega a los 100 NTU. La época en la cual se tomaron las muestras de los dos cuerpos de agua fue de transición pues ya se habían dado lloviznas que no son comunes de época seca.

Es necesario determinar la dosis idónea de coagulante para luego poder encontrar la dosis apropiada de floculante o polielectrolito. Esto es debido a que con una buena coagulación se puede obtener un mejor proceso de floculación.

En los análisis gráficos referentes, tanto al coagulante como al floculante, no se han aplicado líneas de tendencia pues éstas alcanzan valores por debajo de cero. Los valores negativos en las líneas de tendencia se producen debido a la naturaleza de los valores graficados, es decir números positivos cercanos a cero. No sería aplicable emplear una ecuación de línea de tendencia que arroje rangos negativos debido a que no se ajustarían a la realidad, que la turbidez se mide en valores positivos.

4.2.1 Dosis Óptima de Coagulante

Las FIGURAS 4-10 y 4-11 presentan gráficamente los resultados obtenidos de los test de jarras realizados únicamente con sulfato de aluminio en aguas del Río Daule y Babahoyo respectivamente.

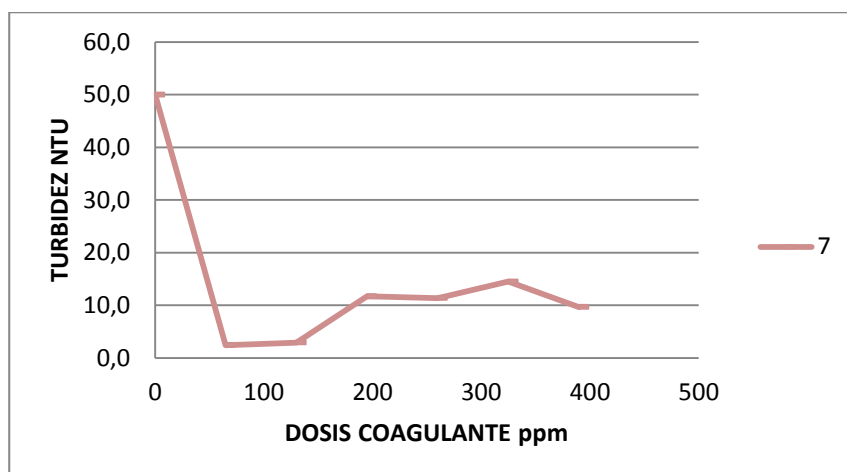


Figura 4-10: Turbidez vs. dosis de sulfato de aluminio en agua de RD
Fuente: Yagual, 2012

La prueba de jarras 7, con agua del Río Daule, se realizó solo con presencia del coagulante sulfato de aluminio. La gráfica muestra la prueba realizada con seis diferentes concentraciones del coagulante. Del gráfico se determina que los menores datos de turbidez ocurren en el intervalo

de 65 ppm a 130 ppm. En estos dos puntos la turbidez es 2,4 NTU y 2.9 NTU respectivamente. Dichos valores cumplen con el estándar propuesto de 3 NTU de turbidez. A partir de 130 ppm, la turbidez aumenta con el aumento de la dosis suministrada hasta llegar a 14.5 con 325 ppm de coagulante.

Del gráfico se puede suponer que la dosis óptima para el agua en estas condiciones se encuentra entre 60 – 65 ppm. Con esta concentración se logra obtener la mayor disminución de turbidez de las muestras analizadas.

Cabe indicar que no se realizaron pruebas con dosis menores a fin de comprobar que la dosis óptima sea incluso menor a la indicada en este estudio. Sin embargo, en la planta “La Toma” se emplean hasta 120 ppm del mismo coagulante empleado para la remoción de turbidez con niveles de 100 NTU, lo cual confirma que la dosis indicada es aceptable.

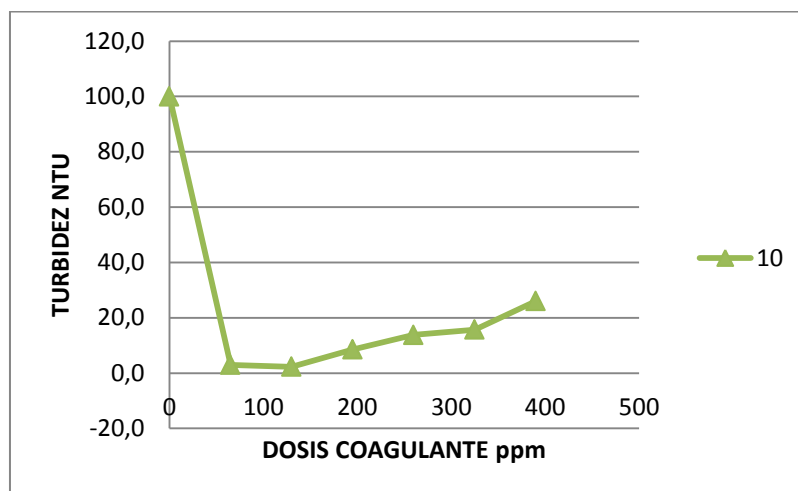


Figura 4-11: Turbidez vs. dosis de sulfato de aluminio en agua de RB

Fuente: Yagual, 2012

La prueba de jarras correspondiente al Río Babahoyo mediante la aplicación de dosis de sulfato de aluminio es la representada en la FIGURA 4-11. El gráfico muestra una tendencia similar a la observada en la FIGURA 4-10, donde a partir de aproximadamente 150 ppm de sulfato de aluminio se genera el efecto indeseado de incremento de turbidez. Este efecto se genera por la re-suspensión de sólidos, debido a un exceso de cargas positivas por parte del coagulante. La mayor turbidez (26 NTU) registrada en este ensayo fue con la mayor dosis de coagulante (390 ppm).

El intervalo de dosis donde se presentan los menores niveles de turbidez, por debajo o igual a 3 NTU, es el comprendido entre 65 y 130 ppm. Los valores de turbidez correspondientes a estas dosis son 3 y 2,3 NTU.

La dosis óptima para este ensayo y con miras al ahorro del reactivo, se encuentra entre 100 y 130 ppm del producto. En este rango se pueden obtener valores por debajo de los 3 NTU de turbidez según la tendencia de la gráfica.

Según lo observado en las gráficas, no se obtienen los resultados deseados con dosis altas de sulfato de aluminio. Más allá de eso, la cantidad de este coagulante puede ocasionar otro problema, que es un resultado indeseado, que es el exceso de aluminio residual en el agua tratada final. Por tal motivo, países como España han restringido el uso de sulfato de aluminio con fines de potabilización de aguas hasta 150 ppm⁹.

⁹ Lista Positiva de Aditivos Alimentarios Tomo II.

4.2.2 Dosis Óptima de Floculante

Habiéndose determinado la dosis óptima de coagulante, se determina la dosis de floculante que mejor trabaja con la dosis óptima de coagulante.

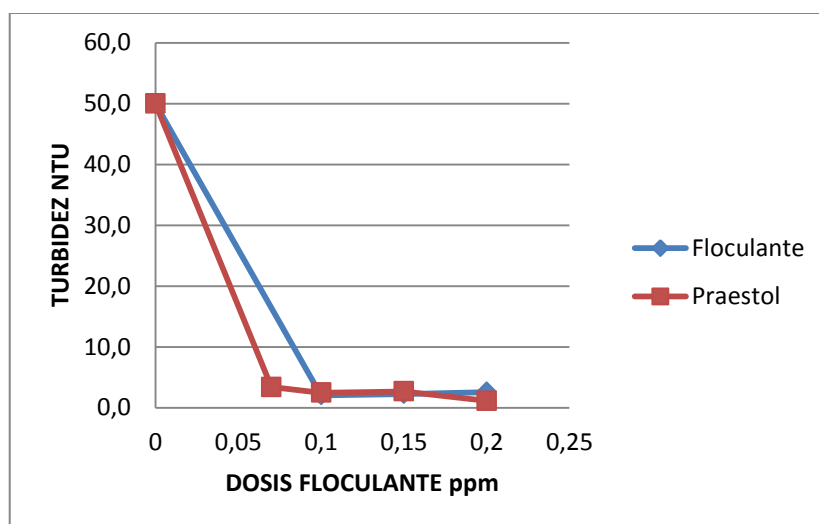


Figura 4-12: Turbidez vs. dosis de floculantes en agua de RD con 65 ppm, dosis óptima, de sulfato de aluminio

Fuente: Yagual, 2012

En la FIGURA 4-12 se presenta el comportamiento de la turbidez en presencia de 65 ppm de coagulante y diferentes dosis de coadyuvantes de coagulación en agua del río Daule. La turbidez se mantiene cerca de los 3 NTU para todas las dosis de los reactivos empleados,

presentando un comportamiento similar para las dos curvas. Según los ensayos realizados y lo representado en la figura, no disminuye la turbidez con el aumento en la dosis de los reactivos, simplemente se mantiene. Por tal motivo se determina que la dosis óptima de floculante es la misma para los dos reactivos y es 0,1 ppm. Se realizó un ensayo con menor dosis que la determinada como óptima, a 0,07 ppm para verificar si se mantienen los resultados. La respuesta fue un nivel de turbidez ligeramente más alto que sobrepasa el valor establecido de 3 NTU y corresponde a 3,4 NTU.

