

EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD TÉCNICO - FINANCIERA DEL USO DE
SULFATO DE ALUMINIO LÍQUIDO O HIDROXICLORURO DE ALUMINIO (PAC)
COMO REACTIVO SUSTITUTO DEL SULFATO DE ALUMINIO GRANULAR EN
EL SUBPROCESO DE COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN DE LA PTAP EL
DORADO

CATAÑO RIVERA LEIDY TATIANA
ORTIZ ENCISO MANUEL ANTONIO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D. C.
2018

EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD TÉCNICO - FINANCIERA DEL USO DE
SULFATO DE ALUMINIO LÍQUIDO O HIDROXICLORURO DE ALUMINIO (PAC)
COMO REACTIVO SUSTITUTO DEL SULFATO DE ALUMINIO GRANULAR EN
EL SUBPROCESO DE COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN DE LA PTAP EL
DORADO

CATAÑO RIVERA LEIDY TATIANA
ORTIZ ENCISO MANUEL ANTONIO

Proyecto integral para optar al título de
INGENIERO QUÍMICO

Director:
Tulio Alberto Sánchez
Ingeniero químico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D. C.
2018

Nota de aceptación

Ing. Oscar Libardo Lombana Charfuelan

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

Ing. Dany Cárdenas Romay

Bogotá D.C., (agosto de 2018).

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y rector del claustro

Dr. JAIME POSADA DÍAZ

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora académica y de posgrados

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Decano de la Facultad de Ingenierías

Dr. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director Programa de Ingeniería Química

Dr. LEONARDO DE JESÚS HERRERA GUTIÉRREZ

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

Agradezco primero que nada a Dios, a mi papá por su apoyo incondicional y su lucha día a día para sacar a delante a una familia unida, a mi mamá por su ayuda, sus madrugadas durante estos 5 años y sus consejos siempre acertados. Gracias a Julián por su ayuda para sacar adelante este proyecto y la fuerza de hermano que siempre me ha dado, a Javier Cuellar por su apoyo y amor infinito, y a Carolina Rodríguez por ser mi amiga incondicional desde el inicio de esta etapa de mi vida.

Leidy Tatiana Cataño Rivera

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

Ingeniera química, Nancy Aldana, Jefe de tratamiento de la planta El Dorado por su constante ayuda, orientación, correcciones, e interés en este proyecto.

Ingeniera química, Diana Lombana, Analista de laboratorio de la planta El Dorado, por su interés e inmensa ayuda a lo largo del desarrollo de este proyecto.

Ingeniero químico, Oscar Lombana, Asesor de Proyecto de Grado en la Universidad de América por su orientación y apoyo durante todo el desarrollo del proyecto.

Ingeniero eléctrico, Abacuc Rodríguez, de la planta El Dorado, por su constante orientación y colaboración en el desarrollo de este proyecto.

Ingeniero químico, Tulio Sánchez, de la planta El Dorado, por su colaboración como director de este proyecto.

Planta de Tratamiento de Agua Potable, El Dorado, perteneciente a la empresa de Acueducto, Agua y Alcantarillado de Bogotá por la financiación de este proyecto, y el suministro de todos los datos necesarios para llevarlo a cabo.

A todo el personal que labora en la planta El Dorado por su colaboración y amabilidad durante el desarrollo del proyecto.

CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	23
INTRODUCCIÓN	24
OBJETIVOS	25
1. GENERALIDADES	26
1.1 ASPECTOS GENERALES DEL PROCESO DE POTABILIZACIÓN DEL AGUA	26
1.1.1 Características del agua.	27
1.1.1.1 Características físicas y organolépticas del agua.	27
1.1.1.2 Características químicas del agua.	28
1.1.2 Procesos unitarios que componen el proceso de potabilización de agua.	28
1.2 COAGULACIÓN – FLOCULACIÓN	28
1.2.1 Coagulación.	28
1.2.1.1 Tipos de coagulación.	30
1.2.2 Floculación.	32
1.2.2.1 Tipos de floculación.	32
1.3 EFECTIVIDAD EN EL PROCESO DE TRATAMIENTO	32
1.4 NORMAS DE CALIDAD DEL AGUA.	34
1.4.1 Resolución 2115 de 2007.	34
1.4.2 Resolución 1096 de 2000.	34
1.4.3 Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS), TÍTULO C Sistemas de potabilización Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.	34
1.4.4 Decreto 1575 de 2007.	34
1.4.5 Resolución 549 de 2017.	35
1.4.6 NTC GP 1000:2009.	35
1.4.7 NTC-ISO 9001:2015.	35
1.4.8 Norma Nacional de calidad de agua.	35

1.4.9	Normas internas de la planta de tratamiento de agua potable, El Dorado.	37
2.	DIAGNÓSTICO DEL PROCESO ACTUAL DE LA PLANTA	40
2.1	ASPECTOS GENERALES DE LA PLANTA	40
2.1.1	Estudio y caracterización del agua cruda que ingresa a la planta.	42
2.1.1.1	Turbiedad del agua cruda.	44
2.1.1.2	Color aparente del agua cruda.	45
2.1.1.3	pH del agua cruda.	46
2.1.1.4	Alcalinidad del agua cruda.	47
2.1.1.5	Conductividad del agua cruda.	49
2.1.1.6	Hierro presente en el agua cruda.	49
2.1.2	Estudio Hidrológico.	51
2.2	PROCESO ACTUAL DE POTABILIZACIÓN	53
2.2.1	Captación de agua.	55
2.2.2	Cámara de rebose.	56
2.2.3	Aireación (cascada) y pre-alcalinización.	59
2.2.4	Canaleta Parshall.	61
2.2.5	Coagulación.	62
2.2.5.1	Sustancia coagulante.	63
2.2.5.2	pH del agua en mezcla rápida.	63
2.2.6	Floculación.	64
2.2.6.1	Gradiente de velocidad de los floculadores.	66
2.2.7	Sedimentación.	71
2.2.7.1	Tratamiento de lodos.	74
2.2.8	Filtración.	75
2.2.8.1	Lavado de filtros.	76
2.2.9	Desinfección.	77
2.2.9.1	Cámara de contacto.	78
2.2.9.2	Post-alcalinización y almacenamiento.	78
2.3	TRAYECTORIA DEL AGUA EN EL PROCESO DE POTABILIZACIÓN	79
2.3.1	Trayectoria de la turbiedad en el agua a lo largo del proceso.	79
2.3.2	Trayectoria del pH en el agua.	81

2.3.3	Trayectoria de la conductividad en el agua.	82
2.4	CONDICIONES DE OPERACIÓN ACTUAL DE LA PTAP EL DORADO	83
2.4.1	Factores a controlar.	83
2.4.1.1	Aforo.	83
2.4.1.2	Alcalinización y coagulación.	84
2.5	ANÁLISIS DE CONSUMO EN EL PROCESO ACTUAL	90
2.5.1	Sobredosificación.	92
2.5.1.1	Sobredosificación de pre-alcalinizante.	93
2.5.2	Sobredosificación de coagulante.	96
2.5.3	Relación entre la concentración de coagulante y pre- alcalinizante.	100
3.	DESARROLLO EXPERIMENTAL ¡Error! Marcador no definido.	
3.1	DESARROLLO EXPERIMENTAL A NIVEL LABORATORIO	102
3.1.1	Alternativas de sustancias coagulantes.	102
3.1.1.1	Sulfato de aluminio.	102
3.1.1.2	Hidroxiclورو de aluminio (PAC).	105
3.1.2	Metodología.	106
3.1.2.1	Parámetros físico-químicos que influyen en el proceso de coagulación-floculación.	107
3.1.2.2	Prueba de Jarras.	109
3.1.2.3	Experimentación previa.	111
3.1.2.4	Experimentación.	112
3.1.3	Análisis de resultados de la experimentación a nivel laboratorio.	125
3.2	DESARROLLO EXPERIMENTAL A NIVEL PLANTA PILOTO.	127
3.2.1	Análisis de resultados.	130
3.3	DOSIFICACIÓN DE LOS COAGULANTES PROPUESTOS	131
3.4	COMPARACIÓN ENTRE SOBREDOSIFICACIÓN CON DATOS HISTÓRICOS Y DATOS EXPERIMENTALES	135
4.	ANÁLISIS DE COSTOS	141
4.1	DIAGNÓSTICO DE COSTOS ACTUALES.	141
4.1.1	Determinación de costos de la sobredosificación (sobrecostos).	143
4.1.1.1	Diagnóstico de costos del coagulante actual.	144

4.1.1.2	Diagnóstico de costos actuales del pre-alcalinizante.	145
4.1.1.3	Sobrecostos actuales de coagulante y pre-alcalinizante.	147
4.2	PRONÓSTICO DE COSTOS DEL SULFATO DE ALUMINIO GRANULAR.	148
4.3	PRONÓSTICO DE COSTOS DEL SULFATO DE ALUMINIO LÍQUIDO.	149
4.4	PRONÓSTICO DE COSTOS DEL HIDROXICLORURO DE ALUMINIO (PAC).	150
4.5	COMPARACIÓN Y SELECCIÓN DEL COAGULANTE.	151
5.	EVALUACIÓN FINANCIERA	¡Error! Marcador no definido.
5.1	EQUIPOS PROPUESTOS PARA EL CAMBIO DE COAGULANTE	154
5.1.1	Bomba de dosificación para PAC.	155
5.1.2	Tanques de almacenamiento.	157
5.1.3	Sistema eléctrico e instalación.	158
5.2	COSTOS DE INVERSIÓN INICIAL	158
5.3	FLUJO DE EFECTIVO	159
6.	CONCLUSIONES	¡Error! Marcador no definido.
7.	RECOMENDACIONES	165
	BIBLIOGRAFÍA	166
	ANEXOS	169

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Remoción de contaminantes del agua cruda con el proceso de potabilización.	33
Tabla 2. Clasificación de fuentes de agua cruda en función de distintos parámetros físico-químicos y microbiológicos.	35
Tabla 3. Valores máximos admisibles en el agua para consumo humano, según la resolución 2115/07.	36
Tabla 4. Parámetros internos de calidad de agua clarificada en PTAP El Dorado para el año 2018.	38
Tabla 5. Parámetros internos de calidad de agua filtrada en PTAP El Dorado para el año 2018.	38
Tabla 6. Parámetros internos de calidad de agua clarificada en PTAP El Dorado para el año 2018.	39
Tabla 7. Stock mínimo de insumos en la planta.	42
Tabla 8. Análisis fisicoquímicos y bacteriológicos del agua cruda para el año 2017 en PTAP El Dorado*.	43
Tabla 9. Desviación estándar de algunas propiedades del agua cruda durante cada mes del año 2017.	51
Tabla 10. Características que se miden al agua clarificada en el proceso de la PTAP El Dorado.	57
Tabla 11. Especificaciones de la Cal Hidrata industrial.	61
Tabla 12. Composición del sulfato de aluminio tipo B usado en la PTAP El Dorado.	63
Tabla 13. Valores promedio de pH en cada uno de los meses del año en PTAP El Dorado.	64
Tabla 14. Valor del coeficiente de arrastre de las paletas (C_D).	68
Tabla 15. Potencia y gradiente de velocidad en cada tanque de floculación de la PTAP El Dorado.	69
Tabla 16. Sobredosificación de cal hidrata en PTAP El Dorado en el año 2017.	93
Tabla 17. Sobredosificación de cal hidrata, en Kilogramos, en PTAP El Dorado, año 2017.	95
Tabla 18. Sobredosificación de coagulante en PTAP El Dorado.	97
Tabla 19. Sobredosificación de coagulante, en Kilogramos, en PTAP El Dorado, año 2017.	99
Tabla 20. Características del sulfato de aluminio granular tipo B en la empresa PQP S.A.	104
Tabla 21. Características del sulfato de aluminio líquido tipo B en la empresa PQP S.A.	104
Tabla 22. Comparación de algunos criterios básicos entre sulfato de aluminio y PAC.	106

Tabla 23. Resultados de prueba de jarras con sulfato de aluminio granular en turbiedades bajas (3.6 – 4.89 UNT) de agua cruda.	114
Tabla 24. Resultados de prueba de jarras con sulfato de aluminio granular en turbiedades altas (15 – 23.5 UNT) de agua cruda.	116
Tabla 25. Resultados de prueba de jarras con sulfato de aluminio líquido en turbiedades bajas (13.8 – 19.5 UNT) de agua cruda.	119
Tabla 26. Resultados de turbiedad vs dosificación de coagulante en prueba de jarras con sulfato de aluminio líquido en turbiedades altas (29.1 – 29.5 UNT) de agua cruda.	120
Tabla 27. Resultados de prueba de jarras con hidroxiclورو de aluminio (PAC) en turbiedades bajas (4.65 – 4.9 UNT) de agua cruda.	122
Tabla 28. Resultados de prueba de jarras con hidroxiclورو de aluminio (PAC) en turbiedades altas (18.6 – 20.1 UNT) de agua cruda.	123
Tabla 29. Resultados de la experimentación en planta piloto utilizando 25 mg/L de sulfato de aluminio granular y 10 mg/L de cal.	129
Tabla 30. Resultados de la experimentación en planta piloto utilizando 37 mg/L de sulfato de aluminio líquido y 4 mg/L de cal.	129
Tabla 31. Resultados de la experimentación en planta piloto utilizando 16 mg/L de PAC, sin cal.	129
Tabla 32. Dosificación Óptima experimental de Pre-alcalinizante y Coagulante según el rango de turbiedad.	132
Tabla 33. Costos de la planta El Dorado a lo largo del año 2017.	141
Tabla 34. Precio por kilogramo de insumos de plantas de tratamiento del Acueducto de Bogotá para el año 2017.	142
Tabla 35. Costos de los productos químicos utilizados en la PTAP El Dorado durante el año 2017.	143
Tabla 36. Sobrecostos actuales de la planta El Dorado en sulfato de aluminio granular.	144
Tabla 37. Sobrecostos actuales de la planta El Dorado en cal hidrata como pre-alcalinizante.	146
Tabla 38. Sobrecostos totales de sulfato de aluminio granular y cal hidrata como pre-alcalinizante en PTAP El Dorado para el año 2017.	147
Tabla 39. Representación de costos teóricos de sulfato de aluminio granular por año.	148
Tabla 40. Costos teóricos de sulfato de aluminio líquido, por año.	149
Tabla 41. Costos teóricos de hidroxiclورو de aluminio, por año.	150
Tabla 42. Ventajas y desventajas de dosificación directa o por disolución del hidroxiclورو de aluminio.	154
Tabla 43. Costos por unidad y totales de requerimientos técnicos para implementación de nuevo coagulante.	158
Tabla 44. Flujo de efectivo para el primer año (2019) del proyecto.	161
Tabla 45. Valores de VPN acumulado para cada uno de los meses del horizonte de planeación total del proyecto (5 años).	162

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Condiciones de mezcla del coagulante.	30
Figura 2. Mecanismos de coagulación.	31
Figura 3. Vista panorámica de los filtros, sedimentadores y floculadores de la PTAP El Dorado.	40
Figura 4. Compuestos iónicos asociables al aporte de alcalinidad rangos de pH.	48
Figura 5. Mapa hidrológico de los diferentes meses del año en Cundinamarca, Colombia.	52
Figura 6. Diagrama del proceso de potabilización en PTAP El Dorado.	53
Figura 7. Diagrama de bloques de proceso actual de potabilización en PTAP El Dorado.	54
Figura 8. Vista satelital de la PTAP El Dorado.	55
Figura 9. Cámara de rebose en PTAP El Dorado.	56
Figura 10. Representación del sistema de aireación en cascada.	60
Figura 11. Cámara de aireación en cascada de la PTAP El Dorado.	60
Figura 12. Esquema de tres secciones de canaleta Parshall. Arriba: vista superior. Abajo: vista lateral.	62
Figura 13. Vista lateral y frontal de los floculadores en serie de la PTAP El Dorado.	65
Figura 14. Sistema de aspas de los floculadores de la PTAP El Dorado.	66
Figura 15. Floculadores en reposo y en funcionamiento, respectivamente, en la PTAP El Dorado.	66
Figura 16. Columna para análisis de sedimentación con diferentes dimensiones.	72
Figura 17. Esquema del sedimentador.	73
Figura 18. Sedimentadores de la PTAP El Dorado	73
Figura 19. Esquema de sistema de filtros con antracita como medio filtrante.	75
Figura 20. Sistema de filtros de la PTAP El Dorado.	76
Figura 21. Evaporador de cloro líquido.	78
Figura 22. Sistema de dosificación de sulfato de aluminio granular en PTAP El Dorado.	85
Figura 23. Tanques de disolución de coagulante y cal hidrata en PTAP El Dorado.	85
Figura 24. Sistema de dosificación de cal hidrata en PTAP El Dorado.	86
Figura 25. Equipo de Jarras proporcionado por la plata El Dorado para experimentación.	111
Figura 26. Ensayo de jarras en el proceso de floculación.	113
Figura 27. Ensayo de jarras en el proceso de sedimentación.	113
Figura 28. Agua clarificada.	114

Figura 29. Vista lateral y trasera, respectivamente, de la planta piloto Dorado.	El	128
Figura 30. Forma general de flujo de efectivo para evaluación financiera.		153
Figura 31. Bomba dosificadora MAGDOS DE/DX 100.		155
Figura 32. Tanque de almacenamiento de COLEMPAQUES.		157

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Velocidad relativa de las paletas con respecto al fluido.	67
Ecuación 2. Potencia disipada en la mezcla.	67
Ecuación 3. Gradiente de velocidad.	67
Ecuación 4. Tiempo de retención.	68
Ecuación 5. Dosificación alcalinizante con modelo de regresión logarítmica.	94
Ecuación 6. Dosificación de coagulante con modelo de regresión logarítmica.	98
Ecuación 7. Relacion dependiente de la concentración del pre-alcalinizante con respecto a la concentración del coagulante.	100
Ecuación 8. Dosificación Alcalinizante para el sulfato de aluminio granular, con correlación experimental.	134
Ecuación 9. Dosificación Coagulante sulfato de aluminio granular, con correlación experimental.	134
Ecuación 10. Dosificación Alcalinizante para el sulfato de aluminio líquido, con correlación experimental.	134
Ecuación 11. Dosificación Coagulante sulfato de aluminio líquido, con correlación experimental.	134
Ecuación 12. Dosificación Coagulante Hidroxicloruro de Aluminio, con correlación experimental.	134
Ecuación 13. Consumo en masa de reactivo diario.	135
Ecuación 14. Coagulante en exceso experimental.	136
Ecuación 15. Coagulante en exceso histórico.	137
Ecuación 16. Correlación experimental para el pre-alcalinizante en exceso.	139
Ecuación 17. Correlación de datos históricos para el pre-alcalinizante en exceso.	139
Ecuación 18. Costo diario de químico.	144
Ecuación 19. Flujo volumétrico.	156
Ecuación 20. Tasa de interés mensual.	159
Ecuación 21. Periodo.	160
Ecuación 22. Valor presente neto.	160
Ecuación 23. Valor presente neto acumulado.	160

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Turbiedad del agua cruda (en UNT) en el transcurso del año 2017 en PTAP El Dorado.	45
Gráfica 2. Color aparente de agua cruda a lo largo del año 2017 en PTAP El Dorado.	46
Gráfica 3. pH del agua cruda a lo largo del 2017 en PTAP El Dorado.	47
Gráfica 4. Alcalinidad del agua cruda en el año 2017 en PTAP El Dorado.	48
Gráfica 5. Conductividad eléctrica del agua cruda en PTAP El Dorado.	49
Gráfica 6. Hierro presente en agua cruda en el año 2017 en PTAP El Dorado.	50
Gráfica 7. Promedio de caudal de agua cruda (en m ³ /s) que recibe la PTAP El Dorado durante un año.	58
Gráfica 8. Frecuencia de distintos caudales de agua cruda en el año 2017, en PTAP El Dorado.	58
Gráfica 9. Gradiente de velocidad en cada uno de los tanques de floculación de la PTAP El Dorado.	70
Gráfica 10. Trayectoria de la turbiedad del agua cruda en el proceso durante el año 2017.	80
Gráfica 11. Trayectoria del pH del agua cruda a lo largo del proceso de tratamiento durante el año 2017.	81
Gráfica 12. Trayectoria de la conductividad promedio del agua cruda en el proceso de tratamiento durante el año 2017.	82
Gráfica 13. Relación de pre-alcalinizante con el pH del agua del proceso para el año 2017.	88
Gráfica 14. Relación de coagulante con el pH del agua del proceso en el año 2017.	89
Gráfica 15. Relación de dosificación de coagulante con la turbiedad del agua cruda en PTAP El Dorado en el año 2017.	91
Gráfica 16. Relación de la dosificación de coagulante y pre-alcalinizante en PTAP El Dorado en el año 2017.	92
Gráfica 17. Sobredosificación de cal hidrata en PTAP El Dorado para el año 2017.	94
Gráfica 18. Sobredosificación de cal hidrata, en Kilogramos, en PTAP El Dorado, año 2017.	96
Gráfica 19. Sobredosificación de coagulante en PTAP El Dorado.	98
Gráfica 20. Sobredosificación de coagulante, en Kilogramos, en PTAP El Dorado, año 2017.	99
Gráfica 21. Relación de valor real y valor teórico de dosificación de coagulante.	100
Gráfica 22. Resultados de turbiedad vs dosificación de coagulante en prueba de jarras con sulfato de aluminio granular en turbiedades bajas (3.6 – 4.89 UNT) de agua cruda.	117

Gráfica 23. Resultados de turbiedad vs dosificación de coagulante en prueba de jarras con sulfato de aluminio granular en turbiedades altas (15 – 23.5 UNT) de agua cruda.	118
Gráfica 24. Resultados de turbiedad vs dosificación de coagulante en prueba de jarras con sulfato de aluminio líquido en turbiedades bajas (13.8 – 19.5 UNT) de agua cruda.	121
Gráfica 25. Resultados de turbiedad vs dosificación de coagulante en prueba de jarras con sulfato de aluminio líquido en turbiedades altas (29.1 – 29.5 UNT) de agua cruda.	121
Gráfica 26. Resultados de turbiedad vs dosificación de coagulante en prueba de jarras con hidroxiclورو de aluminio (PAC) en turbiedades bajas (4.65 – 4.9 UNT) de agua cruda.	124
Gráfica 27. Resultados de turbiedad vs dosificación de coagulante en prueba de jarras con hidroxiclورو de aluminio (PAC) en turbiedades altas (18.6 – 20.1 UNT) de agua cruda.	125
Gráfica 28. Resultados de dosificación de los diferentes coagulantes (en mg/L) con la turbiedad del agua clarificada y filtrada.	130
Gráfica 29. Relación de la dosificación de pre-alcalinizante con cada coagulante propuesto.	133
Gráfica 30. Comparación de la dosificación del coagulante actual a lo largo del año 2017.	136
Gráfica 31. Correlación de la adición en exceso del coagulante a lo largo del año 2017.	137
Gráfica 32. Comparación de la dosificación del pre-alcalinizante actual a lo largo del año 2017.	138
Gráfica 33. Correlación de la adición en exceso del Pre-alcalinizante a lo largo del año 2017.	140
Gráfica 34. Sobrecostos actuales, en millones de pesos, de la planta El Dorado en sulfato de aluminio granular.	145
Gráfica 35. Relación de costos de coagulación con la turbiedad del agua cruda.	151
Gráfica 36. Representación de la frecuencia de distintos valores de turbiedad en el agua cruda que ingresa a la PTAP El Dorado.	152
Gráfica 37. Flujo volumétrico en relación con la presión de la bomba MAGDOS DE/DX 100.	156

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Análisis fisicoquímicos y microbiológicos del agua cruda	170
Anexo B. Instructivo de ensayo de jarras	172
Anexo C. Instructivo de manejo de planta piloto El Dorado	176
Anexo D. Resultados de la experimentación nivel laboratorio	187
Anexo E. Datos históricos de dosificaciones y sustancias químicas en PTAP El Dorado, año 2017	211
Anexo F. Cotización de bomba dosificadora	214

LISTA DE ABREVIATURAS

<i>Abreviatura</i>	<i>Término</i>
PTAP	Planta de Tratamiento de Agua Potable
UNT ó NTU	Unidades Nefelométricas de Turbiedad
mg	Miligramos
g	Gramos
Kg	Kilogramos
m	Metros
Km	Kilómetros
NTC	Norma técnica de calidad
ISO	Organización Internacional para la Estandarización
mg/L	Miligramos por litro
L	Litro
mL	Mililitros
UC	Unidades de color
UpH	Unidades de pH
s	Segundos
RPM	Revoluciones por minuto
°C	Grados Celcius

GLOSARIO

AGUA CRUDA: agua libre de todo tipo de tratamiento, captada de la represa aledaña a la planta, a la cual se le va a realizar el proceso de potabilización.

ALCALINIDAD: es un método de análisis, con el que se determina el contenido de bicarbonatos (HCO_3^-), carbonatos (CO_3^{2-}) e hidróxidos en un agua natural o tratada. La alcalinidad tiene relación con el pH del agua.

ALCALINIZACIÓN: proceso que consiste en la adición de una sustancia química, llamada alcalinizante, al agua que se quiere tratar, con el fin de regular el pH.

ANTRACITA: carbón mineral de color negro brillante, con carácter no aglomerante y de baja volatilidad debido a su pureza, utilizada en plantas de tratamiento de agua como material filtrante

CANALETA PARSHALL: canal cuya estructura presenta una disminución del área (forma de garganta), debido a la cual se presenta un incremento en el volumen, creando un remolino donde se adiciona la sustancia coagulante.

COAGULACIÓN: proceso donde existe la formación de partículas debido a la adición de una sustancia coagulante y la aplicación de energía mecánica en forma de mezclado, lo cual desestabiliza las partículas por neutralización de las cargas negativas de los coloides.

COLOIDE: partículas con suspensiones estables, cuya sedimentación de forma natural no es posible, por lo cual se debe recurrir a sustancias coagulantes. Estas partículas se encuentran a merced del equilibrio coloidal.

FLOC: conjunto de partículas microscópicas aglutinadas en masas grandes y con una densidad relativa mayor, logradas mediante tratamiento químico, físico y biológico.