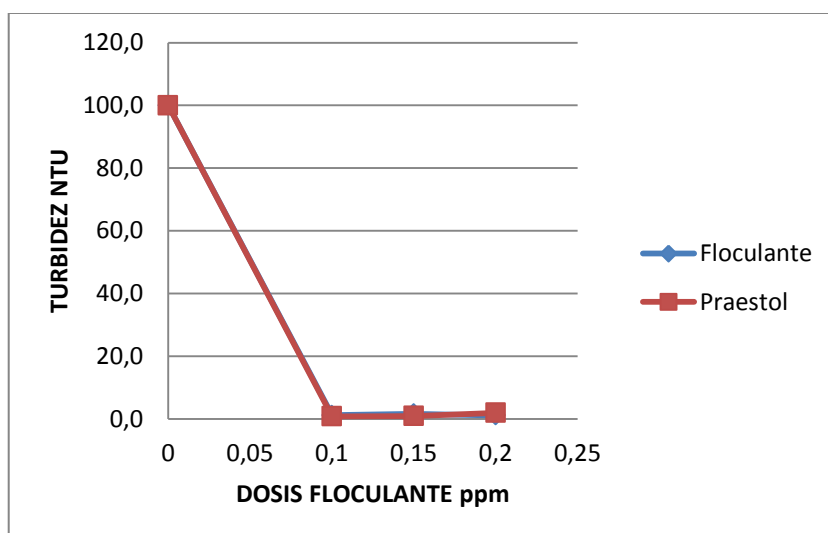


Figura 4-13: Turbidez vs. dosis de floculantes en agua de RB con 130 ppm, dosis óptima, de sulfato de aluminio

Fuente: Yagual, 2012

En el agua del río Babahoyo se determinó que la dosis óptima de coagulante se encontraba dentro de 100 y 130 ppm, para efecto de los ensayos se realizaron las pruebas con los floculantes en presencia de dosis de 130 ppm de sulfato de aluminio.

Los resultados se observan en la FIGURA 4-13. El comportamiento de las dos curvas para floculante químico y Praestol es el mismo. En este caso la turbidez se mantiene cerca de 1 NTU sin variaciones significativas con el aumento de la dosis. Se destaca que en este caso se obtiene un mayor porcentaje de remoción que en las aguas del río Daule. De igual forma se determina que la dosis óptima para los dos reactivos es la misma. La dosis óptima es 0.1 ppm, tanto de Praestol como de floculante químico.

Es interesante observar cómo se relacionan los floculantes con distintas dosis de sulfato de aluminio. En la FIGURA 4.14 se presentan las curvas de turbidez con dosis de coagulante inferior a la óptima (65 ppm) para el agua del

río Babahoyo. La eficiencia disminuye pues se requiere mayor cantidad de producto para conseguir el menor nivel de turbidez obtenido con la dosis óptima.

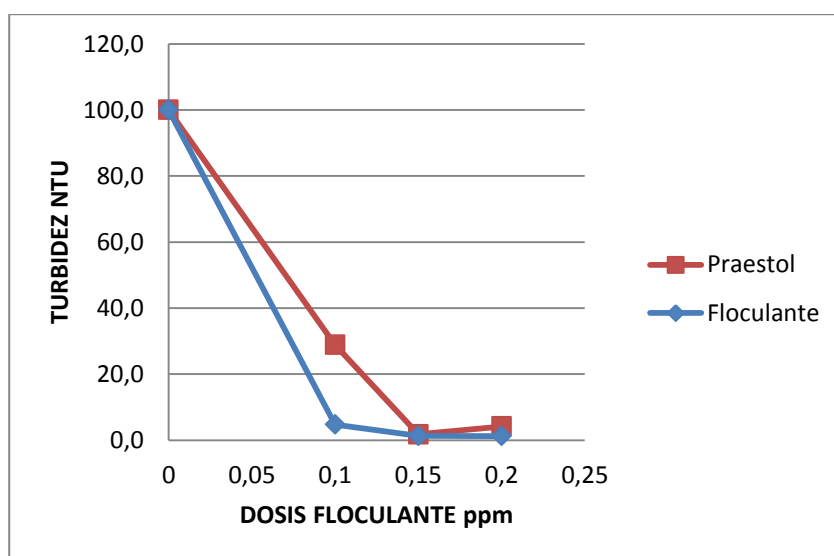


Figura 4-14: Turbidez vs. dosis de floculantes en agua de río Babahoyo con 65 ppm de sulfato de aluminio
Fuente: Yagual, 2012

Por otro lado, en las FIGURAS 4-15 y 4-16 se muestra que el comportamiento de los floculantes es errático con altas dosis de sulfato de aluminio. Cabe recalcar que el Praestol, con agua del río Babahoyo no pierde su comportamiento habitual en grandes dosis del coagulante, sin embargo los niveles de turbidez alcanzados, cercanos a 4 NTU, están por encima del aceptado.

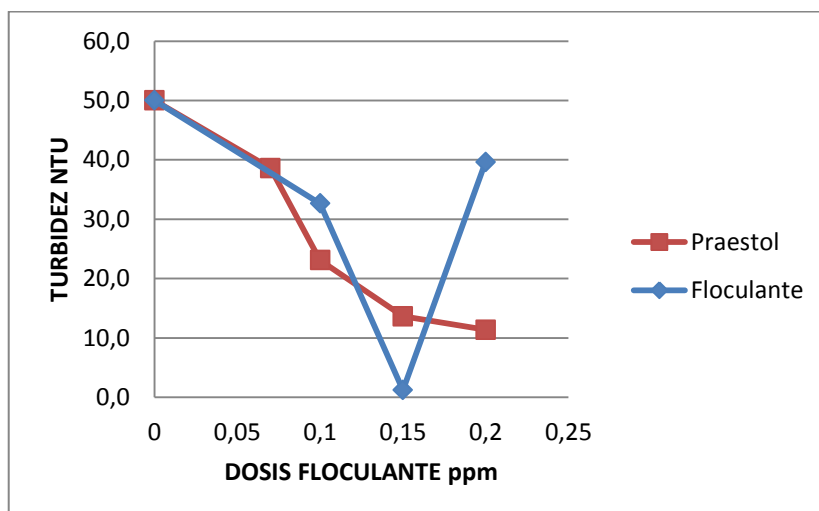


Figura 4-15: Turbidez vs. dosis de floculantes en agua de río Daule con 260 ppm de sulfato de aluminio
Fuente: Yagual, 2012

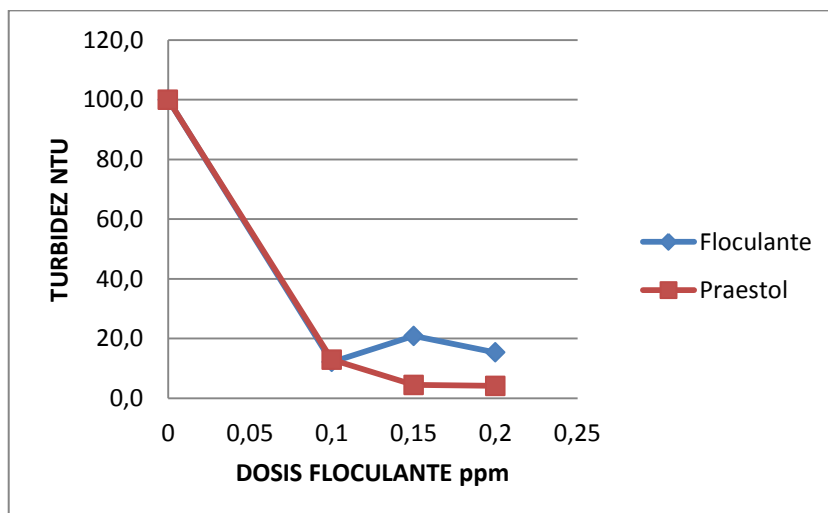


Figura 4-16: Turbidez vs. Dosis de floculantes en agua de río Babahoyo con 260 ppm de sulfato de aluminio
Fuente: Yagual, 2012

4.3 Influencia en Otros Parámetros de la Calidad del Agua

4.3.1 Potencial de Hidrógeno

En este tipo de ensayo el pH se ve afectado principalmente por la adición del coagulante sulfato de aluminio. En la Figura 4-17 se puede observar que las curvas de pH mantienen un mismo comportamiento para las dos aguas trabajadas. El pH va decreciendo a medida que aumenta la dosis; sin embargo, este comportamiento no implica que sea estrictamente decreciente pues por la naturaleza logarítmica del pH llega un momento en que éste deja de bajar. Se debe indicar que los floculantes no alteran significativamente el pH del agua.

Para las dosis óptimas determinadas se obtienen valores de pH de 6 y 5 para el río Daule y Babahoyo respectivamente. Estos valores se encuentran por debajo de lo establecido en la Norma NTE INEN 1108:2011 para agua potable, que es de 6.5 – 8.

El nivel de pH en el agua fue 7 antes del tratamiento. Este nivel de pH permite un buen funcionamiento del

coagulante; sin embargo, debido a su naturaleza el coagulante hace que el pH del agua baje. Para evitarlo, se podría regular el agua con cal (aproximadamente 3 ppm en el caso del río Daule y 6 ppm en aguas del río Babahoyo), de tal forma que después del tratamiento el agua quede con pH permitido. Es importante tener presente que el nivel de pH influye en la eficiencia del tratamiento de coagulación/floculación, sin embargo, detalles sobre esto no forman parte del objeto de este estudio.

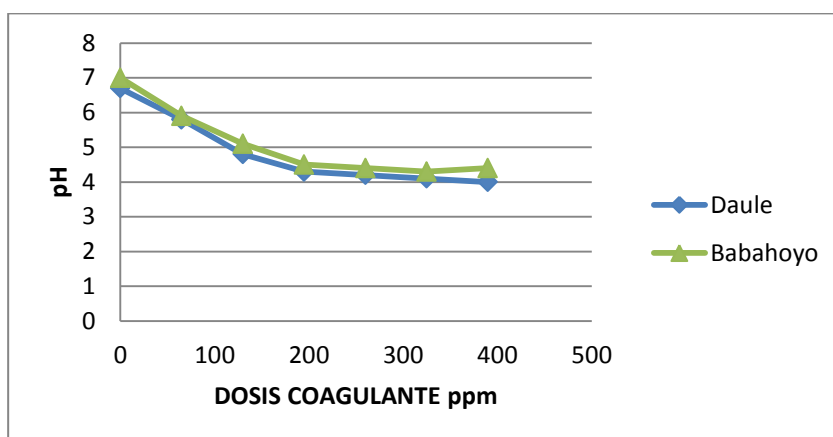


Figura 4-17: pH vs. dosis de sulfato de aluminio
Fuente: Yagual, 2012

4.3.2 Conductividad

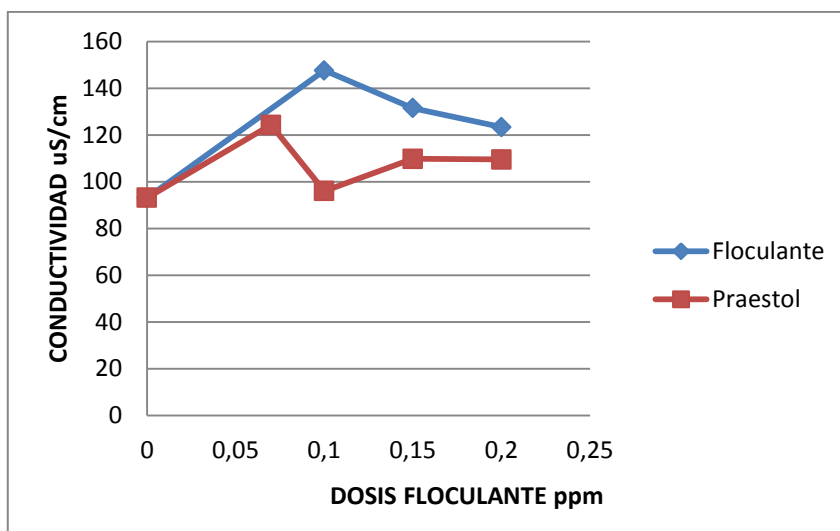


Figura 4-18: Conductividad vs. dosis de floculantes en dosis óptima de coagulante para RB

Fuente: Yagual, 2012

La conductividad sigue patrones similares según el agua de donde provienen. En el caso del río Babahoyo, los valores aumentan y luego del máximo decrecen hasta un valor mayor al de la conductividad inicial. Lo contrario ocurre con el agua del río Babahoyo, donde la conductividad decrece hasta alcanzar un mínimo y luego aumenta de forma estrictamente creciente.

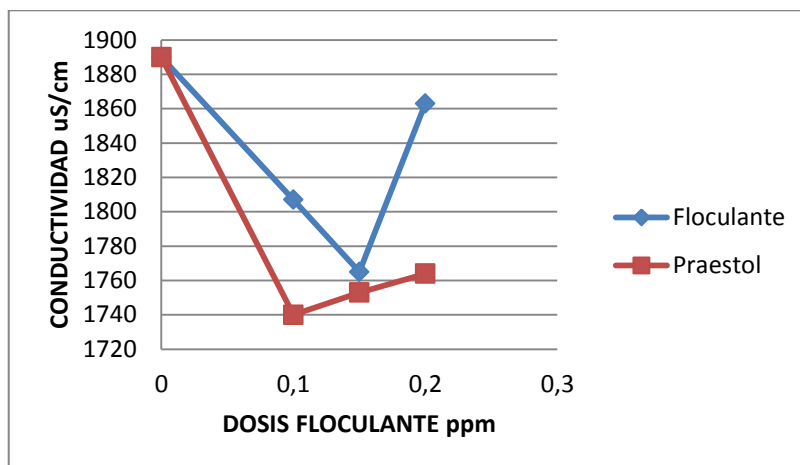


Figura 4-19: Conductividad vs. dosis de flocculantes en dosis óptima de coagulante para RB

Fuente: Yagual, 2012

El comportamiento de la conductividad puede estar asociado a la presencia del coagulante, que es una sal y aumenta la conductividad del agua en la cual esta disuelta.

4.3.3 Sólidos Suspendidos

Las figuras presentan el comportamiento de los SST según la variación de las dosis de floculantes. Estos gráficos guardan mucha similitud con los obtenidos para turbidez en la determinación de la dosis óptima de floculantes. Esto es debido a que la turbidez guarda relación directamente proporcional con los SST. Por este motivo, los sólidos suspendidos podrían ser empleados como parámetro de control para la determinación de dosis óptimas. Sin embargo, este parámetro no es regulado a diferencia de la turbidez.

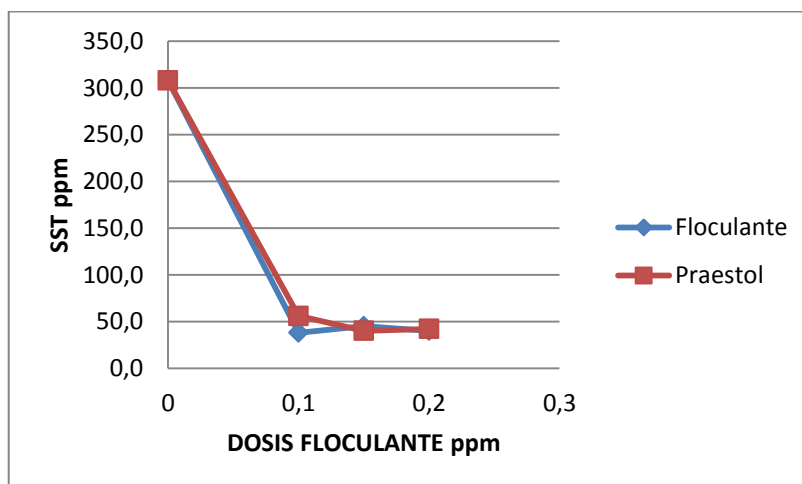


Figura 4-20: SST vs. dosis de floculantes en dosis óptima de coagulante para RB

Fuente: Yagual, 2012

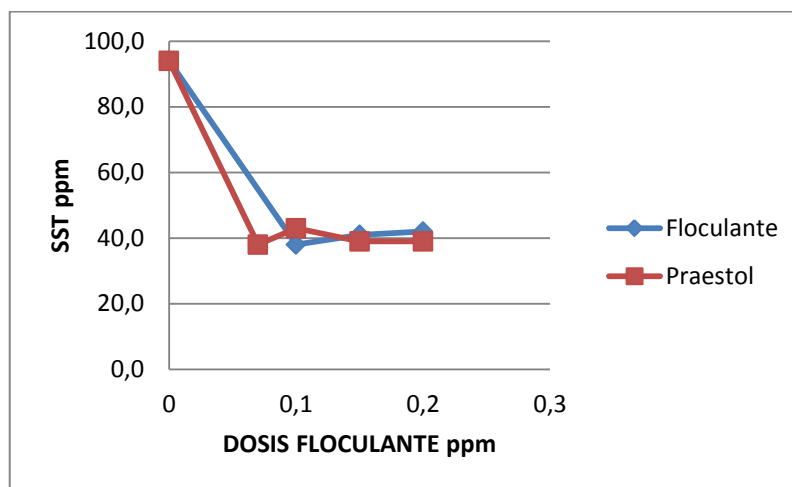


Figura 4-21: SST vs. dosis de floculantes en dosis óptima de coagulante para RD

Fuente: Yagual, 2012

4.3.4 Sólidos Totales

Los sólidos totales a diferencia de los sólidos suspendidos si difieren en su comportamiento con relación a las curvas de turbidez. En las FIGURAS 4-22 Y 4-23 se puede observar que para los casos con cada reactivo existe un pico de ST en el cual se alcanza un mínimo. Este pico es más pronunciado en el caso del Praestol con agua del río Daule. Después de este pico el crecimiento de la curva es monótonamente creciente. El pico se podría explicar debido a la cantidad de sólidos suspendidos removidos con el tratamiento, el aumento que le procede se lo podría inferir al aumento de ST.