FLOCULACIÓN: fenómeno por el cual las partículas ya desestabilizadas (mediante coagulación) chocan unas con otras formando coágulos de mayor tamaño.

FLUJO CRÍTICO: es un estado teórico en corrientes naturales y representa el punto de transición entre los regímenes subcrítico y supercrítico.

FLUJO SUBCRÍTICO: también conocido como flujo tranquilo, se da en canales abiertos, tiene una velocidad relativa baja y la profundidad es relativamente grande, prevalece la energía potencial. Corresponde a un régimen de llanura.

FLUJO SUPERCRÍTICO: tiene una velocidad relativamente alta y poca profundidad, se da en canales abiertos y prevalece la energía cinética.

PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN: partículas que se encuentran suspendidas en las fuentes de agua después de 10 minutos de asentamiento, provenientes de la erosión de suelos, sustancias minerales y descomposición de sustancias orgánicas.

pH: Medida del grado de acidez o basicidad de una sustancia o solución acuosa en una escala de 0 a 14 unidades; siendo 7 un pH neutro, valores menores un medio ácido y valores mayores, un medio básico.

SÓLIDOS DISUELTOS: todo material soluble y coloidal presente en el agua.

SÓLIDOS SEDIMENTABLES: cantidad de material que sedimenta cuando el agua se deja en reposo por una hora. Representa la cantidad aproximada de lodo que se obtiene por una decantación primaria.

SÓLIDOS TOTALES: materia sólida presente después de un proceso de evaporación del agua, entre 103 – 105 °C.

TURBIEDAD: forma indirecta de medir la concentración de las partículas suspendidas en un fluido mediante el efecto de la dispersión que las partículas presentan al paso de la luz.

RESUMEN

La empresa de Acueducto, Agua y Alcantarillado de Bogotá, es una entidad pública prestadora de servicios de acueducto y alcantarillado sanitario y pluvial, cuya misión es gestionar de forma integral el agua y el saneamiento básico. Tiene a su cargo una serie de plantas de tratamiento de agua potable en los alrededores de Bogotá. Este trabajo se enfoca y se desarrolla en la planta de tratamiento El Dorado, la cual, es la encargada de distribuir el agua para consumo a más de 423650 habitantes de la localidad de Usme, tratando agua proveniente de los embalses de Chisacá y La Regadera.

Esta planta cuenta con cuatro trenes floculadores – sedimentadores, un tanque de rebose y uno de aireación, una canaleta Parshall, sistema de desinfección, estabilización de pH y almacenamiento, con una capacidad promedio para tratar 1600 litros de agua por segundo.

Este trabajo se enfocará en el subproceso de coagulación y floculación, el cual es una parte fundamental para la eliminación de sólidos en suspensión y coloides disueltos en el agua, y ocurre desde la canaleta Parshall, lugar donde se adiciona la sustancia coagulante, hasta los trenes floculadores, donde termina esta etapa.

Debido a que actualmente se utiliza como coagulante el sulfato de aluminio granular, se han experimentado problemas con el sistema de dosificación del reactivo, generando pérdidas monetarias (debido a que se evidencia subdosificación y sobredosificación) de aproximadamente 15.7 millones de pesos anuales y aumentando la cantidad de trabajo realizado en el proceso (necesidad de llevar a cabo la dilución previa de los gránulos de coagulante); por esta razón se propone el cambio de sulfato de aluminio granular a líquido. Además, previo a la elaboración de este proyecto, se realizaron búsquedas a cerca de otros posibles coagulantes, teniendo como resultado el hidroxiclورو de aluminio, el cual puede ayudar en el subproceso de alcalinización, requiriendo menos cantidad de alcalinizante debido a sus propiedades en el ajuste del pH, por esta razón se ha decidido proponerlo también para la experimentación como un posible sustituyente del coagulante actualmente utilizado.

Al llevar a cabo el desarrollo experimental y el análisis financiero de los coagulantes (propuestos y actual) se encuentra una gran ventaja en la utilización de hidroxiclورو de aluminio como coagulante en el proceso de potabilización, debido a que no requiere una alta dosificación ni el uso de un pre-alcalinizante; lo cual reduce costos en el proceso, generando mayores ganancias para la empresa.

PALABRAS CLAVE: Tratamiento de agua, coagulación, floculación, sólidos en suspensión, coloides.

INTRODUCCIÓN

El diagnóstico y evaluación realizados en este documento, están referidos al tratamiento de agua que se lleva a cabo en la Planta de Tratamiento de Agua Potable El Dorado, perteneciente a la empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá, donde se realizará la sustitución del reactivo coagulante, sulfato de aluminio granular, por otro cuya dosificación sea más exacta y requiera menos cantidad de trabajo para llevar a cabo el proceso, con la finalidad de que el agua tratada cumpla con todas las normas y reglamentos necesarios para ser consumida, reduciendo costos de tratamiento y tiempo en el mismo.

Inicialmente se llevó a cabo un diagnóstico del proceso actual para determinar las características del agua cruda que ingresa a la planta y del agua tratada que sale de esta, los equipos y los reactivos usados. Se determinó que efectivamente existía una falta de exactitud en la dosificación del coagulante granular, lo que hacía que en ocasiones la cantidad dosificada fuera menor o mayor a la requerida.

Posteriormente, se evaluaron los diferentes coagulantes propuestos con diferentes dosificaciones mediante una prueba de jarras en el laboratorio con el fin de determinar su comportamiento en diferentes turbiedades, y se encuentra la cantidad adecuada de cada uno de los reactivos. Luego se realizó una experimentación a nivel planta piloto con cada uno de los coagulantes y las dosificaciones óptimas obtenidas en el laboratorio. Por último, se realizó un análisis financiero del (los) coagulante(s) con mejor desempeño.

Así, a modo de conclusión, se sugiere uno de los coagulantes propuestos (teniendo en cuenta el desempeño en la experimentación y análisis de costos) como sustituto del sulfato de aluminio granular.

De acuerdo con los objetivos propuestos, este proyecto se encuentra dividido en 3 etapas básicas; diagnóstico del proceso actual, experimentación y evaluación financiera de los coagulantes y equipos necesarios para la implementación de cada uno.

En este trabajo se encuentra evidenciado el desarrollo experimental que se llevó a cabo y los detalles físicos y teóricos del proyecto, así como los resultados obtenidos, las conclusiones y recomendaciones necesarias.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el uso de sulfato de aluminio líquido e hidroxiclорuro de aluminio como sustitutos del sulfato de aluminio granular en el proceso de coagulación-floculación en PTAP El Dorado.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Diagnosticar el proceso actual de la planta de tratamiento de agua potable El Dorado.
2. Evaluar el desempeño de los coagulantes mediante experimentación en el laboratorio y planta piloto.
3. Realizar un análisis financiero de los coagulantes con mejor desempeño.

1. GENERALIDADES

En este capítulo se describen los aspectos generales del proceso de potabilización de agua cruda, se hace mención a los conceptos de coagulación - floculación, y se muestra la normativa, establecida por el estado colombiano, con la cual se rige la PTAP El Dorado para garantizar un agua tratada óptima para el consumo humano.

1.1 ASPECTOS GENERALES DEL PROCESO DE POTABILIZACIÓN DEL AGUA

El agua es una sustancia elemental que permite la vida en nuestro planeta, es un líquido incoloro, inodoro e insípido, que en grandes masas adquiere un color azulado. La composición y estructura molecular del agua son responsables de las propiedades físico-químicas que la distinguen de otras sustancias.

El agua es un compuesto que se forma a partir de la unión, mediante enlaces covalentes, de dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, cuya fórmula molecular es H_2O y se trata de una molécula muy estable. Debido a que los átomos de hidrógeno y oxígeno en la molécula contienen cargas opuestas, las moléculas de agua vecinas se atraen entre sí, por esta razón se unen con gran facilidad, formando enormes cadenas que constituyen el líquido que da la vida a nuestro planeta¹.

En la actualidad, este líquido es utilizado para múltiples propósitos, uno de los cuales es el abastecimiento público, el cual cubre uso doméstico, industrial y comercial, siendo necesario acondicionar el agua según los requerimientos de calidad necesarias para el uso que se le vaya a dar.

Para el uso doméstico, con énfasis en el consumo, el agua debe cumplir con cierta normatividad que la hace apta para el bienestar humano, por esta razón ha sido de vital importancia para la sociedad desarrollar técnicas y procesos para lograr cumplir con esta normatividad, la cual cataloga el agua como potable una vez cumpla con cada uno de los parámetros establecidos. De esta manera, se puede definir el agua potable como aquella que puede ser consumida por los seres humanos sin ningún tipo de restricción, ya que se encuentra absolutamente limpia de sólidos suspendidos, coloides, organismos patógenos, corrosión, metales como hierro y manganeso, entre otros. Debido a que encontrar fuentes naturales de agua potable es bastante escaso y complicado, la sociedad ha optado por la producción de agua potable a partir de una fuente de aprovisionamiento de agua contaminada por sustancias introducidas naturalmente o como resultado de las

¹ AGUA.ORG.MX. ¿Qué es el agua?. [en línea]. < www.agua.org.mx/que-es/ > [citado el 26 de febrero de 2018]

actividades del hombre, siendo esto posible gracias al proceso que se lleva a cabo en las plantas de potabilización, como es el caso de El Dorado, destinadas para tal fin.

En ese orden de ideas, el tratamiento de agua consiste en una serie de operaciones, que se llevan a cabo con el fin de cambiar sus características físicas, químicas y organolépticas, teniendo en cuenta la normatividad vigente en el país, para lograr como producto final, un agua apta para el consumo humano; agua potable².

Este proceso comienza con la captación del agua cruda (agua sin tratar) proveniente de una fuente natural como lo son los embalses, seguido a esto se lleva a una cámara de aireación y se realiza una pre-alcalinización para ayudar al ajuste del pH y facilitar la reacción con el coagulante, se separan los sólidos suspendidos y sedimentados del agua y se realiza una desinfección.

Para llevar a cabo este tratamiento se debe tener en cuenta la eficiencia de cada uno de los procesos unitarios que lo componen y las características del agua que ingresa y sale del proceso.

1.1.1 Características del agua. La cuantificación de la calidad del agua se hace por medio del análisis de sus características físicas, químicas y organolépticas.

1.1.1.1 Características físicas y organolépticas del agua. Estas características se pueden detectar por medio de los sentidos (sabor, textura, olor, color), lo cual implica una incidencia directa sobre las condiciones estéticas del agua.

El agua en su estado puro es tanto inodora como insípida, sin embargo, cuando sustancias orgánicas o inorgánicas se disuelven en ella, esta comienza a adquirir un color y olor distintos.

Las características físicas que debe tener el agua potable son:

Sabor, es insípida y no posee un sabor determinado (es un sabor neutro); color, el agua no posee un color determinado, es transparente y deja pasar los rayos de luz casi por completo; olor, es inodora; su turbiedad debe ser menor o igual a 2 NTU, su conductividad a 20 °C debe ser $4.2 \times 10^{-6} \text{ S/m}$ y su temperatura crítica, 374.1 °C³.

² FYNDECOL. Potabilización de agua en Colombia. [en línea]. <<https://tratamientodeagua.co/agua-potable/potabilizacion-agua-colombia/>> [citado el 26 de febrero de 2018]

³ ENCICLOPEDIA DE CARACTERÍSTICAS. Agua. [en línea]. <<https://www.caracteristicas.co/fisicas-del-agua/>> [citado el 26 de febrero de 2018].

1.1.1.2 Características químicas del agua. Estas se detectan cuando el agua cambia su composición, enfrentándose a distintas condiciones experimentales y siendo determinadas únicamente mediante ensayos químicos.

Algunas de las características químicas del agua son: pH de 7 (neutro); punto de fusión, 0 °C; punto de ebullición, 100 °C; peso atómico de 18; alcalinidad menor o igual a 200 mg de CaCO₃ por litro de agua⁴.

1.1.2 Procesos unitarios que componen el proceso de potabilización de agua. De manera general, un proceso de potabilización de agua se compone de una serie de procesos unitarios como lo son la captación del agua proveniente de un recurso natural, la canalización del agua captada hacia la planta de tratamiento, la coagulación – floculación y sedimentación, por medio de los cuales se eliminan los sólidos presentes en el agua, la filtración, cuyo resultado final es un agua más clara con una reducción importante de microorganismos, seguido a esto ocurre la desinfección para llevar a cabo la destrucción de agentes microbianos, luego la alcalinización (o estabilización de pH), y por último el almacenamiento del agua para su posterior distribución.

Este proyecto está basado en el subproceso de coagulación – floculación, por lo cual a continuación se verá y explicará más a fondo.

1.2 COAGULACIÓN – FLOCULACIÓN

En las plantas de potabilización de agua se pueden presentar diferentes mecanismos para la desestabilización de las partículas suspendidas (coagulación) y el transporte de estas dentro del líquido para formar coágulos de mayor tamaño (floculación).

1.2.1 Coagulación⁵. La coagulación es el tratamiento más eficaz pero también es el que representa un gasto elevado cuando no está bien realizado. Igualmente, es un método universal debido a que elimina una gran cantidad de sustancias de diversas naturalezas y materia de distinto peso, que, en comparación con otros métodos, son eliminados al menor costo posible.

⁴ REVISTA EJEMPLODE.COM. Características Químicas del Agua. [En línea] <https://www.ejemplode.com/38-quimica/3953-caracteristicas_quimicas_del_agua.html> [citado el 26 de febrero de 2018].

⁵ ANDÍA CÁRDENAS, Yolanda. Tratamiento de agua: Coagulación y floculación. Lima: Sedapal, 2000. Disponible en : <http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154>

Un proceso de coagulación mal realizado también puede conducir a una degradación rápida de la calidad del agua y representa gastos de operación no justificados. Por lo tanto, se considera que la dosis del coagulante condicione el funcionamiento de las unidades de decantación, y es imposible realizar una clarificación si la cantidad de coagulante adicionada está mal ajustada.

Existen diferentes factores que influyen en el proceso de coagulación, algunos de ellos son el pH, turbiedad, sales disueltas, temperatura del agua, tipo de coagulante utilizado, sistemas de aplicación de los coagulantes, entre otros, y la interrelación entre cada uno de ellos permite predecir cuáles son las cantidades de los coagulantes que se deben adicionar al proceso. De los anteriores factores, cabe resaltar la influencia de la dosis del coagulante, debido a que una poca cantidad de coagulante no neutraliza totalmente la carga de las partículas, por lo tanto la turbiedad residual es elevada; la alta cantidad de coagulante produce la inversión de la carga de las partículas, conduciendo a la formación de gran cantidad de microfloculos con tamaños muy pequeños y cuyas velocidades de sedimentación son muy bajas, obteniendo una turbiedad residual igualmente elevada.

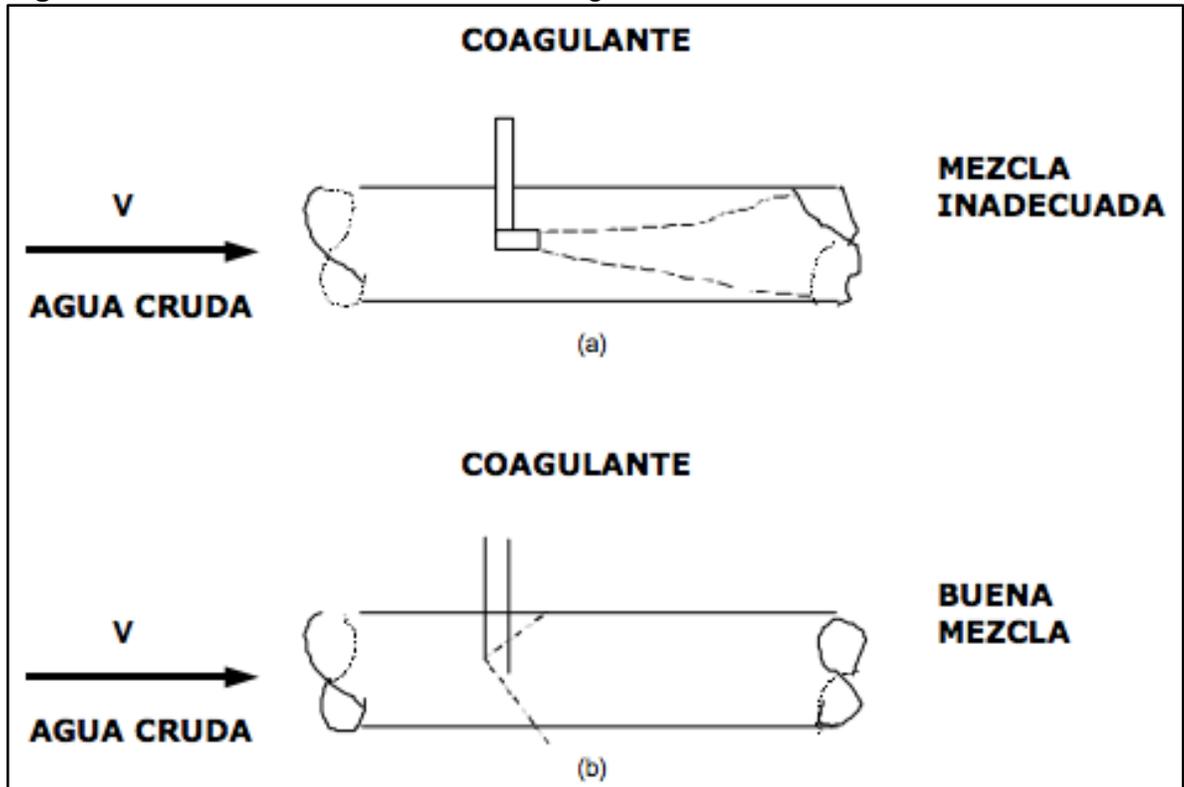
Del mismo modo, el sistema de aplicación del coagulante toma un papel importante en el proceso, debido a que para que exista una reacción adecuada del coagulante con el agua, la dosis de este debe adicionarse al agua de forma constante y uniforme en una unidad de mezcla rápida (mezcla energética y de corta duración), tal que el coagulante sea completamente dispersado y mezclado con el agua, y además, el sistema de dosificación debe proporcionar un caudal constante y fácilmente regulable⁶. En la **Figura 1** se observan las condiciones de mezcla del coagulante con el agua; se observa que la mejor mezcla (b) es cuando el coagulante adicionado se mezcla en su totalidad con el agua.

El mecanismo de dosificación del coagulante es de gran importancia debido a que este determina el grado de precisión con el cual se agrega la cantidad de químico necesario para llevar a cabo un proceso óptimo. De acuerdo al tipo de coagulante utilizado en el proceso (líquido, sólido) y a la concentración del mismo, debe determinarse previamente la necesidad de llevar a cabo una disolución. El coagulante se dosifica al agua que ingresa al proceso mediante dosificadores gravimétricos, tipo volumétricos, dosificadores en solución, entre otros, este sistema debe proporcionar un caudal constante y fácilmente regulable. Se logra una dispersión adecuada mediante agitación rápida, la cual ocurre en la Canaleta

⁶ ANDÍA CÁRDENAS, Yolanda. Tratamiento de agua: Coagulación y floculación. Lima: Sedapal, 2000. Disponible en : <http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154>

Parshall al momento de agregarlo, y una agitación lenta en la cual ocurre la floculación⁷.

Figura 1. Condiciones de mezcla del coagulante.



Fuente: ANDÍA CÁRDENAS, Yolanda. Tratamiento de agua: Coagulación y floculación. Lima: Sedapal, 2000.

1.2.1.1 Tipos de coagulación⁸. Se presentan dos tipos básicos de coagulación debido al sulfato de aluminio y las sales de aluminio; por adsorción y por barrido. En la Figura 2 se muestran los tipos o mecanismos de coagulación.

- La coagulación por adsorción se lleva a cabo cuando el agua presenta una concentración de partículas en estado coloidal; cuando el coagulante es adicionado al agua turbia los productos solubles de los coagulantes son

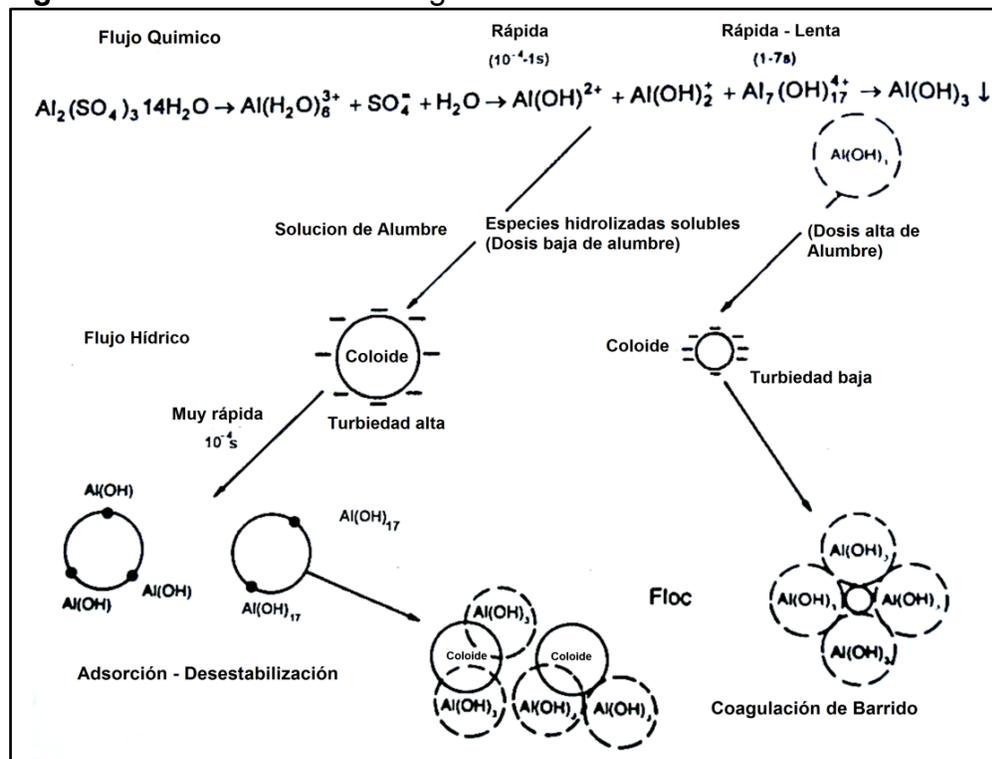
⁷ ANDÍA CÁRDENAS, Yolanda. Tratamiento de agua: Coagulación y floculación. Lima: Sedapal, 2000. Disponible en : <http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154>

⁸ ANDÍA CÁRDENAS, Yolanda. Tratamiento de agua: Coagulación y floculación. Lima: Sedapal, 2000. Disponible en : <http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154>

absorbidos por los coloides y forman los flocúlos en forma casi instantánea. Se absorben las sustancias hidrolizadas solubles ($\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}(\text{OH})_{17}^{4+}$) sobre el coloide, lo que resulta en la desestabilización de este, su cinética de reacción es muy rápida (microsegundos), con un máximo de un segundo si hay formación de polímeros. En este mecanismo los coagulantes deben introducirse en el agua cruda tan rápido como sea posible.

- La coagulación por barrido se presenta cuando el agua es clara (presenta baja turbiedad) y la cantidad de partículas coloides es baja; en este caso, las partículas son entrampadas al producirse una sobresaturación de precipitado de sulfato de aluminio (coagulante). El coloide presente en la solución es atrapado en el hidróxido de aluminio que precipita, tiene una cinética de reacción lenta y ocurre entre 1 y 7 segundos, no se requiere de un tiempo corto para la adición del coagulante debido a que la coagulación requiere el precipitado del coagulante⁹.

Figura 2. Mecanismos de coagulación.



Fuente: ANDÍA CÁRDENAS, Yolanda. Tratamiento de agua: Coagulación y floculación. Lima: Sedapal, 2000.

⁹ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Purificación del agua. 2da edición. Bogotá D.C.: Escuela colombiana de ingenieros, 2006.

1.2.2 Floculación¹⁰. La floculación es el proceso inmediatamente siguiente a la coagulación, este consiste en la agitación de la masa coagulada con el fin de permitir el crecimiento y aglomeración de los flóculos recién formados con la finalidad de aumentar el tamaño y peso necesarios para sedimentar con facilidad.

Este proceso se ve favorecido por el mezclado lento, el cual permite aglomerar poco a poco los flóculos; un mezclado demasiado intenso rompe los aglomerados, siendo difícil volver a formar su tamaño y fuerza óptimos.

1.2.2.1 Tipos de floculación. Se presentan dos tipos de floculación; pericinética y ortocinética.

La floculación pericinética es producida por el movimiento natural de las moléculas del agua y está inducida por la energía térmica, este movimiento es conocido como el movimiento browniano.

La floculación ortocinética se basa en las colisiones de las partículas debido al movimiento del agua, el cual es inducido por una energía exterior a la masa del agua y que puede ser de origen mecánico o hidráulico.

Después que el agua es coagulada es necesario que se produzca la aglomeración de los microflóculos; para que esto suceda se produce primero la floculación pericinética y luego la ortocinética¹¹.

1.3 EFECTIVIDAD EN EL PROCESO DE TRATAMIENTO

El proceso de potabilización del agua tiene diferentes tratamientos que cumplen funciones específicas y alteran cada uno de manera diferente los parámetros del agua, teniendo en cuenta la trayectoria en cada una de las fases en la planta El Dorado, se puede evaluar la efectividad en la remoción de algunos contaminantes primordiales del agua según se muestra en la **tabla 1**.

¹⁰ ANDÍA CÁRDENAS, Yolanda. Tratamiento de agua: Coagulación y floculación. Lima: Sedapal, 2000. Disponible en : <http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154>

¹¹ ANDÍA CÁRDENAS, Yolanda. Tratamiento de agua: Coagulación y floculación. Lima: Sedapal, 2000. Disponible en : <http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154>

Tabla 1. Remoción de contaminantes del agua cruda con el proceso de potabilización.

Contaminantes	Aireación	Alcalinización	Coagulación, floculación y sedimentación	Filtración	Desinfección
Color			X	X	X
sabor y olor	X			X	X
Sólidos disueltos totales					
Contaminantes inorgánicos					
Arsénico		X	X	X	
Bario		X			
Berilio		X	X	X	
Cadmio		X	X	X	
Cromo (+3)		X	X	X	
Cianuros					X
Dureza		X			
Fluoruros		X			
Hierro		X			
Manganeso		X	X	X	
Mercurio inorgánico		X	X	X	
Níquel		X			
Selenio(+4)			X	X	
Sulfatos					
Zinc		X			
Contaminantes orgánicos					
Orgánicos volátiles	X			X	
Orgánicos sintéticos				X	
Pesticidas/ herbicidas				X	
Carbono orgánico disuelto			X	X	

Fuente: ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Purificación del agua. 2da edición. Bogotá D.C.: Escuela colombiana de ingenieros, 2006.

1.4 NORMAS DE CALIDAD DEL AGUA

A continuación se muestran las normas colombianas que tienen como objetivo establecer los requisitos físicos, organolépticos, químicos y microbiológicos que debe cumplir el agua tratada para catalogarse como potable:

1.4.1 Resolución 2115 de 2007. Muestra las características, instrumentos básicos y frecuencias para el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para consumo humano. Fue expedido por el Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

1.4.2 Resolución 1096 de 2000. Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS. El presente Reglamento tiene por objeto señalar los requisitos técnicos que deben cumplir los diseños, las obras y procedimientos correspondientes al Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico y sus actividades complementarias, señaladas en el artículo 14, numerales 14.19, 14.22, 14.23 y 14.24 de la Ley 142 de 1994, que adelanten las entidades prestadoras de los servicios públicos municipales de acueducto, alcantarillado y aseo o quien haga sus veces. Expedido por el Ministerio de Desarrollo.

1.4.3 Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS), TÍTULO C Sistemas de potabilización Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. El presente título está dirigido al desarrollo de estudios y diseño de todos los componentes de un sistema de potabilización de agua, en sus etapas de conceptualización, diseño, puesta en marcha, operación y mantenimiento que se desarrolle en la República de Colombia, con el fin de garantizar su seguridad, durabilidad, funcionalidad, calidad, eficiencia, sostenibilidad y redundancia dentro de un nivel de complejidad determinado.

1.4.4 Decreto 1575 de 2007. Tiene el objetivo de establecer el sistema para la protección y control de la calidad del agua, con el fin de monitorear, prevenir y controlar los riesgos para la salud humana causados por su consumo, exceptuando el agua envasada. Aplica a todas las personas prestadoras que suministren o distribuyan agua para consumo humano, ya sea cruda o tratada, en todo el territorio nacional, independientemente del uso que de ella se haga para otras actividades económicas, a las direcciones territoriales de salud, autoridades ambientales y sanitarias y a los usuarios. Expedido por el Ministerio de Protección Social.

1.4.5 Resolución 549 de 2017. “Por la cual se adopta la guía que incorpora los criterios y actividades mínimas de los estudios de riesgo, programas de reducción de riesgo y planes de contingencia de los sistemas de suministro de agua para consumo humano”. Expedida por el Ministerio de Salud y Protección Social y Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.

1.4.6 NTC GP 1000:2009. Norma técnica de Calidad en la Gestión Pública. Icontec.

1.4.7 NTC-ISO 9001:2015. Sistemas de Gestión de la Calidad. Requisitos. Icontec.

1.4.8 Norma Nacional de calidad de agua. Antes de proceder con la identificación de la calidad del agua tratada se muestra una clasificación del agua cruda y los tratamientos mínimos que se le debe realizar para obtener, de la autoridad de salud competente, la correspondiente autorización sanitaria para el tratamiento del agua que se va a utilizar para consumo humano, en cumplimiento del artículo 28 del Decreto 1575 de 2007¹².

La **tabla 2** presenta una clasificación de fuentes de agua cruda en función de algunos parámetros de caracterización física, química y microbiológica, y el grado de tratamiento mínimo que se recomienda.

Tabla 2. Clasificación de fuentes de agua cruda en función de distintos parámetros físico-químicos y microbiológicos.

CLASIFICACIÓN DE LAS FUENTES SEGÚN EL RAS-2000 TÍTULO C				
Parámetros	Aceptable	Regular	Deficiente	Muy deficiente
DBO mg/L				
Promedio mensual	≤ 1,5	1,5 - 2,5	2,5 - 4,0	> 4,0
Máximo diario	1 - 3	3 -4	4 - 6	> 6
Coliformes totales NMP/100ml				
Promedio mensual	0 - 50	50 - 500	500 - 5000	> 5000
Oxígeno disuelto mg/L	≥ 4	≤ 4	≤ 4	< 1,2
pH promedio	6,0 - 8,5	5,0 - 9,0	3,8 - 10,5	> 6,4

¹² MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO. DIRECCIÓN DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico (RAS-2000). Bogotá D.C.: 2000. (Vol. TÍTULO C. Sistemas de potabilización).

Tabla 2. (continuación)

Turbiedad UNT	< 2	2 - 40	40 - 150	> 6,5
Color UPC	< 10	10 -20	20 - 40	> 6,6
Gusto y olor	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Rechazable
Cloruros mg/L	< 50	50 - 150	150 - 200	> 300
Fluoruros mg/L	< 1,2	< 1,2	< 1,2	> 1,7
Tratamiento necesario				
Convencional	No	No	Si	Si
Específicos	No	No	No	Si
Procesos utilizados	Desinfección + estabilización	Filtración + desinfección + estabilización	Pretratamiento + [coagulación + floculación + sedimentación+ filtración] + desinfección + estabilización	Pretratamiento + [coagulación + floculación + sedimentación+ filtración] + desinfección + estabilización + tratamientos específicos

Fuente: MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO. DIRECCIÓN DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico (RAS-2000). Bogotá D.C.: 2000. (Vol. TÍTULO C. Sistemas de potabilización).

La **tabla 3** muestra los valores máximos admisibles de las normas microbiológicas, físicas y químicas de la calidad del agua para consumo humano que, de acuerdo con la Resolución 2115 de 2007, se deben cumplir en todo el territorio nacional en la red de distribución de los sistemas de acueducto independiente del nivel de complejidad del sistema.

Tabla 3. Valores máximos admisibles en el agua para consumo humano, según la resolución 2115/07.

CARACTERÍSTICAS	VALOR MÁXIMO ADMISIBLE SEGÚN RESOLUCIÓN 2115/07	CARACTERÍSTICAS	VALOR MÁXIMO ADMISIBLE SEGÚN RESOLUCIÓN 2115/07
Microbiológicas		Thialometanos totales	0,2
Coliformes totales UFC/100 cm ³	0	Hidrocarburos aromáticos policíclicos	0,01

Tabla 3. (continuación)

E-Coli UFC/100 cm ³	0	Química que tiene implicaciones sobre la salud humana	
Físicas		Carbono orgánico total mg/L	5
pH	6,5 - 9,0	Nitritos mg/L	0,1
Turbiedad UNT	≤ 2	Nitratos mg/L	10
Color aparente UPC	≤ 15	Fluoruros mg/L	1
Conductividad µs/cm	1000	Valor máximo compuestos con consecuencias económicas e indirectas sobre la salud	
Olor y sabor	Aceptable	Calcio mg/L	60
Valor máximo compuestos con efecto adverso en la salud		Alcalinidad total mg/L	200
Antimonio mg/L	0,02	Cloruros mg/L	250
Arsénico mg/L	0,01	Aluminio mg/L	0,2
Bario mg/L	0,7	Dureza total mg/L	300
Cadmio mg/L	0,003	Hierro total mg/L	0,3
Cianuro libre y disociable mg/L	0,05	Magnesio mg/L	36
Cobre mg/L	1	Manganeso mg/L	0,1
Cromo total mg/L	0,05	Molibdeno mg/L	0,07
Mercurio mg/L	0,001	Sulfatos mg/L	250
Níquel mg/L	0,02	Zinc mg/L	3
Plomo mg/L	0,01	Fosfatos mg/L	0,5
Selenio mg/L	0,01		

Fuente: MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO. DIRECCIÓN DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico (RAS-2000). Bogotá D.C.: 2000. (Vol. TÍTULO C. Sistemas de potabilización).

1.4.9 Normas internas de la planta de tratamiento de agua potable, El Dorado. El cumplimiento de la resolución 2115/07 para la calidad del agua de consumo humano es de carácter obligatorio en todas las plantas de tratamiento de agua potable de la empresa de Agua, Acueducto y Alcantarillado de Bogotá; aunque cada una de las plantas maneja sus propios límites, los cuales dependen del cuerpo de agua donde es captada y de los químicos utilizados para el tratamiento. La PTAP El Dorado maneja las normas internas establecidas en el

protocolo de los datos históricos presentados del año inmediatamente anterior, los cuales se consignan en la norma de servicio NS-067. Según los datos históricos presentados en el año 2017 los límites se encuentran en los rangos descritos en las **tablas 4, 5 y 6.**

Tabla 4. Parámetros internos de calidad de agua clarificada en PTAP El Dorado para el año 2018.

AGUA CLARIFICA (SALIDA SEDIMENTACIÓN)		
Parámetro	Especificaciones norma interna año 2018	
	Límite inferior	Límite superior
Turbiedad (UNT)	0,00	2,00
Color (UPC)	0,00	10,00
pH (UpH)	4,90	6,90
Alcalinidad (mg CaCO₃/L)	1,00	10,00

Fuente: Datos históricos, año 2017 de la Planta de Tratamiento de Agua Potable El Dorado.

Tabla 5. Parámetros internos de calidad de agua filtrada en PTAP El Dorado para el año 2018.

AGUA FILTRADA		
Parámetro	Especificaciones norma interna año 2018	
	Límite inferior	Límite superior
Turbiedad (UNT)	0,00	0,70
Color (UPC)	0,00	6,00
pH (UpH)	5,10	7,40
Alcalinidad (mg CaCO₃/L)	1,00	9,00

Fuente: Datos históricos, año 2017 de la Planta de Tratamiento de Agua Potable El Dorado.

Tabla 6. Parámetros internos de calidad de agua clarificada en PTAP El Dorado para el año 2018.

AGUA TRATADA		
Parámetro	Especificaciones norma interna año 2018	
	Límite inferior	Límite superior
Turbiedad (UNT)	0,00	0,80
Color (UPC)	0,00	10,00
pH (UpH)	6,50	8,10
Alcalinidad (mg CaCO₃/L)	3,00	13,00
Cloro Libre (mg/L)	0,70	2,00

Fuente: Datos históricos, año 2017 de la Planta de Tratamiento de Agua Potable El Dorado.

Estos límites se toman como guía a lo largo de la experimentación en la planta piloto y a nivel laboratorio para poder realizar la evaluación técnica de la dosificación de alcalinizante y de coagulante respectivamente, recreando las condiciones reales de la planta El Dorado.

2. DIAGNÓSTICO DEL PROCESO ACTUAL DE LA PLANTA

En este capítulo se dan a conocer las características y condiciones del proceso de potabilización de agua que se lleva a cabo actualmente en la planta de tratamiento El Dorado, así como ciertos aspectos generales de la planta.

2.1 ASPECTOS GENERALES DE LA PLANTA

El sistema de Abastecimiento Sur de la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, está conformado por cuatro plantas de tratamiento; La Laguna, Vitelma, Yomasa y El Dorado, esta última ubicada en el suroriente de la ciudad y puesta en operación el abril del año 2001. En la **figura 3**, se observa la vista panorámica de los filtros, sedimentadores y floculadores de la PTAP El Dorado.

Figura 3. Vista panorámica de los filtros, sedimentadores y floculadores de la PTAP El Dorado.



Fuente: elaboración propia.

La Planta de Tratamiento de Agua Potable El Dorado, construida entre los años 1999 y 2001, ubicada en la vereda El Uval y con una capacidad de almacenamiento de 10.4 m^3 , es la encargada de distribuir el agua para consumo a más de 423 650 habitantes de Usme, beneficiando barrios como La Aurora, comuna Alfonso López, La Fiscala, El Uval, San Juan de Usme, La Regadera,

entre otros¹³, tratando agua proveniente de los embalses de Chisacá y La Regadera. Esta planta tiene una capacidad máxima promedio para tratar 1600 litros de agua por segundo, estando en funcionamiento las 24 horas del día durante todo el año, operada por un técnico en tratamiento de aguas nivel 31 y un ayudante operativo de tratamiento nivel 42, generando un promedio de agua potable de 420 a 450 litros por segundo según la demanda requerida en la zona a la cual abastece¹⁴. Esta planta cuenta con un sistema de tratamiento convencional compuesto por un rebose, una canaleta Parshall, cuatro trenes floculadores-sedimentadores, doce filtros con lavado aire-agua, sedimentadores fabricados en acero inoxidable, un tanque de agua tratada de 3000 m³ y un sistema de supervisión y control a lo largo de todo el proceso.

El sistema de captación del agua cruda consiste en una estructura conocida como "Morning Glory", la cual se encuentra dentro del embalse La Regadera, y actualmente permite suministrar unos 500 L/s para la PTAP El Dorado y entre 350 y 400 L/s para la planta alterna, La Laguna; empleada como planta de respaldo para atender eventualidades que se puedan presentar a lo largo del año. Desde la captación, el agua es conducida a la PTAP El Dorado a través de 9775 m de tubería de 99,06 cm de diámetro, con válvulas de purga en las depresiones y puntos bajos para el drenaje¹⁵.

A lo largo del proceso de potabilización que se lleva a cabo en la planta El Dorado, se utilizan sustancias químicas y diferentes procesos físicos para lograr otorgarle al agua cruda las características organolépticas y químicas necesarias (y reglamentarias) para considerarse como agua apta para el consumo humano. De manera general, se utiliza Cal hidrata para aumentar el pH del agua, Sulfato de Aluminio granular como sustancia coagulante, filtros, cloro, caídas de agua en forma de cascadas altas para aumentar la cantidad de oxígeno presente, entre otros.

Actualmente El Dorado tiene como una de sus políticas generales, mantener un stock mínimo de cada uno de los productos químicos utilizados en el proceso, el cual se muestra en la **tabla 7**.

¹³ DANE - SDP, Encuesta Multipropósito 2011 - 2014. Cálculos: Dirección de Estudios Macro, SDP.

¹⁴ HERNÁNDEZ, M. A., Y SÁNCHEZ CONTRERAS, T. Procedimiento: Operación normal, parada y reinicio de la Planta El Dorado. Bogotá D.C.: Acueducto, agua, alcantarillado y aseo de Bogotá. 2017.

¹⁵ SECRETARÍA DISTRITAL DE SALUD. Mapa de riesgo de la calidad del agua de PTAP El Dorado. Bogotá, 2014.

Tabla 7. Stock mínimo de insumos en la planta.

Insumo	Stock mínimo
Sulfato de aluminio granular	7 500 kilogramos
Cal hidratada	3 750 kilogramos
Cloro	750 kilogramos
Sal	4 500 kilogramos

Fuente: HERNÁNDEZ, M. A., Y SÁNCHEZ CONTRERAS, T. Procedimiento: Operación normal, parada y reinicio de la Planta El Dorado. Bogotá D.C.: Acueducto, agua, alcantarillado y aseo de Bogotá. 2017.

2.1.1 Estudio y caracterización del agua cruda que ingresa a la planta. La caracterización del agua cruda que entra al proceso es fundamental para lograr los objetivos de los estándares de calidad del agua tratada, monitoreando de manera continua cada una de las características que representan una variable independiente del proceso para ayudar a controlar las variables dependientes como la dosificación en cada uno de los subprocesos de potabilización y el uso de los diferentes equipos mecánicos de bombeo.

Los análisis fisicoquímicos y bacteriológicos que se llevan a cabo para el agua cruda son:

- Turbiedad
- Color
- pH
- Alcalinidad
- Conductividad
- Hierros
- Dureza total
- Dureza cálcica
- Cloruros
- Nitratos
- Nitritos
- Sulfatos
- Oxígeno disuelto
- Coliformes totales
- Presencia de E-coli

Las características del agua cruda presentan una gran variabilidad a lo largo del año dependiendo de factores como: climatológicos, fauna, erosión de suelos, entre otros. En la **tabla 8** se presentan las principales características fisicoquímicas y bacteriológicas del agua cruda durante el año 2017.

Al graficar los valores promedio de cada uno de los análisis fisicoquímicos significativos para caracterizar el agua cruda, junto con los valores mínimos y máximos en cada periodo, es posible pronosticar qué rangos se deben manejar para la correcta operación del sistema de instrumentación de la planta. Con ayuda de las gráficas es posible predecir el comportamiento de cada variable a lo largo del año.

Tabla 8. Análisis fisicoquímicos y bacteriológicos del agua cruda para el año 2017 en PTAP El Dorado*.

MES		Turbiedad UNT	Color UC	pH	Conductividad umho/cm	Alcalinidad mg/L	Hierros mg/L	Dureza total mg/L	Dureza cálcica mg/L	Cloruros mg/L	Nitratos mg/L	Nitritos ug/L	Sulfatos mg/L	Oxígeno disuelto mg/L O2	Coliformes Totales UFC/100	E - Coli NMP ò UFC/100mL
ENERO	promedio	4,98	31,93	6,56	27,21	6,65	0,84	10,98	7,81	1,83	0,3	0,03	1,23	3,02	7765,48	3,55
	mínimo	3,37	18	6,13	24,8	5	0,4	7,81	5,32	1,22	0,26	0,02	0,17	0	680	0
	máximo	7	37,1	6,94	36	9	1,16	25,11	12,36	2,96	0,34	0,04	3,2	5,07	16300	50
FEBRERO	promedio	6,11	33,46	6,63	26,15	7,18	1,03	11,36	8,02	1,67	0,13	0,04	1,07	3,39	9567,86	32,32
	mínimo	4,35	13	6	24,1	5	0,07	7,8	5,4	0	0,03	0,02	0,63	2,03	5800	0
	máximo	7,09	39	6,96	28,6	10	1,68	18,52	15,8	4	0,3	0,1	1,98	4,6	19100	800
MARZO	promedio	8,14	40,45	6,49	23,56	6,71	1,04	9,39	6,79	0,72	0,22	0,04	1,89	3,97	10641,94	177,42
	mínimo	1,86	24,2	6,18	15,7	4	0,49	6,68	4,16	0	0,04	0,01	0	2,25	2100	0
	máximo	21,8	56	6,8	27,8	10	1,35	15,32	9,08	2,59	0,36	0,07	2,91	6,28	23200	700
ABRIL	promedio	8,59	36,57	6,46	24,33	5,57	0,82	9,62	6,93	1,19	0,34	0,03	0,87	5,22	15606,9	107,93
	mínimo	5,83	18	6,1	22	5	0,18	6,56	4,72	0	0,14	0	0	4,21	6600	0
	máximo	20,9	52	6,68	29,3	7	1,12	17,88	10,12	1,86	0,43	0,06	2,6	6,52	28400	500
MAYO	promedio	21,93	53,76	6,43	26,65	6	1,1	10,06	6,77	2,91	0,36	0,07	0,6	5,96	5659,03	214,52
	mínimo	3,08	33	5,88	20,6	5	0,35	6,68	4,08	0,31	0	0,01	0	4,11	430	0
	máximo	55,6	93	6,87	32,9	8	2,22	20,84	11,32	5,12	0,62	0,15	2,21	6,72	15800	1400
JUNIO	promedio	33,16	64,42	6,45	28,55	6,2	1,31	9,91	7,58	2,2	0,59	0,09	0,28	5,99	3507,67	173,33
	mínimo	9,58	40,56	5,74	22,1	5	0,49	6	3,64	1,69	0,48	0,03	0	4,74	260	0
	máximo	69	98	6,73	43,2	10	2,66	17,2	12,15	2,69	0,76	0,27	1,12	6,92	12000	800
JULIO	promedio	11,29	40	6,6	20,72	5,35	0,86	9,39	5,9	1,75	0,41	0,05	0,22	6,35	3037,74	180,32
	mínimo	3,62	30	6,41	12,2	3	0,3	5,92	2	0	0,36	0,03	0	4,63	200	0
	máximo	20,3	49	6,89	30	9	1,64	17,68	9,44	3,83	0,52	0,09	0,63	7,08	7800	600

Tabla 8. (continuación)

AGOSTO	promedio	17,23	45,33	6,55	20,22	5,35	0,93	8,64	6,18	1,78	1,03	0,05	5,54	6,3	4737,1	264,84
	mínimo	9,7	18,4	6,18	17	4	0,35	4,68	1,72	1,11	0,31	0,01	0,78	5,5	1000	0
	máximo	23,3	59	6,79	24,2	7	1,29	15,12	13,02	2,19	3	0,07	9,31	7,04	31500	3000
SEPTIEMBRE	promedio	16,06	47,37	6,58	23,38	6,07	1,35	10,74	7,87	1,36	0,74	0,05	6,15	5,02	2429,33	109,17
	mínimo	9,5	39	6,27	18,5	5	0,46	7,36	5	0	0,22	0,02	0,03	3,16	500	0
	máximo	29	65	6,89	25,5	7	1,88	22,6	13,99	2,25	2,2	0,07	10,84	6,7	12000	1200
OCTUBRE	promedio	8,08	36,55	6,58	23,03	6,58	1,08	11,44	7,02	1,6	0,26	0,04	12,07	4,76	4426,45	108,06
	mínimo	6,7	31	6,37	17,9	6	0,63	6,1	4,22	1,34	0	0,02	11,56	3,15	100	0
	máximo	13,6	48	6,93	25,8	9	2,3	19,2	13,72	1,99	0,36	0,06	13,28	6,22	10000	1300
NOVIEMBRE	promedio	12,22	41,74	6,66	21,8	6,53	1,16	10,52	7,24	0,95	0,29	0,05	10,53	5,69	2629,67	128,33
	mínimo	7,8	35	6,16	19,6	5	0,89	7	4,52	0,63	0,16	0,03	5,26	4,33	420	0
	máximo	27,9	59	6,94	26,7	10	2,15	16,84	12,8	1,72	0,39	0,07	12,91	6,57	19000	800
DICIEMBRE	promedio	8,41	36,65	6,63	23,98	7,26	1,19	12,6	8,33	0,29	0,06	0,03	0,92	4,99	8977,95	51,61
	mínimo	4,11	20	6,31	22,4	6	0,52	6,8	4,72	0,43	0,31	0,02	0,05	3,9	16,55	0
	máximo	18,8	54	7,04	28,4	12	3,22	21,8	16,4	2,85	0,42	0,05	14,95	6,27	35100	600

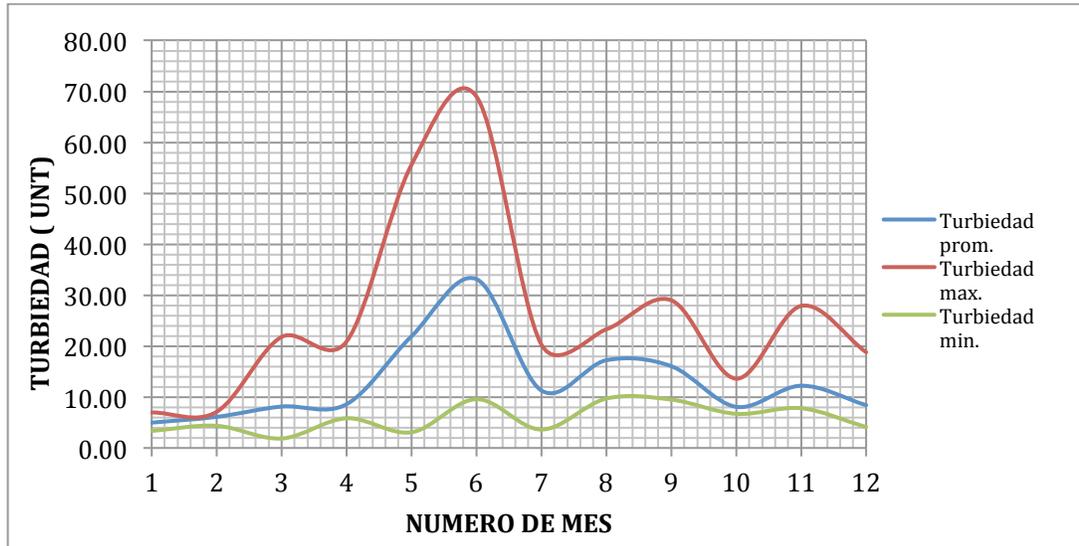
*Los datos de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos del agua que ingresa al proceso de tratamiento en la PTAP El Dorado, fueron proporcionados por la empresa. Estos datos se conocen como datos históricos y los análisis son realizados cada día, por el analista de laboratorio de la empresa durante los años de funcionamiento de la planta.

2.1.1.1 Turbiedad del agua cruda. La turbiedad representa, junto con el color, un aspecto estético del agua, y hace referencia a la presencia de partículas sólidas, ya sean compuestos orgánicos o inorgánicos en suspensión que varían su tamaño¹⁶. La turbiedad no puede ser medida de manera directa, pero se cuenta con equipos para lograr su medición por medio del fenómeno óptico de cantidad de luz reflejada y dispersada por las partículas, con uso del método Nefelométrico establecido en la guía *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, y sus unidades se expresan en Unidades Nefelométricas de Turbiedad (UNT).

En la **Gráfica 1** se observa la variación de la turbiedad en cada uno de los meses del año 2017, mostrando datos mínimos, máximos y promedio de cada mes.

¹⁶ RODRIGUEZ PEÑA, Carlos. Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de agua. Bogotá D.C.: Santafé de Bogotá: Universidad distrital, 1995.

Gráfica 1. Turbiedad del agua cruda (en UNT) en el transcurso del año 2017 en PTAP El Dorado.



Fuente: elaboración propia.