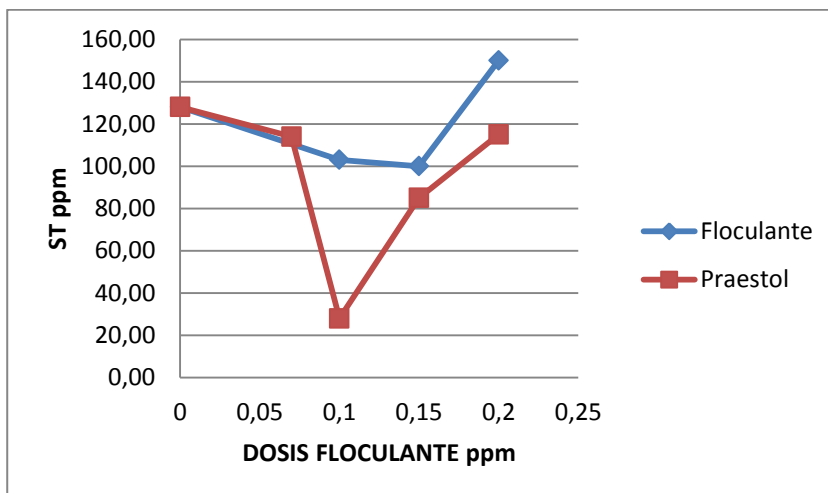


Figura 4-22: ST vs. Dosis de floculantes en dosis óptima de coagulante para río Daule
Fuente: Yagual, 2012

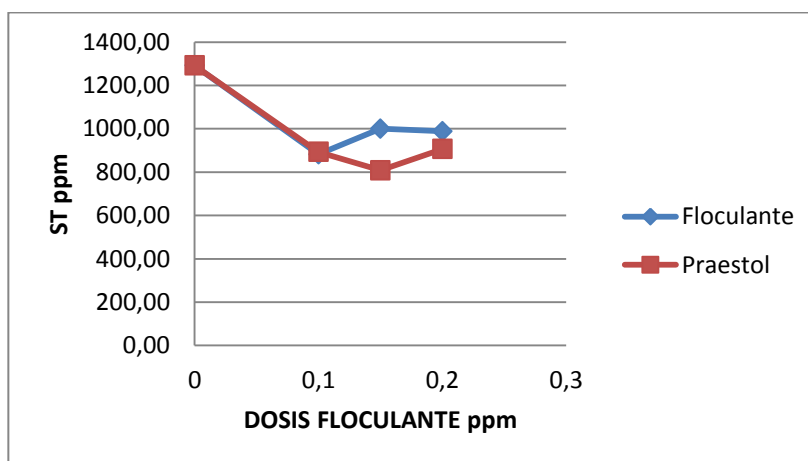


Figura 4-23: ST vs. Dosis de floculantes en dosis óptima de coagulante para río Babahoyo
Fuente: Yagual, 2012

4.3.5 Dureza

La dureza no sufrió cambios durante el tratamiento. Esto era esperado debido a que los reactivos no contenían iones Mg^{++} o Ca^{++} y no se añadió cal al proceso. Los valores promedios de la dureza total en el río Daule es 254 mg/l de $CaCO_3$ y la del río Babahoyo es 761 mg/l de $CaCO_3$.

4.4 Comprobación Estadística de la Hipótesis

A fin de comprobar la hipótesis se calculó el porcentaje de remoción de turbidez para los resultados obtenidos en las dosis óptimas de Praestol y floculante químico según la fuente de captación del agua. En la TABLA IX se presentan los resultados del cálculo realizado.

Tabla IX: Eficiencia por % de remoción de turbidez en dosis

Río Daule		Río Babahoyo	
% Remoción Floculante Q.	% Remoción Praestol	% Remoción Floculante Q.	% Remoción Praestol
95,9	95,0	98,8	99,2
95,5	94,6	98,3	99,1
94,8	97,7	98,9	98,1

Fuente: Yagual, 2012

La FIGURA 4-24 presenta de manera gráfica los resultados de porcentaje de remoción de turbidez, obtenidos aplicando la dosis óptima de sulfato de aluminio (65 ppm) y las respectivas variaciones en la concentración de floculante químico no comercial y Praestol (0,1 ppm, 0,15 ppm, 0,2 ppm).

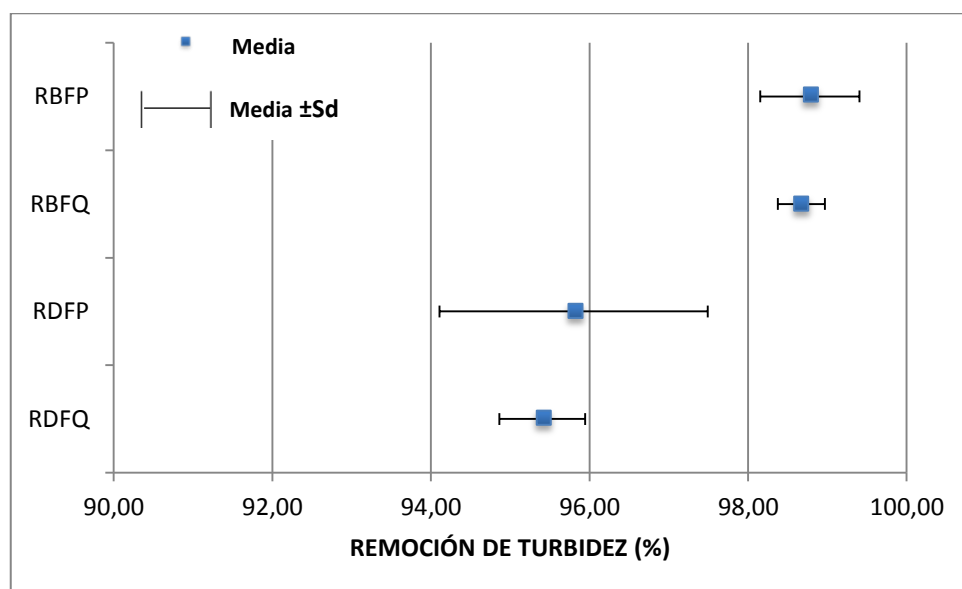


Figura 4-24: Remoción de turbidez obtenida en las pruebas ejecutadas para las muestras de río Daule (RD) y río Babahoyo (RB) mediante la aplicación de floculante químico (FQ) y floculante Praestol 650 TR (FP)

Fuente: Yagual, 2012

Para aplicar la ecuación correspondiente a la prueba t , se requiere determinar la diferencia d entre cada par de resultados por cada fuente de agua cruda. Una vez obtenida la diferencia se calcula la media aritmética de las diferencias $\bar{d}$ encontradas y su respectiva desviación estándar S_d

Tabla X: Diferencia entre pares de resultados por fuente de agua cruda, media y desviación estándar

Fuente de Captación	d			$\bar{d}$	S_d
Río Daule	0,9	0,9	-2,9	0,4	2,18
Río Babahoyo	-0,4	-0,8	0,8	-0,1	0,81

Fuente: Yagual, 2012

Entonces para el río Daule se tiene que:

$$t = 0,4\sqrt{3}/2,18$$

$$t = -0,31$$

Para el río Babahoyo se tiene que:

$$t = -0,1\sqrt{3}/0,81$$

$$t = -0,23$$

Para el 95% de confianza y $n=3$ (2 grados de libertad), la tabulación indica que el valor crítico de t es 4,3 (ver APÉNDICE D). Por lo tanto se cumple para las fuentes de agua cruda que $|t| \leq 4,3$ y no se rechaza la hipótesis nula.

Al no rechazarse la hipótesis nula, no hay diferencia significativa entre los dos grupos. Es decir, los dos productos ofrecen la misma eficiencia estadísticamente para las dos fuentes de agua cruda.

4.5 Consideraciones

Aunque estadísticamente no se presenten diferencias significativas entre los resultados obtenidos con cada floculante, es necesario recalcar que los flóculos obtenidos con el Praestol 650 TR fueron de mejor calidad y consistencia. Esto se aprecia cuantitativamente, a través del diámetro del flóculo e índice de Willcomb. La calidad del flóculo formado incide directamente en la operación del sistema de tratamiento de agua. Es decir, flóculos de buena calidad, al sedimentarse con facilidad, disminuyen tiempos de retención y por tanto aumentan la eficiencia global del

sistema de tratamiento, disminuyendo el costo global por potabilización del agua.

Otro factor que se debe tener presente es el costo de los reactivos. Es probable que un floculante elaborado dentro del país sea más económico que uno importado. Sin embargo, es necesario analizar si representa un ahorro global para el proceso. Es decir, el costo por kilogramo de producto puede ser menor, pero la operación con el mismo pudiera ser de costos elevados. La operación comprende el tipo de decantadores utilizados, clarificadores y tipo de agitación.