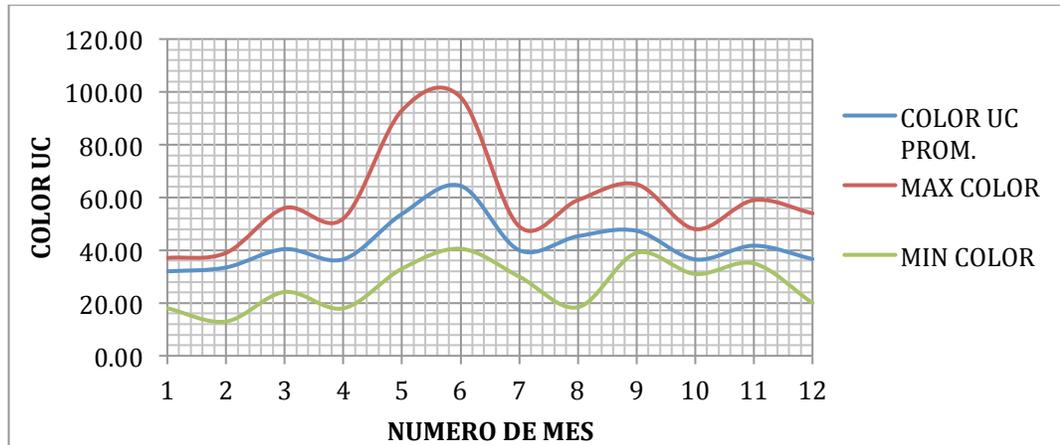
Teniendo en cuenta la **gráfica 1**, se puede llegar a la explicación de la variación de la turbiedad como un fenómeno ligado a las épocas de lluvia registradas en el país, siendo este, el principal factor que lleva a la variación de esta propiedad. Se observan diferentes comportamientos como:

- Durante los primeros meses del año (enero, febrero y marzo) no se presenta alta cantidad de días de lluvia y en cambio, presenta un bajo nivel de precipitación, por lo que la variación de turbiedad no se aleja del promedio (4.00 UNT) y una desviación estándar de 0,89 unidades.
- En el mes de mayo se observan datos con una mayor fluctuación debido a que los días de lluvia en el mes empiezan a aumentar y con esto aumenta el nivel en la precipitación por lo que se verá reflejado en una alta varianza y por lo tanto una alta desviación estándar (17.10 unidades).
- Finalmente, en los últimos meses del año (agosto a diciembre) se muestra que los días de lluvia y nivel de precipitación son bajo – medio, por lo que algunos meses tendrán alta fluctuación y otros bajas, debido a esto, la varianza en la turbiedad tiene el mismo comportamiento (no es estable).

2.1.1.2 Color aparente del agua cruda. Cuantificar el color del agua cruda es muy importante debido a que tiene relación con los coloides en suspensión cuyos tamaños rondan entre 1 micra y 1 milimicra (cercano al tamaño de los

átomos y moléculas)¹⁷.

Gráfica 2. Color aparente de agua cruda a lo largo del año 2017 en PTAP El Dorado.



Fuente: elaboración propia.

En la **Gráfica 2** se evidencia la variación del color aparente en el agua cruda que ingresa al proceso de potabilización en la planta de tratamiento, logrando un comportamiento bastante similar al obtenido en la **Gráfica 1**, debido a esto el análisis de los datos es acorde al análisis realizado para la variación de turbiedad a lo largo del mismo periodo de tiempo.

2.1.1.3 pH del agua cruda. El pH del agua cruda es primordial en los sistemas de operación y dosificación de la planta, pues no solo identifica de manera cuantitativa el agua ácida o agua alcalina, sino que también ayuda a establecer la cantidad de cal hidrata que debe agregarse al agua para alcalinizarse lo suficiente y poder neutralizar el coagulante que es de carácter ácido. Además, el pH puede alarmar de posibles fallas en el sistema de captación si se obtienen valores que no se encuentran en el rango adecuado de agua cruda; como valores de pH muy bajos o muy altos que no sean cercanos al neutral de 7 UpH¹⁸.

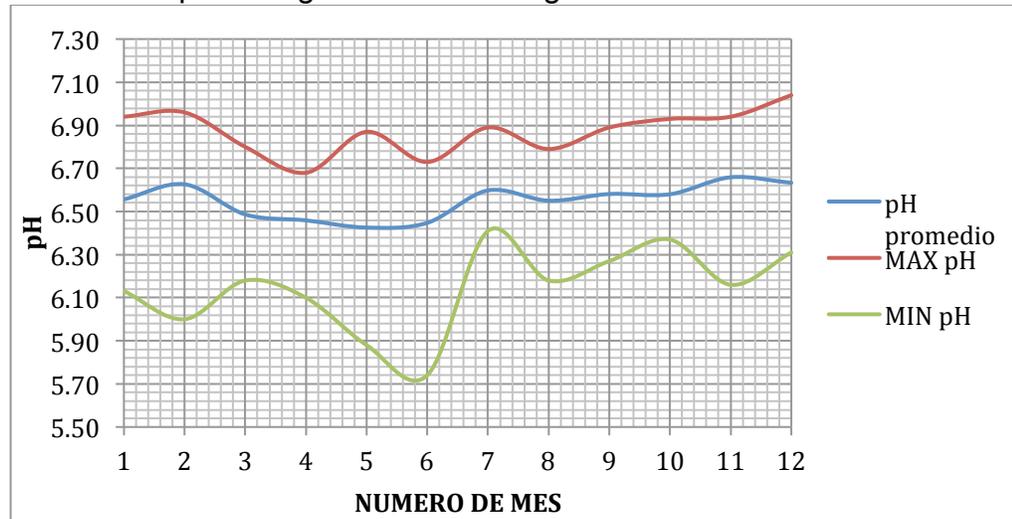
En la **Gráfica 3** se observa que el pH tiene un rango de variación relativamente estable durante el año con valor mínimo de 4.75 UpH, máximo de 7.00 UpH y un

¹⁷ RODRIGUEZ PEÑA, Carlos. Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de agua. Bogotá D.C.: Santafé de Bogotá: Universidad distrital, 1995.

¹⁸ RODRIGUEZ PEÑA, Carlos. Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de agua. Bogotá D.C.: Santafé de Bogotá: Universidad distrital, 1995.

valor promedio de 5.55 UpH. Esta variabilidad aumenta ligeramente para los meses de mayo y junio, donde se presenta mayor cantidad de lluvias.

Gráfica 3. pH del agua cruda a lo largo del 2017 en PTAP El Dorado.



Fuente: elaboración propia.

2.1.1.4 Alcalinidad del agua cruda. La alcalinidad es la capacidad que tiene el agua para neutralizar los ácidos. En la planta El Dorado, esta se determina por medio de un reactivo colorante y dosificando ácido sulfúrico 0.1N hasta que la muestra cambie de color (de azul a rojo) y encuentre un punto de inflexión, relacionando la cantidad de ácido titulado con la alcalinidad expresada en carbonato de calcio CaCO_3/L ¹⁹.

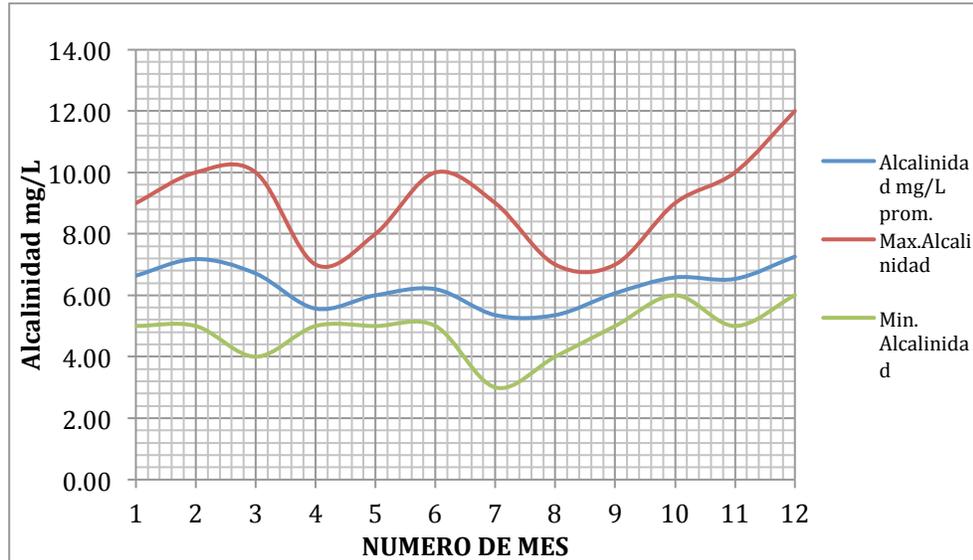
En la **Gráfica 4** se evidencia que el parámetro de la alcalinidad varía constantemente durante el año, por lo que los valores se encuentran entre 4 y 10 CaCO_3 .

La alcalinidad es directamente proporcional a las unidades de pH; es decir que cuando aumentamos el pH el agua cruda se alcaliniza, lo cual es necesario para la purificación del agua y en el proceso de coagulación con sales de sulfato que al diluirse forman una solución ácida. En la operación de la planta se utiliza de gran manera la propiedad alcalina del agua, debido a que existe una relación empírica entre la alcalinidad y la dosis de coagulante sulfato de aluminio a agregar; aproximadamente 1 mg de sulfato de aluminio neutraliza o reacciona con 0.5 mg de alcalinidad¹⁹. Aunque se ha comprobado de manera experimental que esta relación, en muchos casos, no es en su totalidad verídica; por esta razón solo se

¹⁹ RODRIGUEZ PEÑA, Carlos. Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de agua. Bogotá D.C.: Santafé de Bogotá: Universidad distrital, 1995.

utilizará como un punto de partida en la experimentación de evidenciada en este documento.

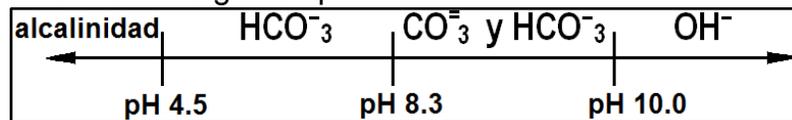
Gráfica 4. Alcalinidad del agua cruda en el año 2017 en PTAP El Dorado.



Fuente: elaboración propia.

En la **figura 4** se muestra la relación del agua en diferentes rangos de pH y los compuestos iónicos que se puede asociar al aporte de alcalinidad:

Figura 4. Compuestos iónicos asociables al aporte de alcalinidad rangos de pH.

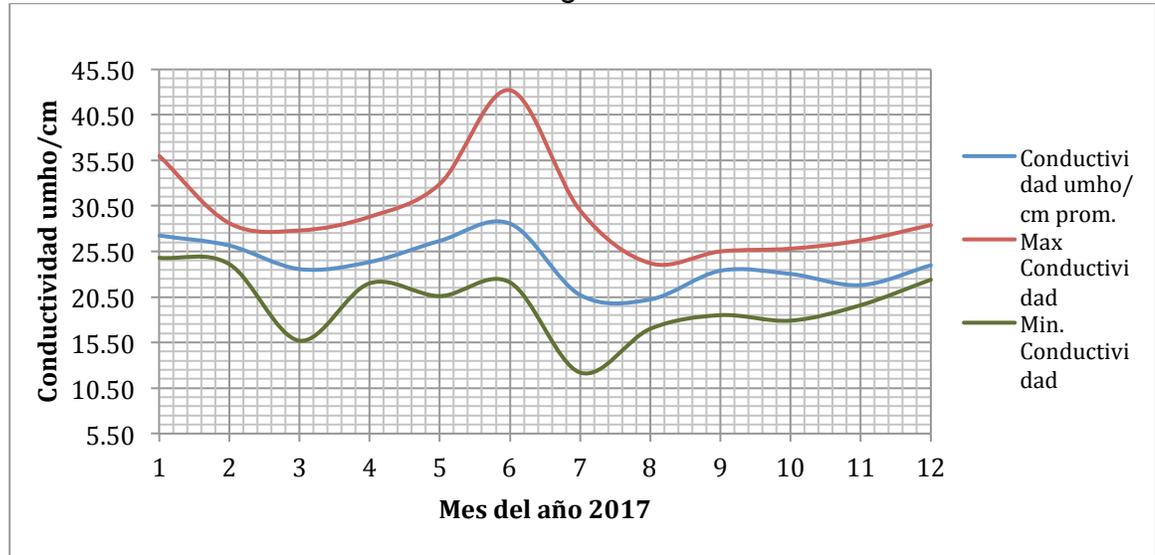


Fuente: RODRIGUEZ PEÑA, Carlos. Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de agua. Bogotá D.C.: Santafé de Bogotá: Universidad distrital, 1995.

De acuerdo a los rangos de pH determinados en el agua cruda a la entrada del proceso, se establece que el aporte de alcalinidad lo da el anión bicarbonato (HCO_3^-), el cual no afecta las características organolépticas del agua como sabor, olor, textura y color.

2.1.1.5 Conductividad del agua cruda. La conductividad eléctrica del agua permite medir la capacidad de esta para conducir la electricidad, en el agua cruda es una propiedad que mide indirectamente el total de sólidos disueltos en el agua y brinda una aproximación del valor.

Gráfica 5. Conductividad eléctrica del agua cruda en PTAP El Dorado.



Fuente: elaboración propia.

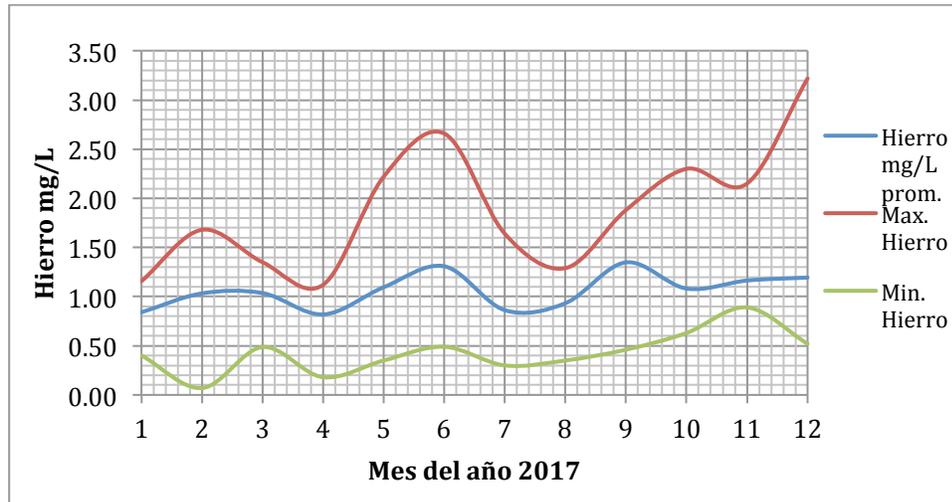
La conductividad, al ser dependiente de la temperatura a la cual se encuentra la muestra a la hora de realizar el análisis, y debido a que el agua cruda presenta una temperatura regular de 14°C, se presenta un bajo error al momento de tomar los datos, pero en el análisis de los documentos históricos de análisis de la planta El Dorado, los valores frecuentes son de 23 umho/cm y rangos de entre 12.2 y 43.2 umho/cm. La **gráfica 5** presenta un comportamiento estable en los valores de conductividad durante los primeros meses del año, una alta variabilidad en los meses de junio y julio, y nuevamente estabilidad para los meses posteriores; comportamiento que se relaciona con el de turbiedad y color.

2.1.1.6 Hierro presente en el agua cruda. El hierro y el manganeso son elementos comunes en la superficie de la tierra, lo cuales pueden darle al agua un sabor, olor y color indeseable, además el hierro origina un color rojo opaco a todo lo que entra en contacto con él al oxidarse.

Debido a que la norma establece una concentración de hierro en agua que no supere los 0.3 mg/L, esta debe tener un contenido muy bajo del mineral, por lo que

el hierro presente en el agua cruda se debe oxidar y lograr precipitar, aunque no es difícil debido a que no supera valores de 3.22 mg/L según se evidencia en la **Gráfica 6**.

Gráfica 6. Hierro presente en agua cruda en el año 2017 en PTAP El Dorado.



Fuente: elaboración propia.

En los resultados obtenidos a lo largo del año (2017) se encuentra que la turbiedad, color aparente, conductividad y hierro sufren una alta variabilidad para los meses de lluvia (entre Abril y Agosto), mostrando un pico máximo en el mes de Diciembre, después de este tiempo la fluctuación entre los valores disminuye y permanece relativamente constante.

Los valores de pH presentan un comportamiento inverso; en lugar de adquirir un valor máximo en la temporada de lluvia, estos adquieren un valor mínimo de 5,74 UpH, el cual se verá reflejado en una mayor adición de cal hidrata para adecuar las propiedades del agua antes de la coagulación.

A diferencia de las anteriores propiedades descritas, la alcalinidad tiene una variabilidad que aparentemente no se afecta debido a las temporadas de lluvia o de sequía, por lo que se dificulta la relación de la alcalinidad del agua con esta, aunque sea una característica primordial en el proceso de potabilización que se explicara más adelante.

La **Tabla 9** muestra la desviación estándar de la turbiedad, color aparente, pH, conductividad y hierro según el mes del año, demostrando la variabilidad y fluctuación entre los datos y los sucesos comentados en el análisis previamente realizado.

Tabla 9. Desviación estándar de algunas propiedades del agua cruda durante cada mes del año 2017.

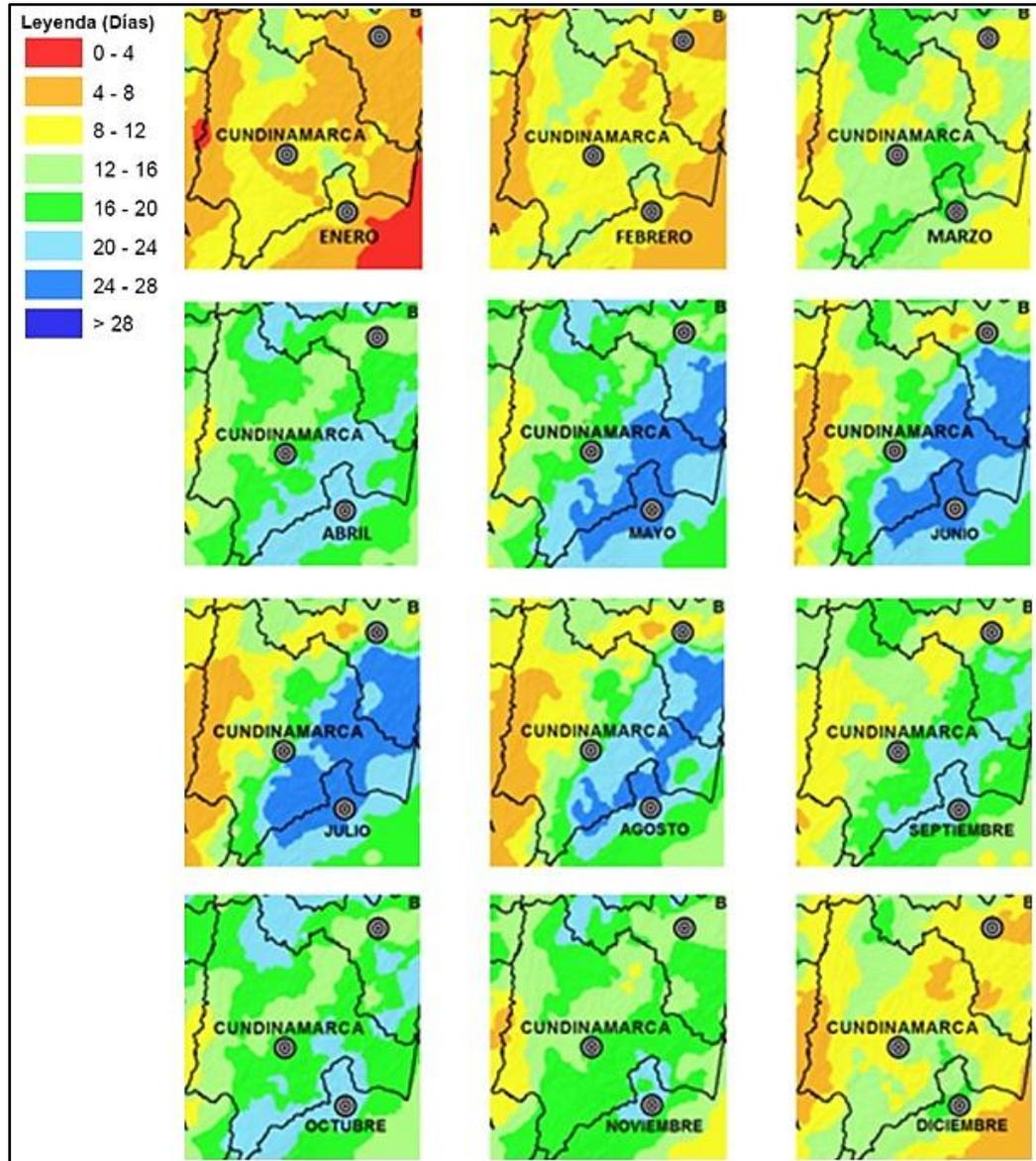
Mes	Dato promedio y desviación estándar por cada mes del año 2017				
	Turbiedad (UNT)	Color (UC)	pH	Conductividad (umho/cm)	Hierro (mg/L)
Enero	4,98 ±0.89	31,93 ±3.39	6,56 ±0.18	27,21 ±2.06	0,84 ±0.20
Febrero	6,11 ±0.69	33,46 ±4.41	6,63 ±0.20	26,15 ±0.88	1,03 ±0.35
Marzo	8,14 ±4.47	40,45 ±7.62	6,49 ±0.18	23,56 ±2.91	1,04 ±0.23
Abril	8,59 ±3.27	36,57 ±4.43	6,46 ±0.15	24,33 ±1.62	0,82 ±0.20
Mayo	21,93 ±14.76	53,76 ±15.61	6,43 ±0.20	26,65 ±3.96	1,10 ±0.45
Junio	33,16 ±17.12	64,42 ±17.58	6,45 ±0.23	28,55 ±4.60	1,31 ±0.52
Julio	11,29 ±3.48	40,00 ±4.95	6,60 ±0.12	20,72 ±4.77	0,86 ±0.29
Agosto	17,23 ±3.18	45,33 ±7.59	6,55 ±0.13	20,22 ±2.23	0,93 ±0.21
Septiembre	16,06 ±4.62	47,37 ±4.89	6,58 ±0.14	23,38 ±1.59	1,35 ±0.35
Octubre	8,08 ±1.28	36,55 ±3.47	6,58 ±0.12	23,03 ±2.06	1,08 ±0.31
Noviembre	12,22 ±3.94	41,74 ±4.71	6,66 ±0.16	21,80 ±1.57	1,16 ±0.25
Diciembre	8,41 ±2.47	36,65 ±4.95	6,63 ±0.16	23,98 ±1.24	1,19 ±0.43

Fuente: elaboración propia.

Los indicadores de color más oscuros en la **Tabla 9** muestran el periodo donde la variabilidad entre cada uno de los datos, en los diferentes caracterizaciones, es alta, a medida que desciende este factor, el indicativo de color es más claro. Se presenta un patrón similar para todos los análisis; los primeros meses existe una baja variabilidad de los parámetros y en el mes de marzo comienza a variar exponencialmente hasta llegar a un máximo en el mes de junio, posteriormente la desviación entre los datos comienza a descender, para en el mes de agosto estabilizarse. Como referencia a esta afirmación se realizó un estudio hidrológico en Cundinamarca en el transcurso del año presentado en la sección **2.1.2 Estudio Hidrológico**.

2.1.2 Estudio Hidrológico. Los resultados obtenidos se apoyan en el mapa de regiones arrojado por el IDEAM de días de lluvia a lo largo de cada mes en Colombia, en el cual se muestran las épocas de altas y bajas precipitaciones en el transcurso del año. En la **figura 5** se registra un estudio de los días de precipitación de cada uno de los meses en promedio para los años del 1981 y 2010. Por otro lado, la **figura 6** representa la escala de los días de lluvia; siendo azul los días con mayores cantidades de precipitación y rojo los días de sequía.

Figura 5. Mapa hidrológico de los diferentes meses del año en Cundinamarca, Colombia.



Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios Ambientales – IDEAM. Número medio de días con lluvia, promedio mensual multianual 1981-2010. República de Colombia. 2014.

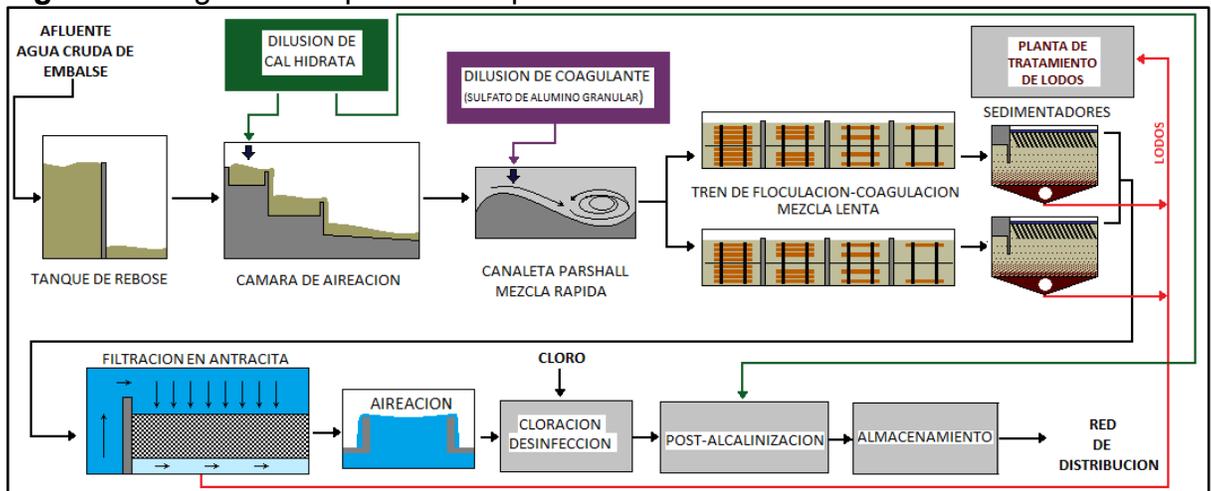
El estudio del fenómeno hidrológico y la disposición de fuentes de agua es primordial para determinar una dosis óptima de sulfato de aluminio, cal hidratada y MIOX necesarios en el proceso de tratamiento de agua, ya que este proceso está ligado no solo a la variación de pH del agua cruda, en el caso de la dosis de la alcalinizante, sino también a la turbiedad y alcalinidad inicial del agua en el

proceso para lograr una correcta adición de sulfato de aluminio necesario para la coagulación.