De manera general, los costos totales implicados en la potabilización de agua, sin considerar la distribución de la misma, dependen de la secuencia del tratamiento seguido en la planta de tratamiento, lo cual es relacionado con la calidad del agua cruda. La relación es directamente proporcional a la calidad del agua; por ejemplo, mientras mas materia en suspensión se encuentre presente en el agua, será necesaria mayor cantidad de reactivos coagulantes y floculantes para su clarificación. Sin embargo, a medida que aumenta la capacidad productiva de una planta de

tratamiento, disminuyen relativamente los costos por reactivos de amplio uso.

Por lo expuesto se puede definir que, en términos operativos y sus costos asociados, el Praestol 650 TR, presenta una mejor alternativa de reactivo como polielectrolito en el proceso de potabilización del agua del río Daule y Babahoyo.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se pudieron determinar las dosis óptimas del coagulante sulfato de aluminio, el floculante químico y el polielectrolito Praestol 650 TR. Estas dosis corresponden a 65 y 130 ppm para aguas del río Daule y Babahoyo respectivamente, así como 1.0 ppm de los floculantes empleados en todos los casos.

También se estudió el efecto de los reactivos coagulantes y floculantes en la calidad del agua tratada. Es decir, se representó gráficamente el comportamiento de parámetros como potencial de hidrógeno, conductividad, sólidos en suspensión, sólidos disueltos y dureza con respecto a la dosis de los reactivos analizados.

Se pudo comprobar que altas concentraciones de sulfato de aluminio producen un efecto indeseado y perjudican el funcionamiento correcto de los coadyuvantes de la coagulación. Las concentraciones máximas recomendables para el uso de sulfato de aluminio son de hasta 200 ppm. Al emplear sulfato de aluminio se debe tener presente el aluminio residual. Se recomienda para futuros estudios, seguir ahondando en el tema del aluminio residual en tópicos sobre nuevas tecnologías para

eliminarlo y porcentaje presente después del tratamiento de agua, sobre todo si es para fines de potabilización de agua ya que el aluminio es un metal que tiene alta toxicidad.

Se lograron alcanzar porcentajes de remoción superiores al 90 % de turbidez y en valores absolutos correspondientes a valores menores o cercanos a 3 NTU según lo revisado en el análisis de resultados, y en cumplimiento con la Norma NTE INEN 1108:2011.

Mediante la prueba estadística aplicada, prueba t , se evidenció que la hipótesis de que el floculante químico es más eficiente que el floculante Praestol en condiciones de laboratorio y para cada fuente de agua empleada, es falsa. Esto quiere decir que el floculante químico de carga neutra no es más eficiente que el Praestol, más bien, no hay diferencia significativa entre el desempeño de estos reactivos desde el punto de vista estadístico. Sin embargo, cabe mencionar que en este punto las implicaciones económicas del uso de cada reactivo dictarían la decisión de cual se debe emplear o no.

Finalmente, se comprobó que el tratamiento es eficiente para las dos fuentes de captación. Se debe tener presente que los niveles de turbidez del río Babahoyo pueden subir significativamente durante época húmeda, dejando obsoleto o poco eficiente el tratamiento aplicado en este estudio.

Es recomendable que se realicen más estudios que abarquen las demás variables del sistema de tratamiento y parámetros de calidad del agua, como microbiología, a fin de que se considere el río Babahoyo como fuente de captación para aguas de consumo humano. Adicionalmente, estudios específicos sobre la floculación mediante distintas formas de operación podrían verificar si es posible aumentar la eficiencia de los reactivos investigados en este trabajo.

APÉNDICE A

Dosis de Reactivos Empleados en los Experimentos

	Prueba	Jarra	Dosis (ppm)		
			Sulfato Aluminio	Floculante Químico	Praestol
AGUA CRUDA RÍO DAULE	1(a)	1	65	0,1	-
		2	130		-
		3	195		-
		4	260		-
		5	325		-
		6	390		-
	2(b)	1	65	0,15	-
		2	130		-
		3	195		-
		4	260		-
		5	325		-
		6	390		-
	3(c)	1	65	0,2	-
		2	130		-
		3	195		-
		4	260		-
		5	325		-
		6	390		-
	4(d)	1	65	-	0,07
		2	130	-	
		3	195	-	
		4	260	-	
		5	325	-	
		6	390	-	
	5(f)	1	65	-	0,1
		2	130	-	
		3	195	-	
		4	260	-	
		5	325	-	
		6	390	-	
	6(g)	1	65	-	0,15
		2	130	-	
		3	195	-	

	Prueba	Jarra	Dosis (ppm)		
			Sulfato Aluminio	Floculante Químico	Praestol
AGUA CRUDA RÍO BABAHOYO		4	260	-	
		5	325	-	
		6	390	-	
	7(h)	1	65	0	0
		2	130	0	0
		3	195	0	0
		4	260	0	0
		5	325	0	0
		6	390	0	0
	8(i)	1	65	-	0,2
		2	130	-	
		3	195	-	
		4	260	-	
		5	325	-	
		6	390	-	
	9(j)	1	65	0,1	-
		2	130		-
		3	195		-
		4	260		-
		5	325		-
		6	390		-
	10(k)	1	65	-	-
		2	130	-	-
		3	195	-	-
		4	260	-	-
		5	325	-	-
		6	390	-	-
	11(l)	1	65	0,15	-
		2	130		-
		3	195		-
		4	260		-
		5	325		-
		6	390		-
	12(m)	1	65	0,2	-
		2	130		-
		3	195		-

	Prueba	Jarra	Dosis (ppm)		
			Sulfato Aluminio	Floculante Químico	Praestol
		4	260		-
		5	325		-
		6	390		-
	13(n)	1	65	-	0,1
		2	130	-	
		3	195	-	
		4	260	-	
		5	325	-	
		6	390	-	
	14(o)	1	65	-	0,15
		2	130	-	
		3	195	-	
		4	260	-	
		5	325	-	
		6	390	-	
	15(p)	1	65	-	0,2
		2	130	-	
		3	195	-	
		4	260	-	
		5	325	-	
		6	390	-	

Fuente: Yagual, 2012

APÉNDICE B

Formato de Tabulación de Datos Resultantes de Pruebas de Jaras

Prueba	Jarra	Dosis			pH	Turbidez NTU	SST ppm	ST ppm	Conductividad (uS/cm)	Dureza (mg/l de CaCO ₃)
		Sulfato Aluminio ppm	Floculante Químico ppm	Praestrol ppm						
	1									
	2									
	3									
	4									
	5									
	6									
	1									
	2									
	3									
	4									
	5									
	6									

Fuente: Yagual, 2012

APÉNDICE C

Resultados Obtenidos mediante Pruebas de Jarras

	Prueba	Jarra	Dosis (ppm)			pH	Turbidez NTU	SST ppm	ST ppm	Conductividad (uS/cm)	Dureza (mg/l de CaCO3)	% Remoción Turbidez
			Sulfato Aluminio	Floculante Químico	Praestol							
	Agua Cruda Daule	-	0	0	0	6,7	50,0	94,0	128,00	93,1	0,5	-
	Agua Cruda Babahoyo	-	0	0	0	7	100,0	308,0	1292,00	1890	1,5	-
AGUA CRUDA RÍO DAULE	1(a)	1	65	0,1	-	6	2,0	38,0	103,00	147,6	0,4	95,9
		2	130	0,1	-	5,3	8,6	40,0	143,00	183,5	0,6	82,9
		3	195	0,1	-	4,3	23,2	44,0	235,00	295,6	0,6	53,6
		4	260	0,1	-	4,2	32,6	39,0	244,00	321	0,6	34,7
		5	325	0,1	-	4,3	45,7	42,0	304,00	451	0,6	8,7
		6	390	0,1	-	4,1	24,4	42,0	363,00	535	0,6	51,1
	2(b)	1	65	0,15	-	5,5	2,3	41,0	100,00	131,5	0,5	95,5
		2	130	0,15	-	5	3,4	45,0	170,00	152,2	0,5	93,1
		3	195	0,15	-	4,4	1,4	55,0	170,00	202	0,5	97,2
		4	260	0,15	-	4,3	1,2	44,0	240,00	241	0,5	97,6
		5	325	0,15	-	4,3	8,8	42,0	268,00	274	0,5	82,3
		6	390	0,15	-	4,3	2,6	43,0	310,00	319	0,5	94,7