2.2 PROCESO ACTUAL DE POTABILIZACIÓN

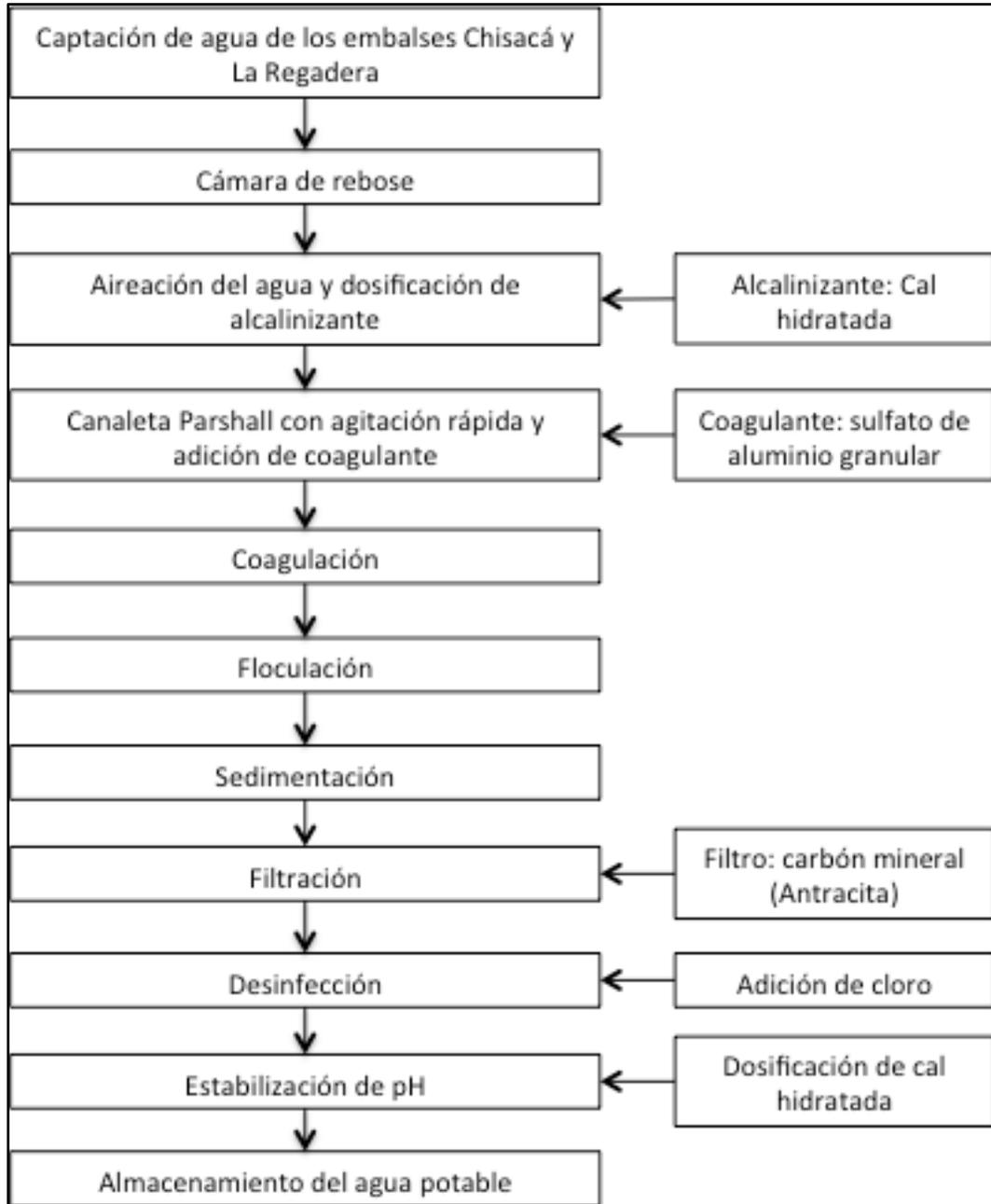
La planta El Dorado cuenta con un sistema de tratamiento convencional, llamado de esta manera, debido a las partes que lo componen. En la **Figura 6 y 7**, respectivamente, se muestra un diagrama de procesos general y un diagrama de bloques del proceso que se lleva a cabo actualmente en la PTAP El Dorado.

Figura 6. Diagrama del proceso de potabilización en PTAP El Dorado.



Fuente: elaboración propia.

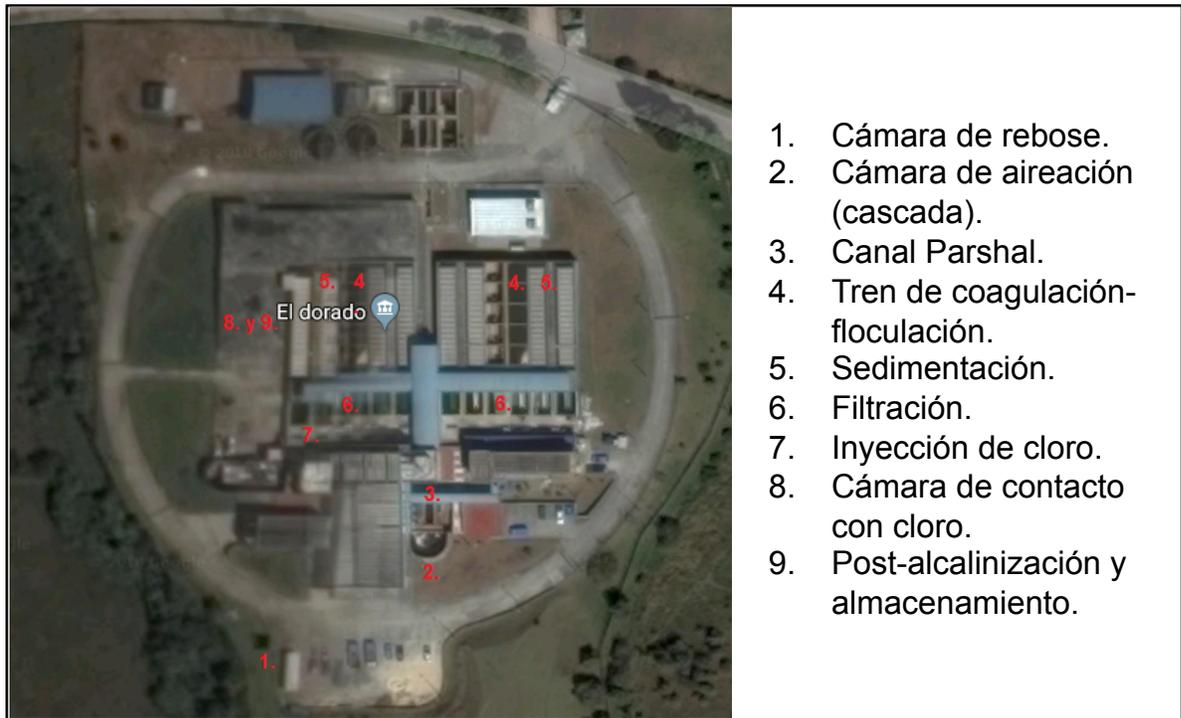
Figura 7. Diagrama de bloques de proceso actual de potabilización en PTAP El Dorado.



Fuente: elaboración propia.

Presentando una perspectiva espacial de los diferentes subprocesos en la planta, y por medio de una imagen satelital se logra ordenar el proceso y se presenta en la **figura 8**.

Figura 8. Vista satelital de la PTAP El Dorado.



Fuente: Mapa de Colombia, planta El Dorado, Bogotá. [En Línea] [Citado 24 de mayo del 2018]: Disponible en:< <https://goo.gl/maps/f1f1jK1MK1P2> >. Modificado por los autores.

Para realizar un diagnóstico completo de la planta se exploran cada uno de los procesos que se llevan a cabo en la potabilización de agua, describiendo generalidades de estos y como afectan en los parámetros de calidad del agua tratada.

2.2.1 Captación de agua. Agua cruda, proveniente del embalse La Regadera, que a su vez es alimentado por el río Curubital, el río Mugroso y el embalse Chisacá, es transportada a través de una serie de tuberías que la conducen hacia la planta para empezar su proceso de potabilización y cuyo primer contacto con esta se lleva a cabo en la cámara de rebose presente en la PTAP El Dorado. Las tuberías cuentan con un medidor de caudal (caudalímetro) y una válvula manual para regular el paso del fluido a la cámara. En caso de presentarse alguna irregularidad, el líquido es desviado a la quebrada El Pasito.

2.2.2 Cámara de rebose. Es un tanque abierto seccionado en dos partes; la primera sección donde ingresa el agua cruda tiene una capacidad de 32.85 m³, con 3.65 m de profundidad, 4.5 m de largo, y 2 m de ancho (Matiz Correa, 2008), que reboza el agua y pasa a la segunda sección con un conducto que desemboca en la quebrada Fucha; tal como se muestra en la **figura 9**.

Figura 9. Cámara de rebose en PTAP El Dorado.



Fuente: elaboración propia.

La cámara de rebose cumple tres objetivos fundamentales; es la encargada de controlar el flujo volumétrico del agua cruda que entra al sistema de potabilización, en el caso de exceso de agua cruda el restante se deposita en la quebrada Fucha por medio del rebose según lo explicado anteriormente, además contiene una válvula de cierre en caso de emergencia; como segundo objetivo, la cámara sirve para la remoción de algunos sólidos que se encuentran en el agua por el fenómeno físico de sedimentación, y por último le da estabilidad a la toma de muestra de agua cruda para realizar el aforo de caudal y la caracterización de las propiedades físicas y químicas.

En esta etapa, cada dos horas, se realiza una caracterización del agua cruda mediante análisis físicos, químicos y microbiológicos, como lo son la turbiedad, color, pH, conductividad, alcalinidad, hierros, dureza total, dureza cálcica, cloruros, nitratos, oxígeno disuelto, nitritos, nitratos, E-Coli presente, entre otros. Para llevar a cabo esta caracterización, en la cámara de rebose se encuentran equipos como; caudalímetro, pH-metro, turbidímetro, medidor de nivel de agua y una compuerta de acero para regular el paso del fluido.

Algunos análisis fisicoquímicos esenciales para el control del proceso como lo son la turbiedad, conductividad, alcalinidad, pH y color se llevan a cabo durante las 24 horas del día con la ayuda un operario de la planta en intervalos de 2 horas,

durante todos los días del año de forma constante y continua según el protocolo de operación de la planta.

Para el evaluación del desempeño de los coagulantes se tomará el rango de resultados de cada uno de los datos históricos del año 2017 teniendo en cuenta que cada uno de ellos cumplió con las normas de calidad del agua tratada.

Tabla 10. Características que se miden al agua clarificada en el proceso de la PTAP El Dorado.

	Valor Mínimo	Valor Máximo
Turbiedad UNT	0,40	1,57
Color UC	1,50	9,50
pH	4,98	6,67
Conductividad uohm/cm	31,85	76,90
Aluminio mg/L	0,01	0,32
Alcalinidad mg/L	1,00	10,00

Fuente: elaboración propia.

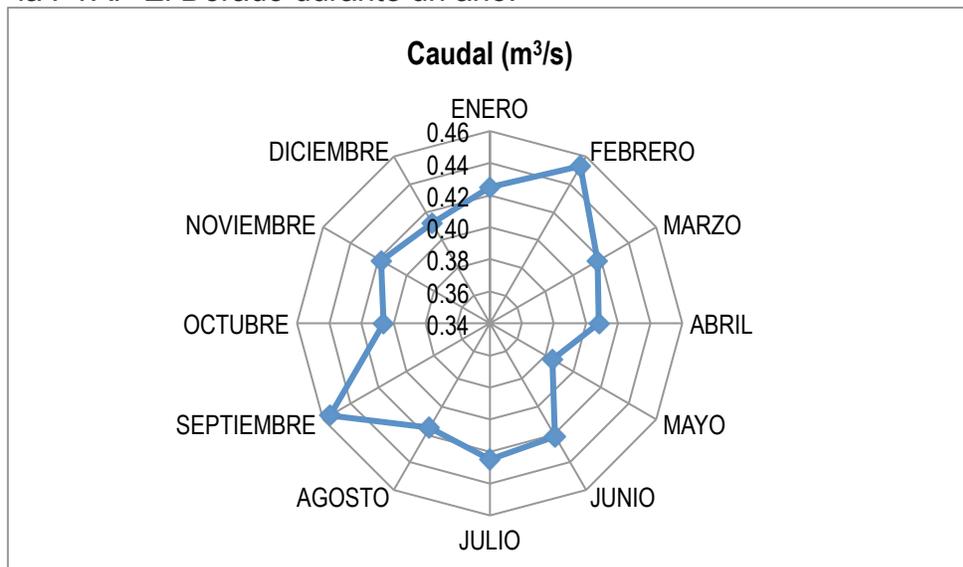
Los datos registrados en los ensayos a realizar en escala planta piloto deben ser cercanos a los valores reales obtenidos en la planta real para el sulfato de aluminio granular como coagulante.

La variable principal de proceso que se mide en la cámara de rebose es el flujo volumétrico o caudal, el cual se registra de forma automática y se manipula dependiendo de la disponibilidad de agua en los respectivos embalses de los que se capta y los requerimientos y necesidades que demande la planta. El estudio muestra una variabilidad del caudal que se encuentra en un mínimo de 0.282 m³/s y un máximo de 0.475 m³/s registrado una vez en el transcurso del año, los cuales se determinaron con los datos históricos del año 2017.

En la **Gráfica 7** se muestran los valores de caudal más frecuentes durante los diferentes meses del año, y se puede observar que la planta está en un máximo potencial durante los meses de febrero y septiembre, debido a que se registran valores de aproximadamente 450 litros de agua tratada por cada segundo, sin embargo la capacidad no permanece constante en el tiempo, esta varía y llega a un mínimo en el mes de mayo con un valor de 380 litros por cada segundo, supliendo las necesidades de la red de distribución de agua potable en Usme.

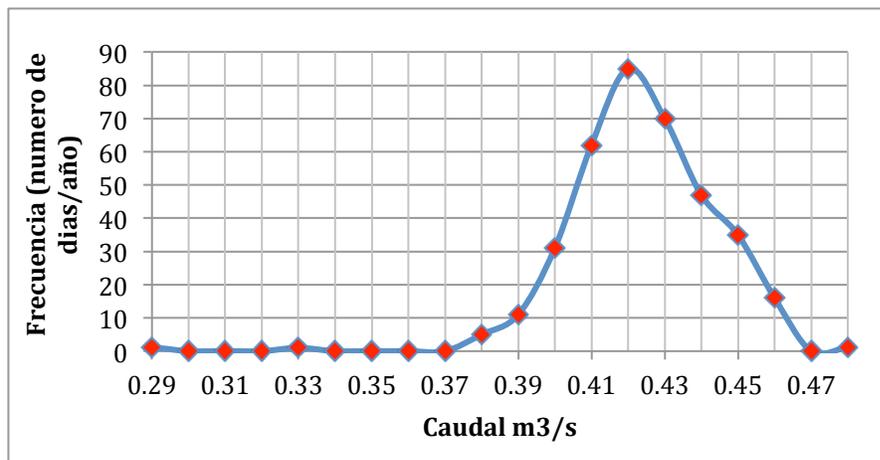
Para explicar el caudal real más frecuente en la planta durante el año, se realizó un estudio de frecuencia utilizando los datos obtenidos durante un año, y por métodos estadísticos se obtuvieron los valores más comunes de flujo volumétrico con el número de repeticiones de estos dentro del total de los valores obtenidos. Los resultados finales se tabulan según el número de veces que se repitieron en el año, lo cual proyecta una distribución normal. Ver **Gráfica 8**.

Gráfica 7. Promedio de caudal de agua cruda (en m³/s) que recibe la PTAP El Dorado durante un año.



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 8. Frecuencia de distintos caudales de agua cruda en el año 2017, en PTAP El Dorado.



Fuente: elaboración propia.

A lo largo del año se tiene una frecuencia de caudal entre 0.39 m³/s y 0.46 m³/s, lo cual sucede alrededor del 98% de los días en el año; más exactamente, 85 días al año se tiene un valor de flujo volumétrico igual a 0,42 m³/s según la demanda lo requiera.

Cuando el caudal toma un valor de 0,282 m³/s, la planta lo explica como la interrupción transitoria de las actividades de potabilización y restauración de una parte específica del proceso. Estos valores se tomaran en cuenta para la experimentación a nivel planta piloto.

2.2.3 Aireación (cascada) y pre-alcalinización. El agua cruda pasa a través de una cámara de aireación, la cual consiste en poner en contacto íntimo el fluido con el aire en una caída de dos metros de altura, con el propósito de disminuir la concentración de sustancias volátiles contenidas en ella, oxigenarla y otros objetivos principales como lo son:

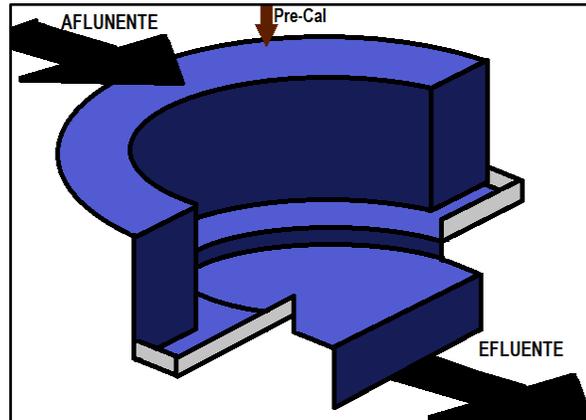
- Disminuir la concentración de dióxido de carbono (CO₂) y sulfuros de hidrógeno (H₂S).
- Remover posibles compuestos como metano, amoníaco y compuestos orgánicos volátiles.
- Transferir oxígeno al agua para aumentar la cantidad de oxígeno disuelto en ella.
- Promover la oxidación de metales como hierro (Fe) y manganeso (Mn).
- Eliminar sustancias volátiles que pueden producir olor y sabor.

La aireación desempeña una función clave en el proceso de purificación del agua mediante el barrido de las sustancias volátiles causado por la turbulencia generada por el contacto con el aire y por el proceso de oxidación de metales y gases. El sulfuro de hidrogeno es un gas disuelto en el agua el cual genera olores, la aireación permite removerlos por medio de acción física de desorción, además, por otra parte la aireación reduce los niveles de dióxido de carbono hasta unos 4,5 mg/L.²⁰

La planta El Dorado maneja un aireador en casada y vertedero, el cual deja caer el agua cruda en láminas sobre un escalón de concreto, el aireador se diseñó como una escalera de dos pisos, con un área horizontal amplia para aumentar la eficiencia de la aireación. Este proceso es factible en gran medida debido a que el agua tiene energía potencial acumulada por la diferencia de altura, siendo una aireación económica ya que no requiere un suministro de energía, y además cuenta con un mantenimiento sencillo. Ver **figura 10 y 11**.

²⁰ Romero Jairo. Purificación del Agua. 2da edición, 2006. Editorial: Escuela Colombiana de Ingenieros.

Figura 10. Representación del sistema de aireación en cascada.



Fuente: elaboración propia.

Figura 11. Cámara de aireación en cascada de la PTAP El Dorado.



Fuente: elaboración propia.

Seguido a esto, se debe llevar a cabo una pre-alcalinización, la cual consiste en regular el pH del líquido, que se encuentra entre 6 y 8, para favorecer la acción del coagulante actual (sulfato de aluminio granular).

Para llevar a cabo la pre-alcalinización, la planta emplea una solución de cal hidratada la cual se adquiere en presentación granular, en bultos de 25 kilogramos procedentes de la compañía Procesadora De Cales Procecal S.A. la cual cuenta con las especificaciones técnicas mostradas en la **Tabla 11**. Se realiza el proceso de inventario y una parte del alcalinizante se dosifica en una disolución con concentración de 1 % P/V o 10000 mg/L, y la otra parte se acumula por lotes en una bodega con un porcentaje bajo de humedad y controlando las condiciones de almacenamiento.

Tabla 11. Especificaciones de la Cal Hidrata industrial.

Cal Hidrata -industrial		
Compuesto	Composición Porcentual	
	Mínimo	Máximo
Calcio en forma C_3O	65%	72%
Calcio en forma $C_3(OH)_2$	85%	95%
Granulometría	Malla 200	Malla 325

Fuente: Compañía Procesadora De Cales, PROCECAL S.A.

2.2.4 Canaleta Parshall. La canaleta o canal Parshall es una adaptación del principio de Venturi en hidrodinámica de canales abiertos. Mediante un estrechamiento de la sección y un levantamiento del fondo del canal, se le aplica una aceleración al flujo para forzar un cambio de régimen de sub-crítico a supercrítico, ver **figura 12**. Su geometría consiste en un estrechamiento paulatino o sección convergente, una garganta o sección estrecha y un ensanchamiento o sección divergente. Esta geometría lleva a la creación de un remolino, y esto, a su vez, a un aumento de velocidad en el fluido (a 100 RPM). En el punto donde se forma el remolino, se agrega sulfato de aluminio granular como coagulante, previamente disuelto en cierta cantidad del mismo líquido. Este dispositivo fue implementado debido a que se dispone de alta presión, velocidad de flujo y energía en el agua de entrada²¹.

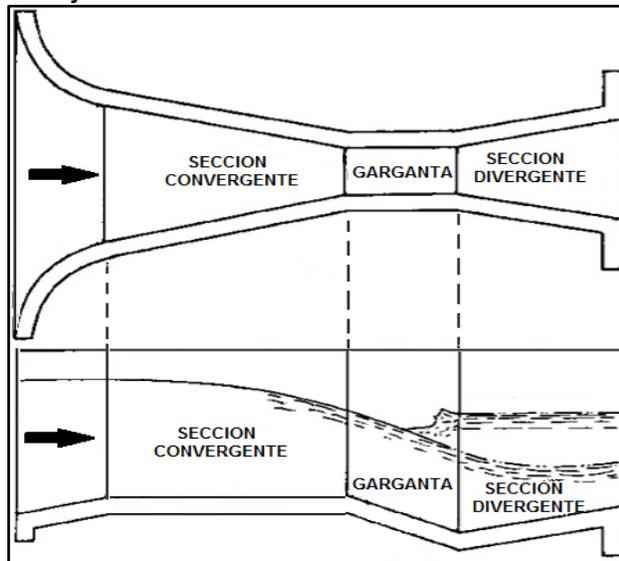
Las ventajas que se observan en este mecanismo es que la energía se suministra debido a la diferencia de alturas y no un equipo mecánico (lo que conllevaría a un consumo de energía eléctrica o combustible), generando un ahorro en mantenimiento e insumos.

La canaleta Parshall consta de tres secciones:

- Sección Convergente; es el lugar del canal donde entra la corriente de agua cruda.
- Garganta; el área transversal disminuye causando un aumento en la velocidad del fluido, produciendo un choque lateral y una alta turbulencia debido al régimen laminar que lleva el agua antes de este punto. En esta sección se adicionan los reactivos para llevar a cabo una mezcla homogénea.
- Sección divergente; se tiene una contra pendiente suave la cual hace que el agua forme un vórtice y homogenice la mezcla.

²¹ HIDROJING. Canal Parshall, casi cien años midiendo caudales. [en línea]. <<http://www.hidrojing.com/canal-parshall-casi-cien-anos-midiendo-caudales> > [citado el 2 de marzo de 2018].

Figura 12. Esquema de tres secciones de canaleta Parshall. Arriba: vista superior. Abajo: vista lateral.



Fuente: RODRIGUEZ PEÑA, Carlos. Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de agua. Bogotá D.C. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

En la entrada de la sección convergente el ancho de la canal pasa de una medida de 1.92 m a 1.2 m, donde en la garganta mantiene su ancho y luego, en la sección divergente, se expande nuevamente hasta llegar a un ancho de 1.52 m.

Al salir de la mezcla rápida el agua es separada en dos canales con cantidades equivalentes, estos canales tienen un ancho de 1.2 m, una longitud de 35.75 m y una velocidad de flujo de aproximadamente 1 m/s. El flujo converge en los floculadores que estén habilitados para operar²².

2.2.5 Coagulación. Este proceso comienza inmediatamente se agrega la sustancia coagulante en el agua, desestabilizando las partículas presentes en esta. Mientras el proceso ocurre, el líquido es transportado a través de canales y tuberías a la etapa de floculación y sedimentación.

La coagulación junto con la floculación pueden ser considerados los procesos más importantes en el tratamiento de agua potable debido a que estos eliminan

²² MATIZ CORREA, Leonardo Fabio. Optimización del proceso de floculación en la planta de tratamiento de agua potable El Dorado de Bogotá. Bogotá D.C., 2008. Trabajo de grado (ingeniero ambiental). Universidad de los Andes. Facultad de ingeniería. Departamento de ingeniería civil y ambiental. Disponible en: <http://oab2.ambientebogota.gov.co/apc-aa-files/57c59a889ca266ee6533c26f970cb14a/Optimizaci%F3n_proceso_floculaci%F3n_planta_%20tratamiento_%20aguapotable%20Dorado%20Bogot%E1.pdf>

grandes cantidades de materia orgánica y contaminantes en forma de coloides que están presentes en el agua, reduciendo la turbiedad, color y ajustando los demás parámetros para poder cumplir con las normas de calidad establecidas.

2.2.5.1 Sustancia coagulante. La coagulación, en el proceso actual de la PTAP El Dorado, se lleva a cabo utilizando sulfato de aluminio granular tipo B como coagulante, el cual se adquiere de la empresa Productos Químicos Panamericanos S.A. (P.Q.P.), en pacas de 25 kilogramos, y que tiene la composición mostrada en la **tabla 12**.

Tabla 12. Composición del sulfato de aluminio tipo B usado en la PTAP El Dorado.

Sulfato de Aluminio tipo B	
Compuesto	Composición Porcentual
Alúmina / Oxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)	14.2 % Mínimo
Óxido de Hierro (III) (Fe ₂ O ₃)	2.0 % Máximo
Material Insoluble	8 % Máximo

Fuente: Empresa Productos Químicos Panamericanos S.A. (P.Q.P.)

Al ingresar el coagulante a la empresa y cumpliendo los procesos correspondientes a inventario, se carga una parte a los tanques que diluyen constantemente la sustancia a una concentración al 1 %, mientras que la cantidad restante se almacena siguiendo los mismos criterios que el alcalinizante; bodegas con baja humedad y un control de almacenamiento por parte de la logística interna de la empresa.

2.2.5.2 pH del agua en mezcla rápida. En relación a la operación de la planta, de deben tener en cuenta los valores de pH del agua que entra y sale de este proceso a lo largo del año, los cuales son presentados en la **Tabla 13**.

Cuando se aplica el pre-alcalinizante, en promedio se aumenta 0.75 UpH a la corriente de agua cruda, la cual, luego ingresa en la mezcla rápida. Al mezclar uniformemente el coagulante, la alcalinidad adquirida neutraliza la acción del coagulante haciendo que el agua disminuya el pH en una cantidad promedio de 1.46 UpH como se evidencio en los valores anteriores en el transcurso del año.

Es importante resaltar que la dosis de pre-alcalinizante que se agrega al agua cruda depende en su totalidad de las unidades de pH que esta tenga al ingresar al proceso y del tipo de sustancia coagulante que se utilice.

Tabla 13. Valores promedio de pH en cada uno de los meses del año en PTAP El Dorado.

	pH pre-cal (Entrada canaleta Parshall)	pH con coagulante (Salida canaleta Parshall)
Enero	6,12	5,06
Febrero	6,35	5,3
Marzo	6,34	5,16
Abril	6,7	5,19
Mayo	6,47	5,19
Junio	6,48	5,31
Julio	6,98	5,28
Agosto	6,9	5,16
Septiembre	6,85	5,27
Octubre	6,65	5,39
Noviembre	6,79	5,38
Diciembre	6,7	4,22

Fuente: Empresa de Acueducto, Agua y Alcantarillado de Bogotá.

2.2.6 Floculación. Este proceso se lleva a cabo en trenes floculadores-sedimentadores, y debe disminuirse la velocidad del fluido antes de entrar a estos trenes, para esto se utiliza una estructura de aquietamiento que divide el caudal y lo re direcciona a los tanques.

Cada tren floculador posee cierta cantidad de aspas las cuales, mediante agitación mueven el agua para que las partículas previamente desestabilizadas se aglutinen formando *flocs*. La cantidad de aspas y la velocidad de agitación varían entre los tanques; el primer tanque posee mayor cantidad de aspas y mayor velocidad de agitación que el segundo, y así sucesivamente.

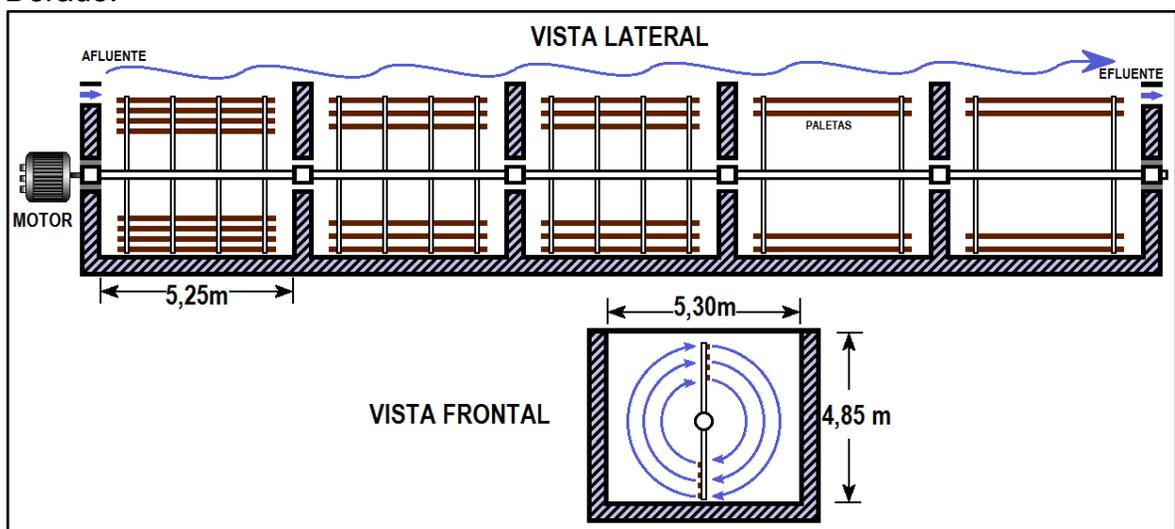
Los fenómenos del proceso de floculación no se conocen por lo que se debe hacer una simulación en escala laboratorio con el ensayo de jarras para tener un correcto pronóstico de las características del agua clarificada y de la operación de las variables que rigen el proceso.

La planta El Dorado maneja floculadores mecánicos introduciendo la potencia al agua para garantizar una mezcla lenta mediante agitación; los agitadores usados son paletas de madera con eje horizontal que generan movimiento rotatorio en el agua y vórtices mediante un sistema mecánico. La planta cuenta con cuatro sistemas de floculación y sedimentación, conectados en serie. Cada uno de los

floculadores en serie tiene un volumen de 134.95 m^3 , con dimensiones de 4.30 m de ancho, 4.25 m de largo y una profundidad efectiva de 4.85 m, de esta forma, el volumen total es de 674.75 m^3 .²³

En la **figura 13** se muestra la vista lateral de los floculadores con cada una de las configuraciones de paletas las cuales dan como resultado la variación en los gradientes de velocidad; además se muestra la dirección del fluido a través de los diferentes tanques.

Figura 13. Vista lateral y frontal de los floculadores en serie de la PTAP El Dorado.

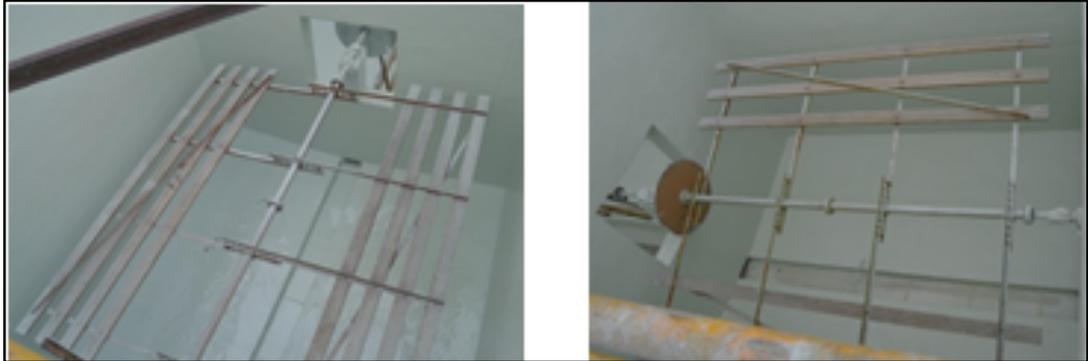


Fuente: elaboración propia.

En la **figura 14** se muestran imágenes tomadas de los tanques de floculación 1 y 3, en las cuales se pueden apreciar las paletas de agitación mecánica y los canales de comunicación del agua a través de los tanques junto al eje del rotor.

²³ MATIZ CORREA, Leonardo Fabio. Optimización del proceso de floculación en la planta de tratamiento de agua potable El Dorado de Bogotá. Bogotá D.C., 2008. Trabajo de grado (ingeniero ambiental). Universidad de los Andes. Facultad de ingeniería. Departamento de ingeniería civil y ambiental. Disponible en: <http://oab2.ambientebogota.gov.co/apc-aa-files/57c59a889ca266ee6533c26f970cb14a/Optimizaci%F3n_proceso_floculaci%F3n_planta_%20tratamiento_%20aguapotable%20Dorado%20Bogot%E1.pdf.PDF>

Figura 14. Sistema de aspas de los floculadores de la PTAP El Dorado.



Fuente: elaboración propia.

En la **figura 15**, se logra apreciar los tanques de floculación. los cuales muestran el nivel volumétrico e indica que cada una de las paletas no se perciben en la superficie del agua.

Figura 15. Floculadores en reposo y en funcionamiento, respectivamente, en la PTAP El Dorado.



Fuente: elaboración propia.

2.2.6.1 Gradiente de velocidad de los floculadores. Según la configuración de los floculadores, es posible hallar el gradiente de velocidad y el tiempo de retención de los floculadores con las **ecuaciones 1, 2,3 y 4**²⁴:

²⁴ Romero Jairo. Purificación del Agua. 2da edición, 2006. Editorial: Escuela Colombiana de Ingenieros.

Ecuación 1. Velocidad relativa de las paletas con respecto al fluido.

$$v = 0,75(2\pi)(r)(\vartheta) \quad (1)$$

Fuente: Romero Jairo. Purificación del Agua. 2da edición, 2006. Editorial: Escuela Colombiana de Ingenieros.

Donde:

v = velocidad relativa de las paletas con respecto al fluido, m/s .

r = radio de las paletas

ϑ = velocidad angular

Ecuación 2. Potencia disipada en la mezcla.

$$P = \frac{C_D * \rho * A * \sum v^3}{2} \quad (2)$$

Fuente: Romero Jairo. Purificación del Agua. 2da edición, 2006. Editorial: Escuela Colombiana de Ingenieros.

Donde:

P = potencia disipada en la mezcla, W .

C_D = coeficiente de arrastre de las paletas.

ρ = densidad del fluido, kg/m^3 .

A = área transversal de las peltas, m^2 .

v = velocidad relativa de las paletas con respecto al fluido, m/s .

Ecuación 3. Gradiente de velocidad.

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu * V}} \quad (3)$$

Fuente: Romero Jairo. Purificación del Agua. 2da edición, 2006. Editorial: Escuela Colombiana de Ingenieros.

Donde:

G = gradiente de velocidad, s^{-1} .

P = potencia disipada en la mezcla, W .

μ = viscosidad dinámica, $kg/m*s$.

V = volumen, m^3 .

Ecuación 4. Tiempo de retención.

$$t = \frac{V}{Q} \quad (4)$$

Fuente: Romero Jairo. Purificación del Agua. 2da edición, 2006. Editorial: Escuela Colombiana de Ingenieros.

Donde:

t = tiempo de retención, s.

V = volumen, m^3 .

Q = caudal, m^3/s .

Las especificaciones del diseño del floculador y las propiedades del fluido a tratar se encuentran a continuación. Esta información es necesaria para analizar el gradiente de velocidad y la potencia disipada en la mezcla en cada uno de los floculadores²⁵:

$$\text{Área de la paleta} = \text{ancho} \cdot \text{largo} = 0.69m^2$$

$$\text{Longitud paleta/ancho paleta} = 30$$

$$\text{Viscosidad dinámica del agua (15°C)} = 1.1565 \times 10^{-3} \text{ Kg/m} \cdot \text{s}$$

$$\text{Densidad del agua (15°C)} = 998.95 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{Volumen floculador} = 134.95 \text{ m}^3$$

En la **tabla 14**, se presentan los valores correspondientes del coeficiente de arrastre de las paletas de acuerdo a la longitud de la paleta.

Tabla 14. Valor del coeficiente de arrastre de las paletas (C_D).

C_D	Longitud paleta / ancho paleta
1.16	1
1.20	5
1.50	20
1.90	∞

Fuente: Romero Jairo. Purificación del Agua. 2da edición, 2006. Editorial: Escuela Colombiana de Ingenieros.

²⁵ Romero Jairo. Purificación del Agua. 2da edición, 2006. Editorial: Escuela Colombiana de Ingenieros.

Los agitadores mecánicos tienen una velocidad angular constante de 2 RPM y una configuración de paletas de 0.15 m de ancho y 4.60 m de largo²⁶, distribuida de la siguiente forma:

- El primer floculador tiene un agitador que consta de 8 paletas.
- El segundo y tercer floculador tienen un agitador con 6 paletas.
- El cuarto y quinto floculador tienen un agitador de 4 paletas.

Tomando un caudal frecuente de 0.425 m³ y el volumen del floculador, se obtiene un tiempo de retención de 4.29 minutos en cada uno de los floculadores. Los resultados del estudio del comportamiento en la cinética del fluido y los coloides se muestran en la **tabla 15**.

Tabla 15. Potencia y gradiente de velocidad en cada tanque de floculación de la PTAP El Dorado.

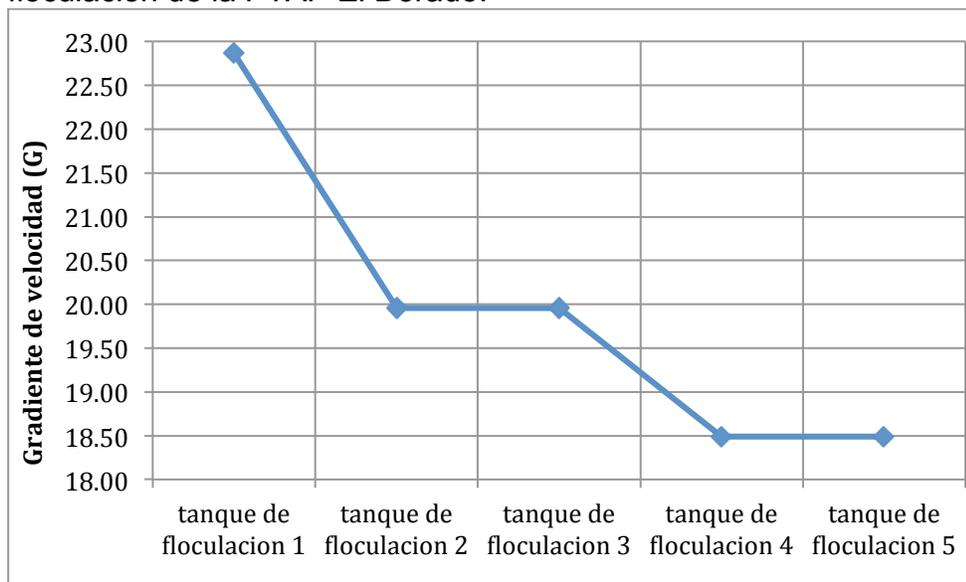
	distancia al eje de la paleta (m)				Velocidad relativa de las paletas con respecto al fluido (m/s)				Potencia (P,W)	Gradiente de velocidad (G, s ⁻¹)
	Paleta 1	Paleta 2	Paleta 3	Paleta 4	Paleta 1	Paleta 2	Paleta 3	Paleta 4		
Tanque de floculación 1	2,05	1,8	1,55	1,3	0,322	0,283	0,243	0,204	81,62	22,87
Tanque de floculación 2	2,05	1,68	1,3		0,322	0,263	0,204		62,16	19,96
Tanque de floculación 3	2,05	1,68	1,3		0,322	0,263	0,204		62,16	19,96
Tanque de floculación 4	2,05	1,68			0,322	0,263			53,35	18,49
Tanque de floculación 5	2,05	1,68			0,322	0,263			53,35	18,49

Fuente: elaboración propia.

El gradiente de velocidad en los sistemas de tratamiento de agua se define como la intensidad de la agitación o el movimiento del agua; en la **gráfica 9** se muestra la trayectoria del gradiente de velocidad a través de los 5 tanques de floculación.

²⁶ MATIZ CORREA, Leonardo Fabio. Optimización del proceso de floculación en la planta de tratamiento de agua potable El Dorado de Bogotá. Bogotá D.C., 2008. Trabajo de grado (ingeniero ambiental). Universidad de los Andes. Facultad de ingeniería. Departamento de ingeniería civil y ambiental. Disponible en: <http://oab2.ambientebogota.gov.co/apc-aa-files/57c59a889ca266ee6533c26f970cb14a/Optimizaci%F3n_proceso_floculaci%F3n_planta_%20tratamiento_%20aguapotable%20Dorado%20Bogot%E1.pdf.PDF>

Gráfica 9. Gradiente de velocidad en cada uno de los tanques de floculación de la PTAP El Dorado.



Fuente: elaboración propia.

La planta El Dorado tiene una disposición del sistema de floculación con gradientes de velocidad descendientes, la cual se evidencia en el paso del fluido a través de los cinco tanques, al disminuir la cantidad de paletas y aumentando la eficiencia en el proceso.

La agitación no puede llegar a velocidades demasiado lentas debido a que esto podría generar que las partículas que se han formado sedimenten, lo cual no corresponde a este sub-proceso. La agitación tampoco puede ser demasiado rápida debido a que el *floc* se podría romper y el proceso de sedimentación presentaría una alta deficiencia (no ocurriría, u ocurriría muy poca sedimentación), ocasionando una obstrucción del medio filtrante en la fase de filtración, provocando una suspensión del proceso de potabilización.

Para la operación y manejo adecuado de los floculadores mecánicos se debe tener en cuenta los siguientes puntos:

- Las paletas de agitación deben estar completamente sumergidas en el agua que se está tratando.
- La formación de *floc* y sus características estructurales.
- Posibles obstrucciones en el sistema que conduce el agua.

2.2.7 Sedimentación. Una vez el agua forma un *floc* de tamaño considerable (grande, pesado, capaz de precipitar fácilmente) durante el proceso de floculación, pasa al proceso de sedimentación, el cual remueve el *floc* en suspensión producido por el tratamiento químico-mecánico en el proceso de coagulación-floculación, mediante fuerza de gravedad, haciendo que precipite al fondo de un tanque, dando como resultado un agua que se conoce como *agua clarificada*.

Los colides removidos en forma de lodos son partículas floculantes y precipitantes en las que la densidad y el volumen cambian a medida que se adhieren unas a otras mediante mecanismos de floculación, precipitación, arrastre o barrido. El comportamiento de la sedimentación floculante hace referencia a la unión de dos *flocs*; estos pierden su velocidad individual de sedimentación y adquieren una nueva, la cual es característica de la nueva partícula formada, que por lo general es mayor a la de las partículas individuales.

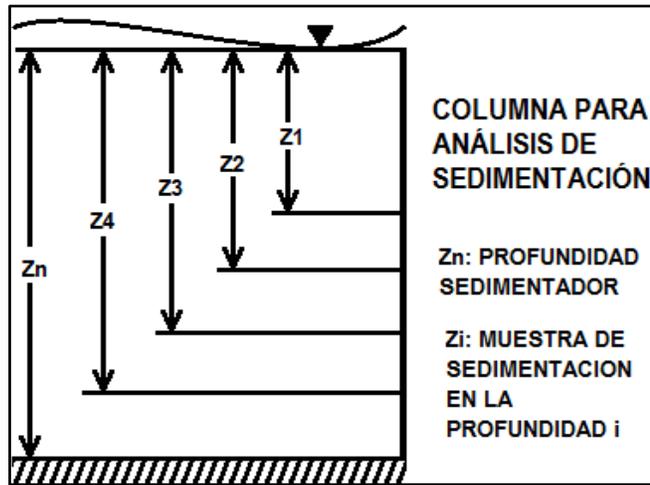
Existen varios factores que afectan la sedimentación, estos son ²⁷:

- Tiempo de retención.
- Velocidad de flujo.
- Tipo de partículas (densidad, volumen, forma y peso de la partícula en el agua).
- Viscosidad cinemática del agua.
- Temperatura.
- Velocidad de asentamiento.
- Dimensiones del sedimentador (profundidad del tanque de sedimentación y área de sedimentación).
- Tasa de rebose en la canaleta.

No existe un método matemático que relacione todas las variables y defina el sistema del proceso de sedimentación de partículas floculantes y debido a esto es necesario realizar diferentes estudios con columnas de sedimentación²⁷. Ver **figura 16**.

²⁷ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Purificación del agua. 2da edición. Bogotá D.C.: Escuela colombiana de ingenieros, 2005.

Figura 16. Columna para análisis de sedimentación con diferentes dimensiones.



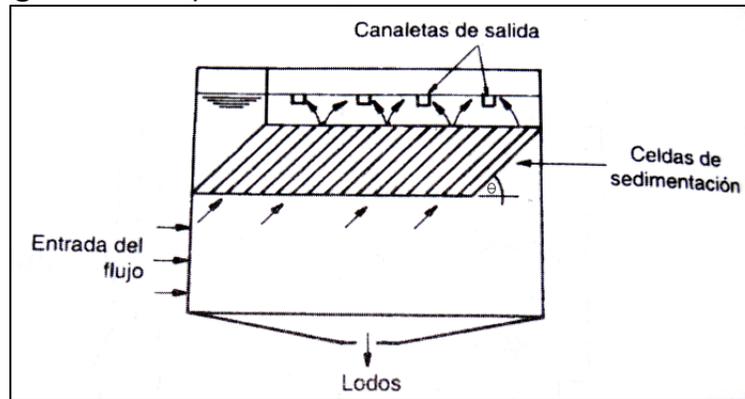
Fuente: MATIZ CORREA, Leonardo Fabio. Optimización del proceso de floculación en la planta de tratamiento de agua potable El Dorado de Bogotá. Bogotá D.C., 2008. Trabajo de grado (ingeniero ambiental). Universidad de los Andes. Facultad de ingeniería. Departamento de ingeniería civil y ambiental.

El sedimentador utilizado en la planta El Dorado es de tasa alta y placas paralelas, donde la relación entre la longitud de las placas y la distancia perpendicular (L/d) debe estar entre 20 y 40, y para permitir la remoción, la configuración de cada placa debe tener una inclinación de 60° con respecto al horizonte colocada en forma paralela en la parte superior de los tanques de sedimentación. Ver **figura 17 y 18**.

El fluido que sale del tren de floculación entra en paralelo a los tanques de sedimentación con un régimen laminar con flujo ascensional del agua. Existen dos tipos de mecanismos de sedimentación; el primero es por diferencia de densidades entre el agua y el *floc* formado, el cual es más pesado, por lo que precipitará con una velocidad dada por el tamaño, la naturaleza y la composición del *floc*; el segundo mecanismo favorece a las partículas que son menos densas que el agua por lo cual tiene una trayectoria ascendente (con una velocidad limitada para evitar el arrastre de los lodos) y choca con las placas paralelas, formando un aglutinamiento del *floc* en la parte inferior de cada una de estas, aumentando el tamaño y densidad del lodo pre-formado, logrando una remoción continua de este mediante el transcurso del tiempo y la cantidad de agua en

contacto. El tiempo de retención dentro del sedimentador es de aproximadamente 7 horas²⁸.

Figura 17. Esquema del sedimentador.



Fuente: ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Purificación del agua. 2da edición. Bogotá D.C.: Escuela colombiana de ingenieros, 2006.

Figura 18. Sedimentadores de la PTAP El Dorado



Fuente: elaboración propia.

²⁸ MATIZ CORREA, Leonardo Fabio. Optimización del proceso de floculación en la planta de tratamiento de agua potable El Dorado de Bogotá. Bogotá D.C., 2008. Trabajo de grado (ingeniero ambiental). Universidad de los Andes. Facultad de ingeniería. Departamento de ingeniería civil y ambiental. Disponible en: <http://oab2.ambientebogota.gov.co/apc-aa-files/57c59a889ca266ee6533c26f970cb14a/Optimizaci%F3n_proceso_floculaci%F3n_planta_%20tratamiento_%20aguapotable%20Dorado%20Bogot%E1.pdf.PDF>

2.2.7.1 Tratamiento de lodos. Los lodos que se extraen del fondo del tanque de sedimentación de la planta El Dorado están principalmente constituidos por partículas finas de sílice, arcilla y limo, y su densidad relativa es de aproximadamente 1.03 con el 95% de agua, y con el *floc* de alumbre puede cambiar su densidad relativa a valores entre 1.002 y 1.18 según el tipo de coloide contenido en él ²⁹.

Los lodos se mueven hidráulicamente hacia una tolva de lodos en la parte inferior de los sedimentadores, donde son extraídos mediante una tubería de desagüe. La remoción de los lodos se hace en dos fases:

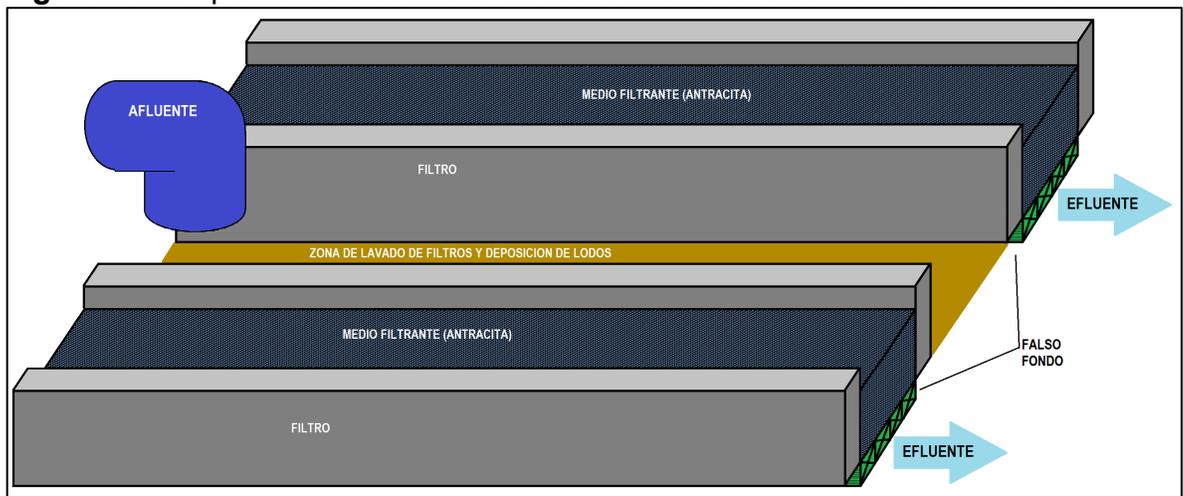
- La primera fase de drenado del lodo se ejecuta cada 6 horas por remoción mecánica intermitente y afecta la sedimentación zonal, es decir suspensiones de concentraciones intermedias de material floculante, se encuentra entre la interface de la parte superior, donde ocurre la sedimentación y la clarificación, y la parte inferior donde el lodo está en mayor concentración y compresión. El lodo sale por arrastre a través de un tubo que se encuentra aproximadamente en la mitad de la profundidad del sedimentador y que conduce a la planta de tratamiento de lodos.
- En la segunda fase el lodo se expulsa por remoción manual periódicamente cada 8 días, vaciando los tanques de floculación y realizando las operaciones de mantenimiento. En esta operación se remueven los lodos de mayor concentración que están en la parte más profunda del sedimentador con ayuda de agua a presión para arrastrarlos.