Resultados Obtenidos mediante Pruebas de Jarras

	Prueba	Jarra	Dosis (ppm)			pH	Turbidez NTU	SST ppm	ST ppm	Conductividad (uS/cm)	Dureza (mg/l de CaCO3)	% Remoción Turbidez
			Sulfato Aluminio	Floculante Químico	Praestol							
	3(c)	1	65	0,2	-	5,9	2,6	42,0	150,00	123,3	0,5	94,8
		2	130	0,2	-	5,8	3,7	32,0	161,00	146,4	0,5	92,7
		3	195	0,2	-	4,6	32,5	36,0	201,00	194,4	0,5	35,0
		4	260	0,2	-	4,3	39,6	33,0	273,00	242	0,5	20,7
		5	325	0,2	-	4,2	2,9	33,0	281,00	267	0,5	94,3
		6	390	0,2	-	4,1	3,3	39,0	326,00	305	0,5	93,3
	4(d)	1	65	-	0,07	5,7	3,4	38,0	114,00	124,3	0,4	93,2
		2	130	-	0,07	4,3	18,6	33,0	166,00	185,7	0,5	62,8
		3	195	-	0,07	4,5	15,3	29,0	197,00	198,5	0,5	69,3
		4	260	-	0,07	4,1	38,6	42,0	282,00	272	0,5	22,8
		5	325	-	0,07	4,1	68,9	42,0	339,00	328	0,5	-37,8
		6	390	-	0,07	4,1	63,0	41,0	367,00	358	0,5	-26,0
	5(f)	1	65	-	0,1	5,2	2,5	43,0	28,00	96	0,5	95,0
		2	130	-	0,1	5	5,0	49,0	23,00	18,9	0,4	90,0
		3	195	-	0,1	4,9	23,2	60,0	26,00	153,9	0,4	53,6
		4	260	-	0,1	4,6	23,1	62,0	111,00	225	0,4	53,8
		5	325	-	0,1	4,1	21,3	59,0	150,00	259	0,4	57,5

Resultados Obtenidos mediante Pruebas de Jarras

Prueba	Jarra	Dosis (ppm)			pH	Turbidez NTU	SST ppm	ST ppm	Conductividad (uS/cm)	Dureza (mg/l de CaCO3)	% Remoción Turbidez
		Sulfato Aluminio	Floculante Químico	Praestol							
	6	390	-	0,1	4	44,2	56,0	120,00	296	0,5	11,6
6(g)	1	65	-	0,15	5,2	2,7	39,0	85,00	109,8	0,5	94,6
	2	130	-	0,15	4,6	11,6	51,0	155,00	133,4	0,5	76,8
	3	195	-	0,15	4,4	19,9	47,0	151,00	176,8	0,5	60,3
	4	260	-	0,15	4,2	13,6	47,0	199,00	225	0,5	72,8
	5	325	-	0,15	4,4	15,5	45,0	230,00	262	0,6	69,1
	6	390	-	0,15	4	23,0	40,0	271,00	320	0,5	53,9
7(h)	1	65	0	0	5,8	2,4	50,0	125,00	111,6	0,5	95,2
	2	130	0	0	4,8	2,9	37,0	143,00	144,6	0,5	94,2
	3	195	0	0	4,3	11,7	71,0	138,00	204	0,5	76,6
	4	260	0	0	4,2	11,4	43,0	181,00	276	0,5	77,3
	5	325	0	0	4,1	14,5	50,0	242,00	332	0,5	71,0
	6	390	0	0	4	9,6	53,0	261,00	414	0,5	80,7
8(i)	1	65	-	0,2	5,5	1,1	39,0	115,00	109,5	0,4	97,7
	2	130	-	0,2	4,2	16,2	45,0	146,00	157	0,5	67,7
	3	195	-	0,2	4,2	24,2	43,0	181,00	233	0,5	51,5
	4	260	-	0,2	4	25,3	50,0	214,00	290	0,6	49,4

Resultados Obtenidos mediante Pruebas de Jarras

	Prueba	Jarra	Dosis (ppm)			pH	Turbidez NTU	SST ppm	ST ppm	Conductividad (uS/cm)	Dureza (mg/l de CaCO3)	% Remoción Turbidez
			Sulfato Aluminio	Floculante Químico	Praestol							
AGUA CRUDA RÍO BABAHoyo		5	325	-	0,2	4,2	23,9	49,0	249,00	348	0,4	52,2
		6	390	-	0,2	4	41,8	45,0	290,00	418	0,3	58,2
	9(j)	1	65	0,1	-	5,6	4,7	40,0	853,00	1805	1,5	95,3
		2	130	0,1	-	5,2	1,2	38,0	882,00	1807	1,5	98,8
		3	195	0,1	-	4,4	8,9	36,0	891,00	1984	1,5	91,1
		4	260	0,1	-	4,2	12,1	40,0	935,00	2110	1,5	87,9
		5	325	0,1	-	4,4	14,8	40,0	989,00	2180	1,5	85,2
		6	390	0,1	-	4,1	9,4	39,0	1078,00	2340	2	90,6
	10(k)	1	65	-	-	5,9	3,0	33,0	849,00	1750	2	97,0
		2	130	-	-	5,1	2,3	30,0	868,00	1756	2,8	97,7
		3	195	-	-	4,5	8,6	39,0	863,00	1936	1,7	91,4
		4	260	-	-	4,4	13,8	37,0	903,00	2060	1,6	86,2
		5	325	-	-	4,3	15,7	36,0	928,00	2150	1,5	84,3
		6	390	-	-	4,4	26,0	34,0	994,00	2260	1,5	74,0
	11(l)	1	65	0,15	-	5,9	1,3	43,5	1000,00	1760	2	98,7
		2	130	0,15	-	5	1,7	45,0	1000,00	1765	1,7	98,3
		3	195	0,15	-	4,4	6,8	41,0	1039,00	1944	1,6	93,2

Resultados Obtenidos mediante Pruebas de Jarras

Prueba	Jarra	Dosis (ppm)			pH	Turbidez NTU	SST ppm	ST ppm	Conductividad (uS/cm)	Dureza (mg/l de CaCO3)	% Remoción Turbidez
		Sulfato Aluminio	Floculante Químico	Praestol							
	4	260	0,15	-	4,6	20,8	41,0	1115,00	2080	1,5	79,2
	5	325	0,15	-	4,2	20,5	44,0	1144,00	2210	1,5	79,5
	6	390	0,15	-	4,3	12,1	41,0	1161,00	2250	1,5	87,9
12(m)	1	65	0,2	-	5,6	1,2	47,0	955,00	1848	2	98,8
	2	130	0,2	-	5,4	1,1	40,0	988,00	1863	2,6	98,9
	3	195	0,2	-	4,4	3,9	41,0	1013,00	2040	2,1	96,1
	4	260	0,2	-	4,2	15,3	40,0	978,00	2040	2,6	84,7
	5	325	0,2	-	4,4	25,0	41,0	1040,00	2120	2,1	75,0
	6	390	0,2	-	4,1	17,3	45,0	1044,00	2230	2,5	82,7
13(n)	1	65	-	0,1	5,7	28,9	42,0	860,00	1730	2	71,1
	2	130	-	0,1	5,1	0,8	56,0	893,00	1740	2	99,2
	3	195	-	0,1	4,4	15,1	45,0	899,00	1958	1,5	84,9
	4	260	-	0,1	4,5	12,9	51,0	1032,00	2070	1,5	87,1
	5	325	-	0,1	4,2	2,3	55,0	1023,00	2190	1,5	97,7
	6	390	-	0,1	4,3	8,9	50,0	1031,00	2250	1,5	91,1
14(o)	1	65	-	0,15	5,3	1,8	42,0	843,00	1721	1,8	98,2
	2	130	-	0,15	5,2	0,9	40,0	808,00	1753	1,8	99,1

Resultados Obtenidos mediante Pruebas de Jarras

Prueba	Jarra	Dosis (ppm)			pH	Turbidez NTU	SST ppm	ST ppm	Conductividad (uS/cm)	Dureza (mg/l de CaCO3)	% Remoción Turbidez
		Sulfato Aluminio	Floculante Químico	Praestol							
	3	195	-	0,15	4,3	4,7	41,0	897,00	1938	1,7	95,3
	4	260	-	0,15	4,4	4,4	45,0	954,00	2040	1,6	95,6
	5	325	-	0,15	4,4	6,9	44,0	976,00	2180	1,6	93,1
	6	390	-	0,15	4,4	8,1	43,0	1011,00	2240	1,6	91,9
15(p)	1	65	-	0,2	5,6	4,1	41,0	901,00	1750	1,6	95,9
	2	130	-	0,2	5,2	1,9	42,0	906,00	1764	1,5	98,1
	3	195	-	0,2	4,5	4,3	46,0	947,00	1920	1,5	95,7
	4	260	-	0,2	4,3	4,1	51,0	986,00	2100	1,5	95,9
	5	325	-	0,2	4,1	4,7	46,0	1039,00	2210	1,5	95,3
	6	390	-	0,2	4,1	5,8	46,0	1068,00	2330	1,5	94,2

Fuente: Yagual, 2012

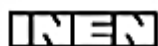
APÉNDICE D

Tabla A.2. La distribución t .

Valor de t para un intervalo de confianza de Valor crítico de $ t $ para valores de P de número de grados de libertad	90%	95%	98%	99%
	0.10	0.05	0.02	0.01
1	6.31	12.71	31.82	63.66
2	2.92	4.30	6.96	9.92
3	2.35	3.18	4.54	5.84
4	2.13	2.78	3.75	4.60
5	2.02	2.57	3.36	4.03
6	1.94	2.45	3.14	3.71
7	1.89	2.36	3.00	3.50
8	1.86	2.31	2.90	3.36
9	1.83	2.26	2.82	3.25
10	1.81	2.23	2.76	3.17
12	1.78	2.18	2.68	3.05
14	1.76	2.14	2.62	2.98
16	1.75	2.12	2.58	2.92
18	1.73	2.10	2.55	2.88
20	1.72	2.09	2.53	2.85
30	1.70	2.04	2.46	2.75
50	1.68	2.01	2.40	2.68
∞	1.64	1.96	2.33	2.58

Los valores críticos de $|t|$ son adecuados para un contraste de *dos* colas. Para un contraste de *una* cola el valor se toma de la columna para *dos veces* el valor de P deseado, es decir, para un contraste de una cola, $P = 0.05$, 5 grados de libertad, el valor crítico se lee de la columna $P = 0.10$ y es igual a 2.02.