²⁹ MATIZ CORREA, Leonardo Fabio. Optimización del proceso de floculación en la planta de tratamiento de agua potable El Dorado de Bogotá. Bogotá D.C., 2008. Trabajo de grado (ingeniero ambiental). Universidad de los Andes. Facultad de ingeniería. Departamento de ingeniería civil y ambiental. Disponible en: <http://oab2.ambientebogota.gov.co/apc-aa-files/57c59a889ca266ee6533c26f970cb14a/Optimizaci%F3n_proceso_floculaci%F3n_planta_%20tratamiento_%20aguapotable%20Dorado%20Bogot%E1.pdf.PDF>

2.2.8 Filtración. Es la última etapa para la remoción de la turbiedad y para establecer las propiedades estéticas del agua tratada cumpliendo los parámetros de calidad. La coagulación, floculación y la sedimentación son procesos que remueven alrededor del 90% de la turbiedad y el color por medio del *floc*; una cantidad de este sale en el agua clarificada debido a las deficiencias de rebose en los conductos de recolección de las placas paralelas, y pasa por el proceso de filtración, el cual actúa como un refuerzo en la remoción de las partículas floculantes y puede remover hasta el 9.5% de la turbiedad inicial del agua cruda. La filtración no solo elimina la turbiedad, color y *floc* que no sedimentó, además elimina metales oxidados y microorganismos (en especial los que tienen cierto grado de resistencia a la desinfección).

El mecanismo de remoción de las partículas en la filtración se da por adsorción; cuando la partícula entra en contacto con el medio filtrante y se retiene por acciones de interacciones químicas y enlaces³⁰. En la planta El Dorado, el filtro está compuesto principalmente de antracita, tal como se observa en las **figuras 19 y 20**. La fuerza impulsora del agua a través del lecho filtrante se da por gravedad y se considera la antracita como un medio filtrante de alta tasa. Conjuntamente con la antracita como medio filtrante, el filtro tiene un falso fondo, el cual es el soporte del medio y el lugar por donde ocurre el drenaje del efluente y facilita una distribución uniforme del agua para lavado de filtro en contraflujo.

Figura 19. Esquema de sistema de filtros con antracita como medio filtrante.



Fuente: elaboración propia.

³⁰ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Purificación del agua. 2da edición. Bogotá D.C.: Escuela colombiana de ingenieros, 2006.

Figura 20. Sistema de filtros de la PTAP El Dorado.



Fuente: elaboración propia.

Existen distintas variables que afectan la filtración en el proceso de potabilización de agua, algunas de estas son:

- Características de la antracita como medio filtrante; debe ser no aglomerante, con un contenido de material volátil entre 2 y 8 %, limpia, con una dureza mayor a 2.7 MOHS, densidad relativa mayor a 1.4, solubilidad en ácido menor a 5 % y un tamaño efectivo del lecho entre 0.6 y 0.7 metros³¹.
- Características del tanque de filtración (medidas, material).
- Concentración de sólidos suspendidos.
- Características y carga eléctrica del *floc*.
- Propiedades del agua.

2.2.8.1 Lavado de filtros. Esta operación se debe realizar periódicamente para evitar una sobrecarga de presión en los filtros; consiste en hacer fluir agua desde el fondo falso del tanque, y en dirección opuesta a la filtración (ascendente), con una presión ajustada para remover completamente las partículas que se adsorbieron. El aire ayuda a la expansión del medio filtrante y a la des-adsorción de las partículas, y el agua de lavado es la encargada de arrastrar el lodo y conducirlo a un tanque para su tratamiento.

En la planta El Dorado, el agua de lavado utilizada para este proceso proviene de un tanque de almacenamiento el cual se encuentra a un nivel mayor que el filtro, por lo cual, cuando se activa el proceso de lavado de filtros, la energía potencial almacenada en este, es la encargada de producir la fuerza necesaria para llevar a cabo un correcto lavado sin alterar la antracita y evitando la pérdida de esta sustancia.

³¹ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Purificación del agua. 2da edición. Bogotá D.C.: Escuela colombiana de ingenieros, 2006.

En el proceso de lavado de filtros la concentración de agua en el lecho aumenta en comparación con el lecho en reposo. La operación debe manejar un porcentaje de expansión menor al 40 %.

2.2.9 Desinfección. Esta etapa del proceso permite eliminar bacterias y patógenos del agua que puedan ser perjudiciales para la salud de las personas que tendrán contacto con esta una vez termine el proceso de potabilización.

Antes de entrar a esta etapa, en la PTAP El Dorado, el agua proveniente del proceso es sometida a una pre aireación, la cual permite la remoción de compuestos sulfatados disueltos en el agua después de la filtración, los cuales pueden llegar a inhibir los efectos de la desinfección, y oxida algunos compuestos férricos que son adicionados de manera indirecta durante la coagulación, haciendo de esta aireación-oxidación un excelente precursor para una buena disolución del cloro en el agua.

La desinfección consiste en la adición (en bajas cantidades) de un compuesto químico desinfectante para reducir la cantidad de coliformes totales y eliminar la presencia de E-Coli en el agua tratada. En la planta El Dorado se utiliza el cloro como sustancia desinfectante en el proceso de potabilización, con el cual se debe lograr un correcto proceso de desinfección cumpliendo con los siguientes parámetros:

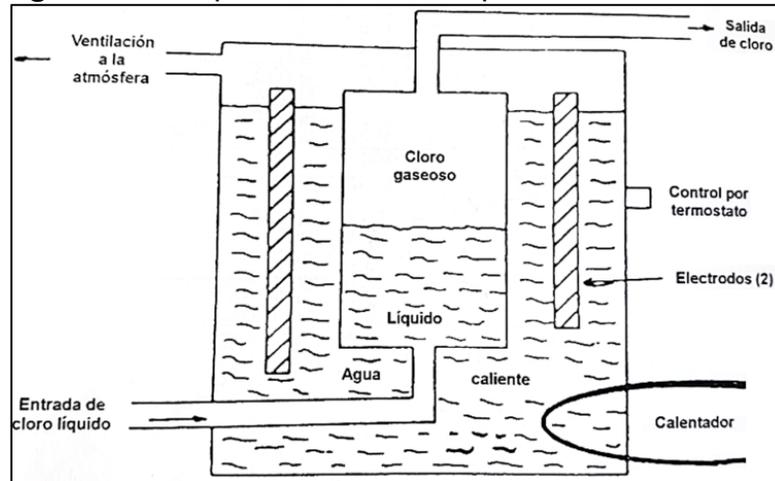
- Eliminar en un tiempo establecido todos los microorganismos que se encuentran en el agua.
- Los parámetros del agua después de llevar a cabo la desinfección deben cumplir con las normas establecidas para la planta en cuanto a la concentración de cloro libre y cloro residual, controlando la operación de dosificación de cloro.
- El cloro no es combustible pero es altamente corrosivo, con valores de pH entre 2 y 4³², por lo que el sistema de inyección debe estar compuesto por una tubería de material inoxidable y PVC.
- El cilindro de almacenamiento de cloro debe estar en un ambiente regulado; se debe evitar el contacto directo con la luz solar, y la temperatura del lugar debe ser inferior a 10 °C, con reguladores de presión y vacío.

En la PTAP El Dorado, la dosificación de cloro en este proceso se da por medio de extracción de la fase líquida del cloro en el cilindro; el fluido pasa por una estación de evaporación, en la cual el evaporador es un aparato de calentamiento usado para convertir cloro líquido en cloro gaseoso por medio de una chaqueta de

³² ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Purificación del agua. 2da edición. Bogotá D.C.: Escuela colombiana de ingenieros, 2006.

calentamiento, que por lo general es agua caliente, acelerando la tasa de obtención de cloro gaseoso para cubrir las necesidades de la planta. Se regula la velocidad de extracción de cloro líquido debido a que esto genera una reducción de temperatura, lo que retarda la vaporización del cloro líquido, y se agrega el vapor al fluido en tratamiento ³². A continuación, se presenta en la **figura 21** el equipo evaporador de cloro líquido.

Figura 21. Evaporador de cloro líquido.



Fuente: ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Purificación del agua. 2da edición. Bogotá D.C.: Escuela colombiana de ingenieros, 2006.

2.2.9.1 Cámara de contacto. El agua, después de la adición del cloro, pasa a la cámara de contacto, la cual es una cámara cerrada al medio ambiente con baffles, la cual le da dirección al fluido y tiene un tiempo de retención de aproximadamente 30 minutos. La capacidad de esta cámara permite un residual de cloro libre de por lo menos 2 mg/L en el agua.

2.2.9.2 Post-alcalinización y almacenamiento. Al finalizar la dosificación de cloro como desinfectante en el agua, las unidades de pH del fluido son bajas, lo cual indica un carácter ácido, por lo que es necesario llevar a cabo una neutralización o post-alcalinización, la cual se realiza después de la desinfección mediante la adición de pequeñas dosis de cal hidrata para lograr llevar las unidades de pH al rango establecido para agua tratada, teniendo en cuenta las normas establecidas en la planta El Dorado.

Se denomina *agua potable* a aquella que por cumplir las características físicas, químicas y microbiológicas, en las condiciones señaladas en el Decreto 1575 de

2007 del Ministerio de la Protección Social y demás normas que lo reglamentan, es apta para consumo humano. Se utiliza en bebida directa, en la preparación de alimentos o en la higiene personal (Liévano, 2010). Resulta del proceso de purificación descrito anteriormente, donde se realiza una reducción de todos los contaminantes presentes en forma de sólidos sedimentables, sólidos suspendidos, compuestos químicos disueltos y carga biológica presente en los cuerpos de agua.

El agua potable es almacenada en varios tanques conectados en serie; el primero se encuentra en los límites de la cámara de contacto en la planta El Dorado, los otros están conectados fuera de la planta y son llamados Dorado 1 y Dorado 2, cada uno con una capacidad específica de volumen de almacenamiento, los cuales son los encargados de distribuir y regular el suministro de agua hacia los lugares donde abastece esta planta según la demanda requerida.

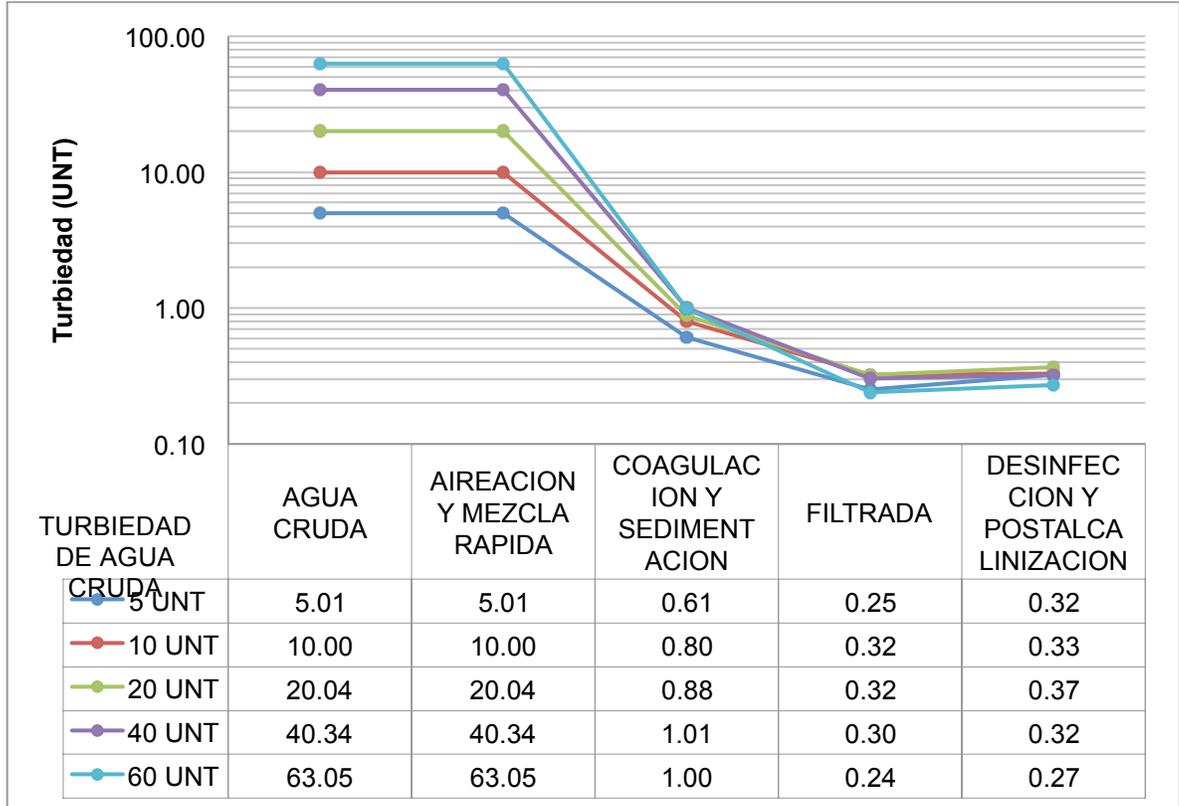
2.3 TRAYECTORIA DEL AGUA EN EL PROCESO DE POTABILIZACIÓN

Los procesos de tratamiento de aguas son controlados para poder obtener una correcta operación de la planta y una mayor calidad del agua, por lo que se realizan controles en intervalos de dos horas de cada etapa del proceso donde el agua sufre alteraciones físicas, químicas o bacteriológicas; se miden parámetros como pH, turbiedad, alcalinidad y color. Dependiendo de las características del agua cruda que entra a la planta, cada uno de los tratamientos realizados varía y el proceso se ajusta según estudios previos de esta.

2.3.1 Trayectoria de la turbiedad en el agua a lo largo del proceso. Al relacionar diferentes tipos de agua cruda en los datos históricos del año 2017 podemos apreciar la trayectoria y variación de la turbiedad en las diferentes etapas del proceso como se muestra en la **gráfica 10**.

En el transcurso del año se presentan diferentes valores de turbiedad en el agua cruda que rondan en el rango de 2 a 70 UNT. Mediante las operaciones de coagulación y sedimentación se elimina en promedio un 92% de la turbiedad inicial, la cual resulta en un rango entre 0,40 y 1,60 UNT.

Gráfica 10. Trayectoria de la turbiedad del agua cruda en el proceso durante el año 2017.



Fuente: elaboración propia.

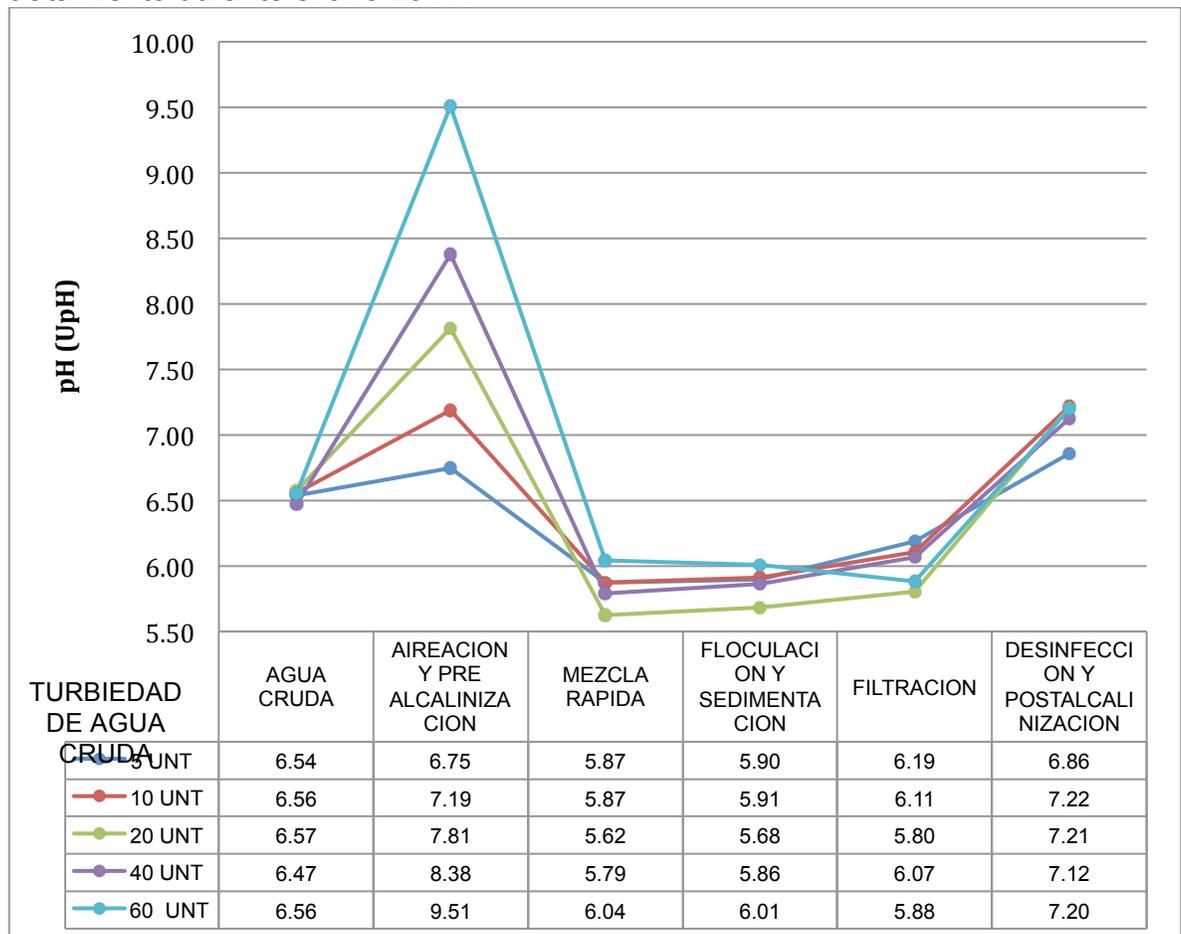
La filtración es el proceso que se encarga de rectificar los sólidos en suspensión que no se trataron en la sedimentación, retira algunos contaminantes y entrega agua con mayor pureza y una turbiedad entre 0,10 y 0,70 UNT, eliminando en promedio un 5% de la turbiedad inicial. Cuando la coagulación, floculación y sedimentación no alcanzan su meta de eliminación de contaminantes medidos en turbiedad por problemas en la dosificación de coagulante, se sobrecargan los filtros, lo que implica un mantenimiento de lavado de filtros en mayor frecuencia.

Por último, para establecer un pH neutro después de la desinfección es necesario alcalinizar el agua, lo que requiere adición de cal hidrata aportando un porcentaje mínimo de turbiedad promedio entre 0,01 y 0,07 UNT, en consideración cuando existe sobre dosificación, se acidifica más el agua por lo que es necesario mayores concentraciones de alcalinizante lo que se refleja en un aporte mayor de turbiedad.

2.3.2 Trayectoria del pH en el agua. Se puede apreciar el comportamiento del pH del agua cruda teniendo en cuenta los datos históricos como se muestra en la **gráfica 11**.

El agua cruda ingresa con un pH entre 5,7 y 7,0 UpH, con un promedio para todas los rangos de turbiedad de 6,54 UpH; en el proceso a medida que aumenta la turbiedad del agua cruda se necesita mayor dosis de coagulante sulfato de aluminio, por lo que se adiciona más dosis de pre-alkalinización, lo cual se manifiesta en el incremento del pH.

Gráfica 11. Trayectoria del pH del agua cruda a lo largo del proceso de tratamiento durante el año 2017.



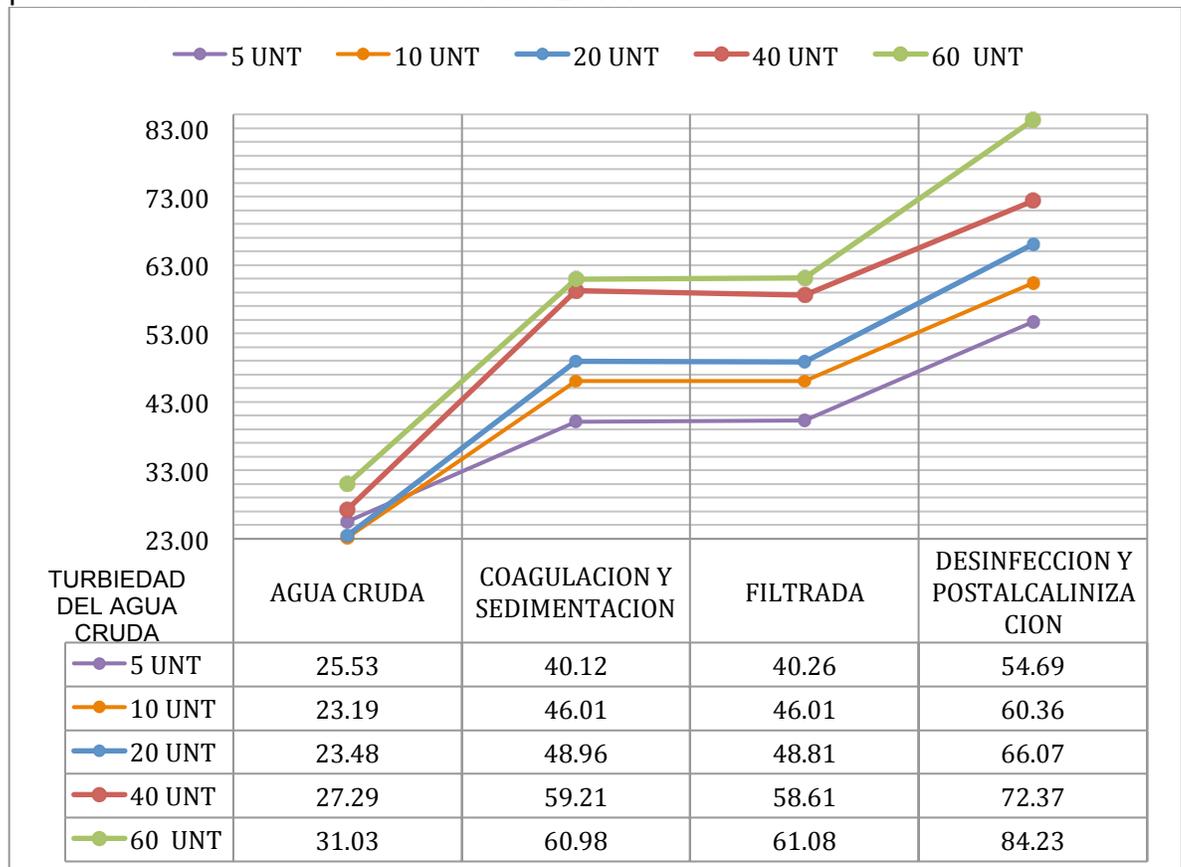
Fuente: elaboración propia.

Para turbiedades de 5 UNT se dosifica cal hidrata hasta obtener en el agua un pH promedio de 6,75 UpH, para turbiedades de 10 UNT se dosifica hasta obtener en el agua un pH promedio de 7,20 UpH, para turbiedades de 20 UNT se debe

obtener en el agua un pH promedio de 7,80 UpH, para turbiedades de 40 UNT se dosifica cal hidrata hasta obtener en el agua un pH promedio de 8,40 UpH y para turbiedades de 40 UNT es necesario obtener en el agua un pH promedio de 9,50 UpH. Después de la aplicación del coagulante, sulfato de aluminio granular, desciende el pH hasta un valor promedio de 5,8 UpH originando agua acidulada, después de la coagulación, floculación, sedimentación y filtración el pH tiene un ligero incremento promedio de 0,2 UpH al remover en pequeña proporción las sales y compuestos iónicos derivados del sulfato de aluminio adicionados para la coagulación. Después de la filtración el agua en la estabilización y neutralización del agua se somete a un incremento de pH hasta un valor entre 6,3 a 8,2 UpH.

2.3.3 Trayectoria de la conductividad en el agua. Se puede apreciar el comportamiento de la conductividad del agua cruda teniendo en cuenta los datos históricos del año 2017 como se muestra en la **gráfica 12**.

Gráfica 12. Trayectoria de la conductividad promedio del agua cruda en el proceso de tratamiento durante el año 2017.



Fuente: elaboración propia.

La conductividad se define como la capacidad del agua para conducir una corriente eléctrica a través de los iones disueltos, es directamente proporcional a la turbiedad en la caracterización del agua cruda y al aumenta al dosificar coagulante sulfato de aluminio debido a los compuestos iónicos ($\text{Al}(\text{OH})_2^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})_3^+$ y $\text{Al}(\text{OH})_4^{4+}$) formados por la disociación de este compuesto. La conductividad también aumenta en la desinfección y alcalinización, lo cual se puede definir por la presencia de iones como iones calcio (Ca^{2+}) cloruros (Cl^-), carbonatos y bicarbonatos.

2.4 CONDICIONES DE OPERACIÓN ACTUAL DE LA PTAP EL DORADO

La planta de tratamiento de agua potable (PTAP) El dorado está diseñada para tratar agua de manera continua, dando como resultado un agua que cumple con las normas de calidad nacionales e internas. La operación de la planta está gobernada bajo cuatro principios:

- **Confiabilidad:** Para ello los equipos y cada unidad de la planta debe operar de manera satisfactoria, respondiendo al tratamiento del agua independientemente de sus características iniciales, y en cumplimiento de los requerimientos de calidad.
- **Flexibilidad:** Representa la estabilidad y constancia del agua potable al final del proceso, la planta debe estar en la capacidad de operar de manera continua sin importar la ausencia de alguna unidad, como se presenta en el mantenimiento de los sedimentadores o en el lavado de filtros. En el caso de mantenimiento general se tiene una planta de respaldo que cubra la demanda en el tiempo de espera.
- **Mano de Obra:** Personal capacitado para realizar el mantenimiento y operación de las unidades de la planta y mantener las condiciones de dosificación con buenas prácticas según la metodología lo requiera.
- **Automatización y Control:** La automatización de la planta se basa en la dosificación de las sustancias químicas en el agua y el aforo de los caudales con confiabilidad, para esto se hace calibración de los diferentes equipos y el control que se da con la lectura de las características del agua en cada fase del proceso.

2.4.1 Factores a controlar. La planta cuenta con personal suficiente y capacitado para llevar el control de las condiciones de operación. Las principales operaciones que se realizan en la planta se describen a continuación.

2.4.1.1 Aforo. Este proceso no altera las propiedades del agua aunque es

necesario para controlar las condiciones de tratamiento, en el proceso es necesario controlar cada uno de los caudales de cada fase de tratamiento y los caudales de tratada y suministrada. Es indispensable en el proceso para ajustar la dosificación de los químicos, determinar eficiencias globales por unidad de proceso y calcular los costos unitarios de tratamiento. Se debe llevar un adecuado registro de caudal en periodos de tiempo cortos.