APÉNDICE E



INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN

Quito - Ecuador

NORMA TÉCNICA ECUATORIANA

NTE INEN 1 108:2011
Cuarta revisión

AGUA POTABLE. REQUISITOS.

Primera Edición

DRINKING WATER. REQUIREMENTS.

Second Edition

DESCRIPTORES: Protección ambiental y sanitaria, seguridad, calidad del agua, agua potable, requisitos.
AL 01.06-401
CDU: 628.1.033
CIIU: 4200
ICS: 13.060.20

Norma Técnica Ecuatoriana Voluntaria	AGUA POTABLE. REQUISITOS	NTE INEN 1 108:2011 Cuarta revisión 2011-06
1. OBJETO 1.1 Esta norma establece los requisitos que debe cumplir el agua potable para consumo humano. 2. ALCANCE 2.1 Esta norma se aplica al agua potable de los sistemas de abastecimiento públicos y privados a través de redes de distribución y tanqueros. 3. DEFINICIONES 3.1 Para efectos de esta norma se adoptan las siguientes definiciones: 3.1.1 <i>Agua potable.</i> Es el agua cuyas características físicas, químicas microbiológicas han sido tratadas a fin de garantizar su aptitud para consumo humano. 3.1.2 <i>Agua cruda.</i> Es el agua que se encuentra en la naturaleza y que no ha recibido ningún tratamiento para modificar sus características: físicas, químicas o microbiológicas. 3.1.3 <i>Límite máximo permitido.</i> Representa un requisito de calidad del agua potable que fija dentro del ámbito del conocimiento científico y tecnológico del momento un límite sobre el cual el agua deja de ser apta para consumo humano. Para la verificación del cumplimiento, los resultados se deben analizar con el mismo número de cifras significativas establecidas en los requisitos de esta norma y aplicando las reglas para redondear números. (ver NTE INEN 052). 3.1.4 <i>UFC/ml.</i> Concentración de microorganismos por mililitro, expresada en unidades formadoras de colonias. 3.1.5 <i>NMP.</i> Forma de expresión de parámetros microbiológicos, número más probable, cuando se aplica la técnica de los tubos múltiples. 3.1.6 <i>mg/l.</i> (miligramos por litro), unidades de concentración de parámetros físico químicos. 3.1.7 <i>Microorganismo patógeno.</i> Son los causantes potenciales de enfermedades para el ser humano. 3.1.8 <i>Plaguicidas.</i> Sustancia química o biológica que se utiliza, sola, combinada o mezclada para prevenir, combatir o destruir, repeler o mitigar: insectos, hongos, bacterias, nematodos, ácaros, moluscos, roedores, malas hierbas o cualquier forma de vida que cause perjuicios directos o indirectos a los cultivos agrícolas, productos vegetales y plantas en general. 3.1.9 <i>Desinfección.</i> Proceso de tratamiento que elimina o reduce el riesgo de enfermedad que pueden presentar los agentes microbianos patógenos, constituye una medida preventiva esencial para la salud pública. 3.1.10 <i>Subproductos de desinfección.</i> Productos que se generan al aplicar el desinfectante al agua, especialmente en presencia de sustancias húmicas. 3.1.11 <i>Cloro residual.</i> Cloro remanente en el agua luego de al menos 30 minutos de contacto. 3.1.12 <i>Sistema de abastecimiento de agua potable.</i> El sistema incluye las obras y trabajos auxiliares construidos para la captación, conducción, tratamiento, almacenamiento y sistema de distribución. (Continúa) DESCRIPTORES: Protección ambiental y sanitaria, seguridad, calidad del agua, agua potable, requisitos.		

3.1.13 Sistema de distribución. Comprende las obras y trabajos auxiliares construidos desde la salida de la planta de tratamiento hasta la acometida domiciliaria.

4. DISPOSICIONES ESPECÍFICAS

4.1 Los sistemas de abastecimiento de agua potable se acogerán al Reglamento de buenas prácticas de Manufactura (producción) del Ministerio de Salud Pública.

5. REQUISITOS

5.1 Requisitos específicos

5.1.1 El agua potable debe cumplir con los requisitos que se establecen a continuación:

PARAMETRO	UNIDAD	Límite máximo permitido
Características físicas		
Color	Unidades de color aparente (Pt-Co)	15
Turbiedad	NTU	5
Olor	---	no objetable
Sabor	---	no objetable
Inorgánicos		
Antimonio, Sb	mg/l	0.02
Arsénico, As	mg/l	0.01
Bario, Ba	mg/l	0.7
Boro, B	mg/l	0.5
Cadmio, Cd	mg/l	0.003
Cianuros, CN ⁻	mg/l	0.07
Cloro libre residual [*]	mg/l	0.3 a 1.5 ¹¹
Cobre, Cu	mg/l	2.0
Cromo, Cr (cromo total)	mg/l	0.05
Fluoruros	mg/l	1.5
Manganeso, Mn	mg/l	0.4
Mercurio, Hg	mg/l	0.006
Níquel, Ni	mg/l	0.07
Nitratos, NO ₃	mg/l	50
Nitritos, NO ₂	mg/l	0.2
Piomo, Pb	mg/l	0.01
Radiación total α ^{**}	Bq/l	0.1
Radiación total β ^{**}	Bq/l	1.0
Selenio, Se	mg/l	0.01

¹¹ Es el rango en el que debe estar el cloro libre residual luego de un tiempo mínimo de contacto de 30 minutos.

^{*} Corresponde a la radiación emitida por los siguientes radionucleidos: ²¹⁰Po, ²²⁴Ra, ²²⁸Ra, ²³²Th, ²³⁴U, ²³⁸U, ²³⁹Pu.

^{**} Corresponde a la radiación emitida por los siguientes radionucleidos: ⁶⁰Co, ⁸⁹Sr, ⁹⁰Sr, ¹²⁹I, ¹³¹I, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs, ²¹⁰Pb, ²²⁶Ra.

Sustancias orgánicas

	UNIDAD	Límite máximo permitido
Hidrocarburos policíclicos aromáticos HAP		
Benzo (a)pireno	mg/l	0.0007
Hidrocarburos:		
Benceno	mg/l	0.01
Tolueno	mg/l	0.7
Xileno	mg/l	0.5
Estireno	mg/l	0.02
1,2dicloroetano	mg/l	0.03
Cloruro de vinilo	mg/l	0.0003
Tricloroetano	mg/l	0.02
Tetracloroetano	mg/l	0.04
Di(2-etilhexil) ftalato	mg/l	0.005
Acetamida	mg/l	0.0005
Epíclorohidrina	mg/l	0.0004
Hexaclorobutadieno	mg/l	0.0006
1,2Dibromoetano	mg/l	0.0004
1,4-Dioxano	mg/l	0.05
Acido Nitrotriacético	mg/l	0.2

(Continúa)

Plaguicidas

	UNIDAD	Límite máximo permitido
Isoproturón	mg/l	0,009
Lindano	mg/l	0,002
Pendimetalina	mg/l	0,02
Pentaclorofenol	mg/l	0,009
Dicloroprop	mg/l	0,1
Alacloro	mg/l	0,02
Aldicarb	mg/l	0,01
Aldrin y Dieldrin	mg/l	0,00003
Carbofuran	mg/l	0,007
Clorpirifos	mg/l	0,03
DOT y metabolitos	mg/l	0,001
1,2-Dibromo-3-cloropropano	mg/l	0,001
1,3-Dicloropropeno	mg/l	0,02
Dimetoato	mg/l	0,006
Endrin	mg/l	0,0006
Terbutilazina	mg/l	0,007
Clordano	mg/l	0,0002

Residuos de desinfectantes

	UNIDAD	Límite máximo permitido
Monocloramina,	mg/l	3

Subproductos de desinfección

	UNIDAD	Límite máximo permitido
2,4,6-triclorofenol	mg/l	0,2
Trihalometanos totales	mg/l	0,5
Si pasa de 0,5 mg/l investigar:		
• Bromodiclorometano	mg/l	0,06
• Cloroformo	mg/l	0,3
Ácido tricloroacético	mg/l	0,2

Cianotoxinas

	UNIDAD	Límite máximo permitido
Microcistina-LR	mg/l	0,001

5.1.2 El agua potable debe cumplir con los siguientes requisitos microbiológicos.

Requisitos microbiológicos

	Máximo
Coliformes fecales ⁽¹⁾ :	
- Tubos múltiples NMP/100 ml ó	< 1,1 *
- Filtración por membrana UFC/ 100 ml	< 1 **
<i>Cryptosporidium</i> , número de ooquistes/100 litros	Ausencia
<i>Giardia</i> , número de quistes/100 litros	Ausencia
* < 1,1 significa que en el ensayo del NMP utilizando 5 tubos de 20 cm ³ ó 10 tubos de 10 cm ³ ninguno es positivo	
** < 1 significa que no se observan colonias	
⁽¹⁾ ver el anexo 1, para el número de unidades (muestras) a tomar de acuerdo con la población servida	

(Continúa)

6. INSPECCIÓN

6.1 Muestreo

6.1.1 El muestreo para el análisis microbiológico, físico, químico debe realizarse de acuerdo a los métodos estandarizados para el agua potable y residual (Standard Methods).

6.1.2 El agua potable debe ser monitoreada permanentemente para asegurar que no se producen desviaciones en los parámetros aquí indicados.

6.1.3 El manejo y conservación de las muestras para la realización de los análisis debe realizarse de acuerdo con lo establecido en los métodos estandarizados para el agua potable y residual (Standard Methods).

7. MÉTODOS DE ENSAYO

7.1 Los métodos de ensayo utilizados para los análisis que se especifican en esta norma serán los métodos estandarizados para el agua potable y residual (Standard Methods) especificados en su última edición. En caso que no conste el método de análisis para un parámetro en el Standard Methods, se utilizará un método estandarizado propuesto por un organismo reconocido.

(Continúa)

APÉNDICE F

LÍMITES MÁXIMO PERMISIBLES AGUAS QUE ÚNICAMENTE REQUIEREN TRATAMIENTO CONVENCIONAL

Parámetros	Unidad	Límite Máximo Permisible
Aceites y Grasas	mg/l	0,3
Aluminio	mg/l	0,2
Amoniaco	mg/l	1,0
Amonio	mg/l	0,05
Arsénico (total)	mg/l	0,05
Bario	mg/l	1,0
Cadmio	mg/l	0,01
Cianuro (total)	mg/l	0,1
Cloruro	mg/l	250
Cobre	mg/l	1,0
Coliformes Totales		3 000
Coliformes Fecales		600
Color	unidades de color	100
Compuestos fenólicos	mg/l	0,002
Cromo hexavalente	mg/l	0,05
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	mg/l	2,0
Dureza	mg/l	500
Bifenilo policlorados/PCBs	µg/l	0,0005
Fluoruro (total)	mg/l	1,5
Hierro (total)	mg/l	1,0
Manganeso (total)	mg/l	0,1
Materia flotante		Ausencia
Mercurio (total)	mg/l	0,001
Nitrato	mg/l	10,0
Nitrito	mg/l	1,0
Olor y sabor		Es permitido olor y sabor removible por tratamiento convencional
Oxígeno disuelto	mg/l	No menor al 80% del oxígeno de saturación y no

Parámetros	Unidad	Límite Máximo Permissible
		menor a 6mg/l
Plata (total)	mg/l	0,05
Plomo (total)	mg/l	0,05
Potencial de hidrógeno		6-9
Selenio (total)	mg/l	0,01
Sodio	mg/l	200
Sólidos disueltos totales	mg/l	1 000
Sulfatos	mg/l	400
Temperatura	°C	Condición Natural + o – 3 grados
Tensoactivos	mg/l	0,5
Turbiedad	UTN	100
Zinc	mg/l	5,0
Benceno	µg/l	10,0
Benzo(a) pireno	µg/l	0,01
Etilbenceno	µg/l	700
Estireno	µg/l	100
Tolueno	µg/l	1 000
Xilenos (totales)	µg/l	10 000
Carbamatos totales	mg/l	0,1
Organoclorados totales	mg/l	0,01
Organofosforados totales	mg/l	0,1
Dibromocloropropano (DBCP)	µg/l	0,2
Dibromoetileno (DBE)	µg/l	0,05
Dicloropropano (1,2)	µg/l	5
Diquat	µg/l	70
Glifosato	µg/l	200
Toxafeno	µg/l	5

Parámetros	Unidad	Límite Máximo Permisible
Compuestos Halogenados		
Tetracloruro de carbono	µg/l	3
Dicloroetano (1,2-)	µg/l	10
Dicloroetileno (1,1-)	µg/l	0,3
Dicloroetileno (1,2-cis)	µg/l	70
Dicloroetileno (1,2-trans)	µg/l	100
Diclorometano	µg/l	50
Tetracloroetileno	µg/l	10
Tricloroetano (1,1,1-)	µg/l	200
Tricloroetileno	µg/l	30
Clorobenceno	µg/l	100
Diclorobenceno (1,2-)	µg/l	200
Diclorobenceno (1,4-)	µg/l	5
Hexaclorobenceno	µg/l	0,01
Bromoximil	µg/l	5
Diclorometano	µg/l	50
Tribrometano	µg/l	2

BIBLIOGRAFÍA

[1] ALEXANDRE L. y MORA, F. (2007). Análisis experimental de tratamientos floculantes de residuos orgánicos derivados de la producción porcina. Departamentos de Agronomía y Zootecnia. Centro de Ciencias Agrarias - UEM. Maringá, Paraná, Brasil.

[2] AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; American Water Works Association; Water Environment Federation. (1998). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20^{ava} edición. Washington, Estados Unidos de Norteamérica.

[3] AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (1969). Water Treatment Plant Design. Segunda Edición 77-104. Mc Graw Hill. Estados Unidos.

[4] ASHLAND WATER TECHNOLOGIES (2008). Floculantes para Todas las Áreas de la Separación Sólido-Líquido. Alemania.

[5] CABRERA, X.; Fleites, M.; Contreras, A. (2009). Estudio del Proceso de Coagulación-Floculación de Aguas Residuales de la Empresa Textil “Desembarco del Granma” a Escala de Laboratorio. Facultad de Química y Farmacia, Universidad Central de Las Villas. Villa Clara.

[5] CAMPUZANO, D. y Duque, N. (2003). Selección de Dosis Óptima de Productos Químicos para el Tratamiento Primario Avanzado de las Aguas Residuales a Tratar en la PTAR - Cañaveralejo y Optimización del Proceso. Tesis de Pregrado - Universidad Católica de Manizales. Manizales, Colombia.

[6] COMPANY, J. (2000). Coagulantes y Floculantes Aplicados en el Tratamiento de Aguas . Grinver S.A. Barcelona, España.

[7] DAVIS, M.L. (2010). Water and Waste Water Engineering, Design Principles and Practice. Mc Graw Hill Companies Inc. ISBN: 978-0-07-171385-6. Michigan, Estados Unidos de Norteamérica.

[8] GIORDANI S.; GONZALES L.; MORALES A.; QUIJANO J. Y TEJADA A. (2008). Factibilidad del Uso de Polímeros para la Clarificación del Agua Potable en la Ciudad de Mérida. U.E. Colegio "La Presentación".

Publicado Revista Científica Juvenil ISSN 1316-9505 vol VII-VIII (2008-2009): 97-108. Mérida.

[9] INSTITUTO NACIONAL DE PESCA, INP (1998). Comportamiento Temporal y Espacial de las Características Físicas, Químicas y Biológicas del Golfo de Guayaquil y sus Afluentes Daule y Babahoyo entre 1994- 1996. Guayaquil, Ecuador.

[10] INTERAGUA C. LTDA. (2011). Informe Anual 2010-2011. Guayaquil, Ecuador.

[11] LIN, S.D. (2001). Water and Waste Water Calculations Manual. Primera edición, 357 – 369. McGraw – Hill. Estados Unidos.

[12] MILLER, J.N. (2002). Estadística y Quimiometría para Química Analítica. Cuarta edición. MCGRAW HILL.

[13] MINISTERIO DEL AMBIENTE (2002). Texto Unificado de la Legislación Secundaria del Medio Ambiente, Libro VI, Anexo1. Quito, Ecuador.

[14] NALCO CHEMICAL COMPANY (2009). The Nalco Water Handbook. Tercera edición. MCGRAW HILL.

[15] ROMERO, J. A. (2000). Purificación del Agua. Pág. 269-274. Primera edición. Centro Editorial de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Colombia.

[16] ROMERO, J.A. (2002). Calidad del Agua. Primera edición. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Colombia.

[17] SPELLMAN, F. (2004). Mathematics Manual for Water and Waste Water Treatment Plant Operators. CRC Press LLC. Estados Unidos

[18] RODRIGUEZ, M. *et al.* (2009). Subproductos de la desinfección del agua potable: Formación, aspectos sanitarios y reglamentación. INCI, nov. 2007, vol.32, no.11, p.749-756. ISSN 0378-1844.

[19] SUÁREZ CHANGUÁN, P. (2010). Estudio de Impacto Ambiental Definitivo de la Subestación Nueva Prosperina y Línea de Transmisión Eléctrica. Ecuador.

[20] VILLACRECES, J.; Vega, J y Matamoros, C. (2009). Evaluación de Dos Casos de Estudio del Fenómenos de Sedimentación en el Tratamiento del Agua.

[21] VIESSMAN, W. JR; HAMMER, M.J. (1990). Water Supply and Pollution Control. 5th Edition. Harper &Row.