2.4.1.2 Alcalinización y coagulación. Es el factor más importante en el proceso de tratamiento y se debe tener en cuenta dos componentes básicos, los cuales son la selección del alcalinizante y coagulante, y la aplicación de estos compuestos en el agua.

La selección del coagulante no es una selección definitiva, es una evaluación continua que se desarrolla por medio del test de jarras y la corrida en planta piloto. El operador con fundamento teórico - empírico y con base en la temperatura, pH, alcalinidad, turbiedad y color del agua cruda evalúa el tipo de coagulante que se puede aplicar en la planta y su dosis optima teniendo en cuenta las operaciones unitarias instaladas en la planta y el tratamiento del lodo. Las variables respuesta para garantizar la selección son el tamaño y peso del *floc* formado, turbiedad del agua sedimentada, frecuencia de lavado de los filtros, eficiencia de las placas del sedimentador y filtrabilidad del agua.

El test de jarras no solo se realiza para la evaluación de nuevos coagulantes, también se usa para evaluar la dosis del coagulante actual cuando las características fisicoquímicas del agua cruda cambian de manera significativa como la turbiedad, pH o el color en épocas de alta precipitación y se desconoce la conducta de los compuestos orgánicos frente al coagulante.

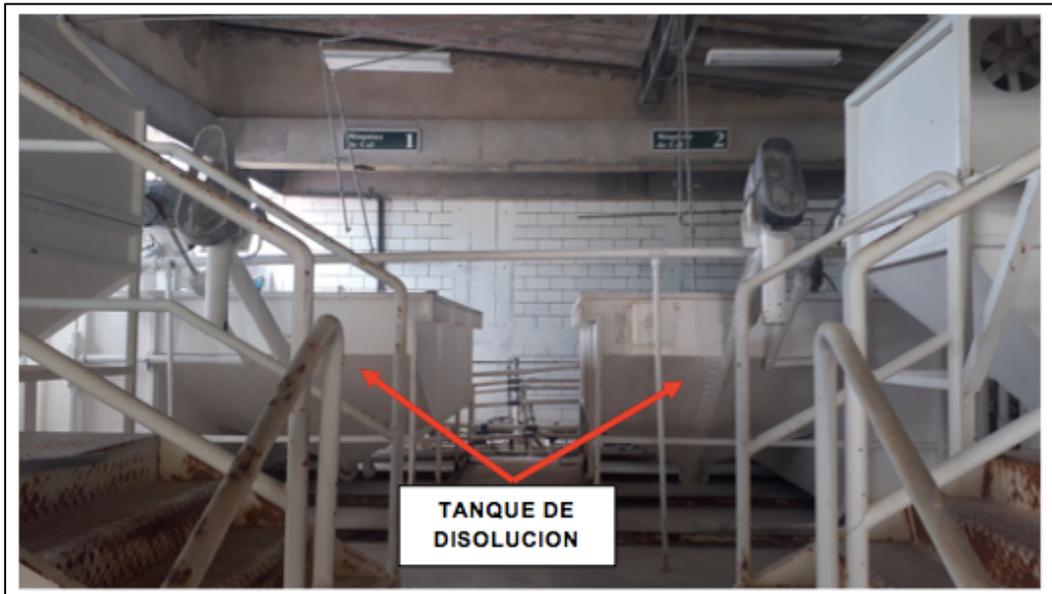
- **Preparación de soluciones de alcalinizante y coagulante.** El coagulante y alcalinizante llegan a las instalaciones de la planta por lotes, los cuales se encuentran al lado de los tanques de dilución; un operario es el encargado de trasladar y verter el alcalinizante y el coagulante en la tolva de los equipos dosificadores en seco. En la **figura 22** se muestra el sistema de dosificación de sulfato de aluminio granular en la PTAP El Dorado. Por otro lado, en la **figura 23** se observan los tanques de dilución utilizados en el proceso.

Figura 22. Sistema de dosificación de sulfato de aluminio granular en PTAP El Dorado.



Fuente: elaboración propia.

Figura 23. Tanques de disolución de coagulante y cal hidrata en PTAP El Dorado.

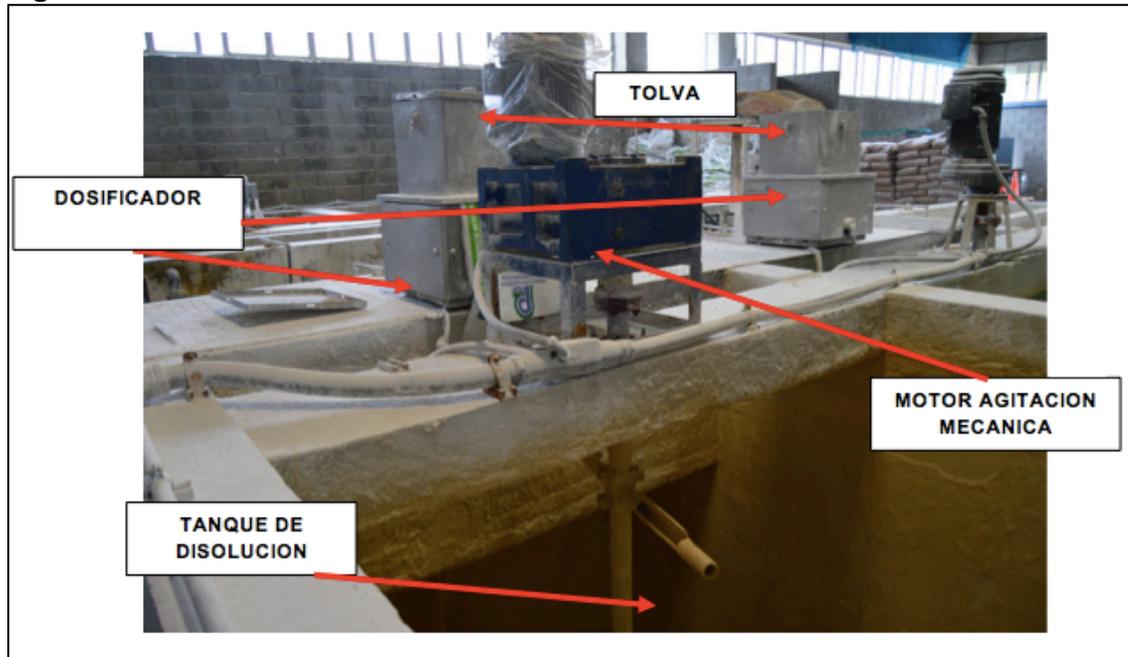


Fuente: elaboración propia.

Los dosificadores en seco están conectados a tanques de disolución que emplean agitación mecánica por medio de una aspa, o por la inyección de aire a través del fluido, para evitar la formación de precipitado. Este método de dosificación presenta algunas desventajas las cuales pueden llevar a sobrecostos como lo son:

- El costo de los equipos necesarios es muchas veces mayor,
- La reparación y mantenimiento requiere de personal especializado,
- Los equipos son rusos por lo que los repuestos no siempre están disponibles y es necesario importarlos,
- El tanque de disolución en algunas ocasiones no es suficientemente grande, y
- El tiempo de retención de la solución es corto y puede ocurrir que el alcalinizante o coagulante no se alcance a disolver por completo, lo cual traduce en pérdidas que se reflejan en los precipitados en lodos para el coagulante y en el fondo de la cámara de aireación para el alcalinizante. A continuación, en la **figura 24** se presenta el sistema de dosificación de cal hidratada en la PTAP El Dorado.

Figura 24. Sistema de dosificación de cal hidratada en PTAP El Dorado.



Fuente: elaboración propia.

El dosificador en seco es volumétrico, el compuesto químico es colocado en la tolva situada en cierta altura y desde esa posición cae sobre un mecanismo de medida que es un tornillo sin fin, que se mueve a una velocidad constante controlada para desplazar cierta cantidad de volumen de sólido³³.

La máquina dosificadora de cal hidratada y de sulfato de aluminio granulado se debe mantener cargadas con producto químico por lo menos hasta la mitad de la tolva. Se debe asegurar la adecuada agitación con aire en los tanques de

³³ RODRIGUEZ PEÑA, Carlos. Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de agua. Bogotá D.C.: Santafé de Bogotá: Universidad distrital, 1994.

preparación de solución de cal, regulando la válvula de entrada de aire, evitando que sea muy baja y no mezcle o muy alta que lleve a derrame de la solución. • Se debe mantener el tanque de disolución en mínimo dos (2) metros, realizando el ajuste de la entrada de agua y salida de solución de cal cuando sea requerido³⁴. Las especificaciones del dosificador es un SCHENCK ACCURATE con tornillo alimentador de acero inoxidable modelo 603. S / N 21651-01a-603.con un motor de 0.25 hp dc y 1750 rpm. BOSTON GEAR REDUCER. El voltaje de entrada al controlador es 115 voltios. El controlador convertirá la potencia en la corriente directa. Tolva de vinilo completo de TUF-FLEX.

• **Control del proceso de dosificación de alcalinizante.** El pre-alcalinizante se dosifica de acuerdo con el caudal de agua cruda y las características del agua cruda y agua con pre-alcalinizante. Si el pH del agua con pre-alcalinizante está entre 5.8 y 9.5, debe tener en cuenta la turbiedad y color del agua cruda para determinar la dosis óptima que es la que asegura una buena formación de *floc*³⁴:

- Si el pH del agua con pre-alcalinizante está por debajo de 5.8 aumenta la dosificación.
- Si el pH del agua con pre-alcalinizante es superior a 9.5 disminuye la dosificación hasta ajustar teniendo en cuenta un rango de alcalinidad entre 10-14 mg/L.

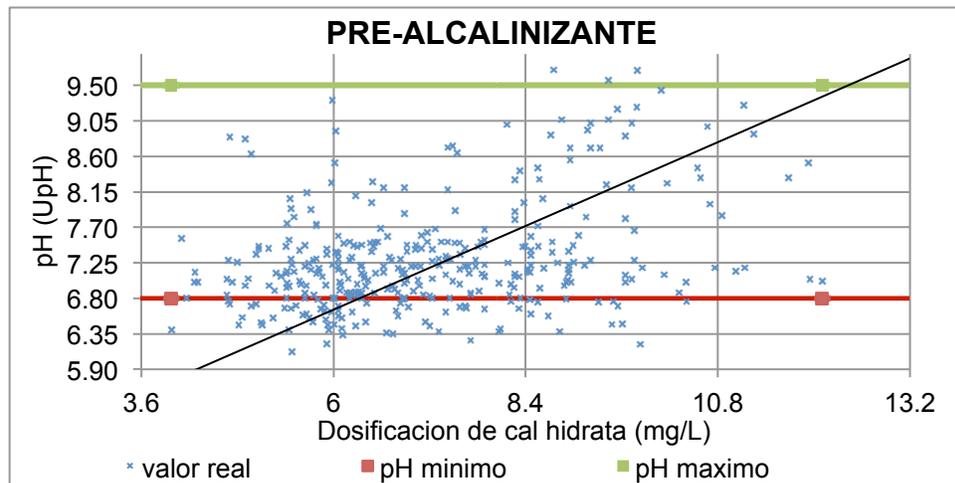
Para la estabilización del agua después de la desinfección se dosifica el alcalinizante de acuerdo con las buenas prácticas de operación, el caudal de agua cruda y las condiciones del agua cruda y agua con pre- alcalinizante³⁴ así:

- Si el pH de agua tratada está en un rango entre 5.5 pH a 8.1 pH mantiene la dosificación.
- Si el pH de agua tratada es mayor a 8.1 pH disminuye dosificación.
- Si el pH de agua tratada es menor a 5.5 pH aumenta dosificación.

La operación es gobernada por límites de alarma, los cuales son ajustados a un rango en el que se puede operar la planta según el protocolo de operación, en la **gráfica 13** se muestra el comportamiento del pre-alcalinizante con el pH del agua.

³⁴ HERNÁNDEZ, M. A., Y SÁNCHEZ CONTRERAS, T. Procedimiento: Operación normal, parada y reinicio de la Planta El Dorado. Bogotá D.C.: Acueducto, agua, alcantarillado y aseo de Bogotá. 2017.

Gráfica 13. Relación de pre-alcalinizante con el pH del agua del proceso para el año 2017.



Fuente: elaboración propia.

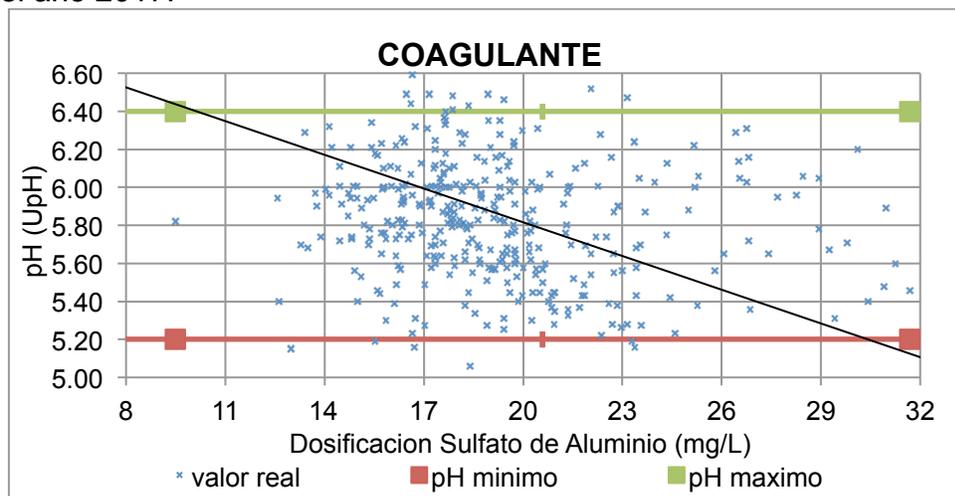
La dosis de pre-alcalinizante es directamente proporcional al pH de la mezcla, con el incremento del pre-alcalinizante aumenta el pH en la cámara de aireación, antes de la mezcla rápida.

- **Control del proceso de dosificación de coagulante.** El coagulante se dosifica de acuerdo con el caudal de entrada y las características del agua cruda y tratada, verificando la correcta aplicación de la solución en la canaleta Parshall. Se verifica cada dos horas o cuando se evidencia que no hay una adecuada formación de *floc* en los floculadores (antes de la entrada a floculadores) y según el caso:

- Si el pH esta entre 4.2 y 5.40 aplica la menor dosis de coagulante que asegura la formación de *floc*.
- Si el pH es mayor a 5.40 aumentar la dosificación de coagulante.
- Si el pH es menor de 4.2 disminuir la dosificación de coagulante.

La operación es gobernada al igual que el pre-alcalinizante, por límites de alarma, rango en los cuales se puede operar la planta según el protocolo de operación. En la **gráfica 14** se muestra el comportamiento del coagulante con el pH del agua del proceso.

Gráfica 14. Relación de coagulante con el pH del agua del proceso en el año 2017.



Fuente: elaboración propia.

La dosis de coagulante es inversamente proporcional al pH de la mezcla, a medida que se dosifica sulfato de aluminio el pH disminuye en la mezcla rápida, el cual se mantiene hasta la dosificación de cloro y post alcalinizante.

Se confirma la formación de *floc* en los floculadores y si no se está formando, ajusta la dosificación de la solución de coagulante y si es requerido, realiza el ensayo de jarras para determinar la dosis óptima.

Se realiza la lectura de la turbiedad del agua clarificada cada dos horas y de acuerdo con los resultados:

- Turbiedad menor o igual a 2.0 UNT, la pre-alcalinización, coagulación, floculación y sedimentación se realiza correctamente.
- Si la turbiedad es mayor a 2.0 UNT se verifica el proceso desde la entrada de agua cruda a la planta ajustando el proceso si es requerido o realizando la purga del sedimentador.
- Si la turbiedad de agua filtrada es mayor a 0,8 UNT se verifica el proceso desde la entrada de agua cruda a la planta ajustando el proceso si es requerido o realizando la purga del sedimentador o lavando los filtros necesarios. Cuando el tiempo de trabajo del filtro es igual o mayor a 84 horas se procede al lavado del filtro³⁵.

³⁵ HERNÁNDEZ, M. A., Y SÁNCHEZ CONTRERAS, T. Procedimiento: Operación normal, parada y reinicio de la Planta El Dorado. Bogotá D.C.: Acueducto, agua, alcantarillado y aseo de Bogotá. 2017.

- **Control del proceso de dosificación de desinfectante.** El desinfectante se dosifica de acuerdo con el caudal de agua filtrada y el cloro residual en el tanque de agua tratada. Al iniciar la operación, se energiza la motobomba de desinfectante y ajustar la dosificación hasta lograr un cloro residual de agua tratada entre 1.0 mg/L y 2.0 mg/L. Si el cloro residual es menor a 1,0 mg/L aumenta dosificación hasta ajustar al rango de 1.7 mg/L a 2.0 mg/L y si el cloro está por encima de 2,0 mg/l disminuye la dosificación hasta ajustar en el rango de 1.0 a 2.0 mg/L.

2.5 ANÁLISIS DE CONSUMO EN EL PROCESO ACTUAL

Una de las principales dificultades en cuanto a la dosificación de alcalinizante y coagulante es la variabilidad a lo largo del año de las características del agua y de los compuestos disueltos en ella, por lo que es necesario un seguimiento de manera continua.

En este capítulo se describe el consumo de alcalinizante y coagulante en el proceso de potabilización de agua en PTAP El Dorado.

La adición de alcalinizante y coagulante se controla como se mencionó anteriormente por medio del pH a la salida de la aplicación de pre-alcalinizante y la salida de la mezcla rápida (aplicación de coagulante). El pH es importante para tener una idea general de las condiciones químicas a las que se encuentra el agua a tratar, pero no evalúa correctamente el proceso de aplicación de coagulante, la operación y control es básica y no controla las variables principales como lo es la turbiedad y el color, fundamentales para la estética del agua a tratar. Por esta razón, la turbiedad se usa como variable independiente para representar la cantidad de contaminantes que se encuentran en el agua y evaluar la dependencia con respecto a las dosis de coagulante y pre-alcalinizante.

Según conocimientos a través de la operación de la planta, el operador encargado tiene libertad de decidir la dosis adecuada de pre-alcalinizante y coagulante. La elección se basa en dos aspectos:

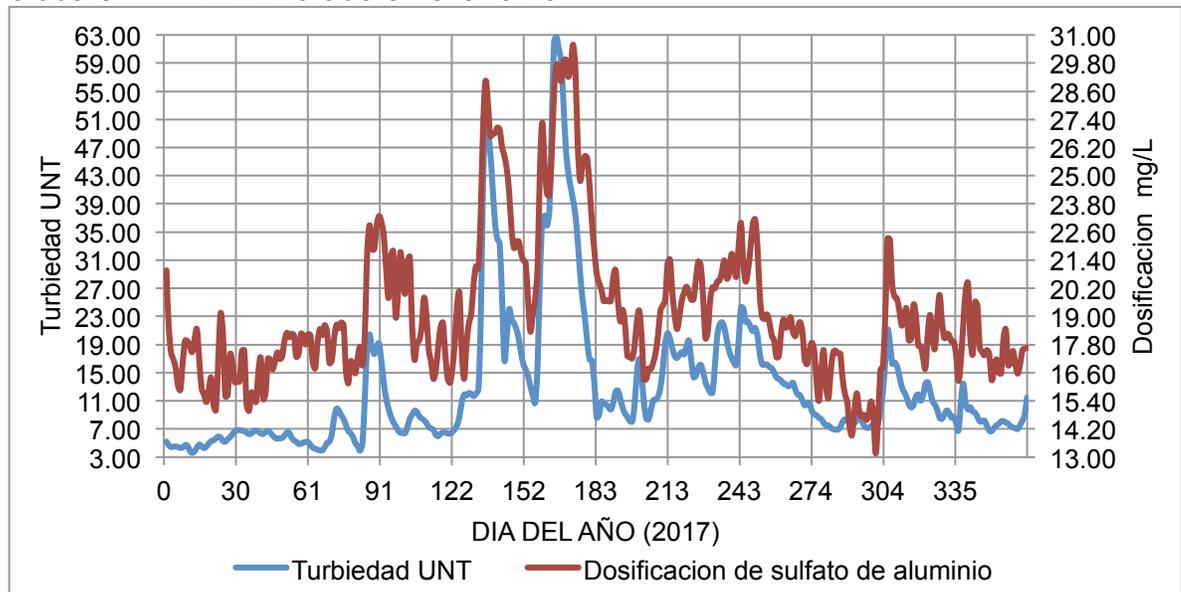
- El agua que entra a la planta en época de bajas precipitaciones tiene una turbiedad estable baja entre 5 y 10 UNT, por lo que la dosificación según la alcalinidad, (capacidad del agua para neutralizar compuestos ácidos), en este caso el coagulante, cada dos miligramos por litro de sulfato de aluminio son neutralizadas por un miligramo por litro de alcalinidad³⁶. Según este criterio, por cada 10 mg/L de alcalinidad del agua, 20mg/L de sulfato de aluminio se dosifica, solo si la turbiedad baja, y con un pH que ronda un valor de 6,5 UpH.

³⁶ RODRIGUEZ PEÑA, Carlos. Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de agua. Bogotá D.C.: Santafé de Bogotá: Universidad distrital, 1994.

- A medida que aumenta la turbiedad se ajusta el pH con un valor mayor después de la pre-alcalinización, dándole la capacidad al agua para neutralizar una mayor cantidad de coagulante. La selección de la cantidad de pre-alcalinizante se hace con fundamentos empíricos y ensayo-error basándose en el pH del agua. Cuando la aplicación del alcalinizante llega a la saturación el pH no cambia, los valores rondan entre 8,0 y 9,0 UpH.

La aplicación de coagulante durante el año tiene un comportamiento relativo con las épocas con mayor precipitación y se puede relacionar con la turbiedad como se muestra en la **gráfica 15**.

Gráfica 15. Relación de dosificación de coagulante con la turbiedad del agua cruda en PTAP El Dorado en el año 2017.

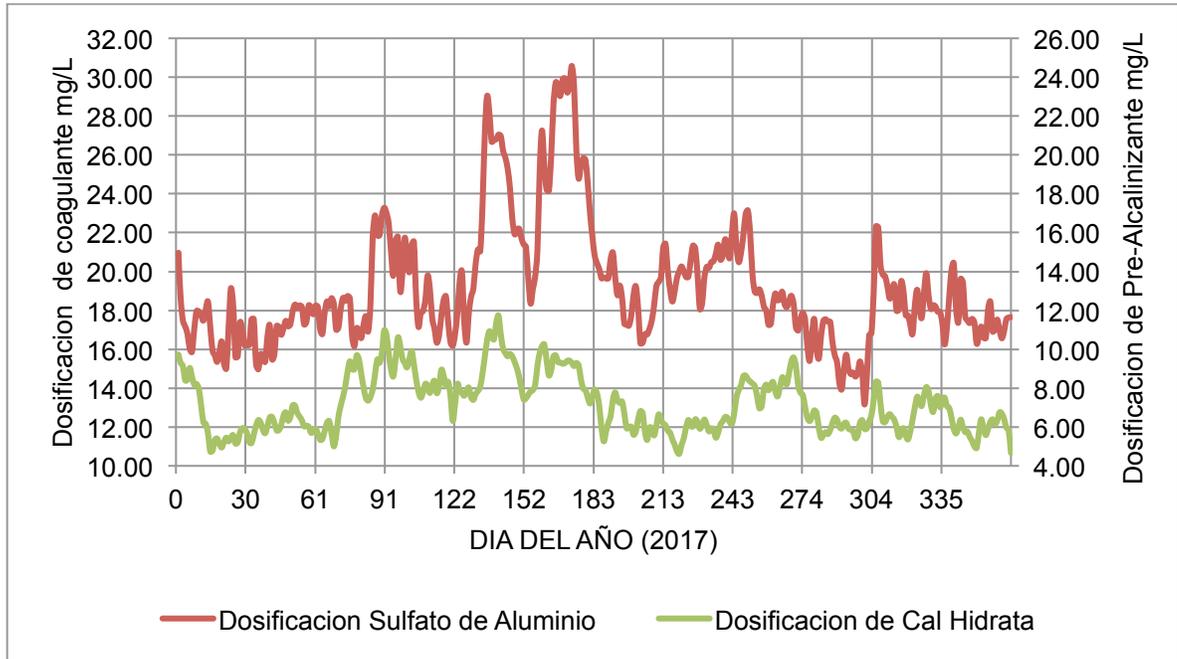


Fuente: elaboración propia.

Se evidencia comportamiento relativamente estable para los primeros y últimos meses del año, donde las turbiedades son bajas y no cambian con los días. Se puede observar que para una turbiedad se puede presentar diferentes concentraciones de dosificación de coagulante.

Otro aspecto a tener en cuenta es la relación de la cantidad de sulfato de aluminio como coagulante y la cantidad de pre-alcalinizante en el transcurso del año. Este análisis se muestra en la **gráfica 16**.

Gráfica 16. Relación de la dosificación de coagulante y pre-alcalinizante en PTAP El Dorado en el año 2017.



Fuente: elaboración propia.

La dosificación de pre-alcalinizante es menor que la dosificación de coagulante; la gráfica nos muestra que existe cierta relación entre el coagulante y el alcalinizante en algunos días del año (primeros 122 días), en cambio, en otros periodos de tiempo (días 151 a 304) se evidencia muy poca relación y proporción de las sustancias debido a que algunos valores de dosificación de cal hidrata iguales tienen diferentes dosificaciones de coagulante sulfato de aluminio por lo que se puede concluir que existe una sobredosificación o un uso excesivo de los medios filtrantes haciendo ineficiente el proceso. En el 91% de las dosificaciones la cantidad de coagulante es mayor o igual que dos veces la cantidad de pre-alcalinizante.

2.5.1 Sobredosificación. La adición de dosis mayores a las frecuentes resulta en la producción de ineficiencias en el agua tratada (mayor gasto económico, cumplimiento regular de la normativa, etc.). La sobredosificación de los compuestos para tratar el agua en la planta no trae consecuencias notables en la calidad del agua a tratar por lo que tienen proceso de respaldo como lo es la filtración pero tiene consecuencias financieras al desperdiciar productos químicos que no reaccionan y sale como sedimentación en los sistemas de drenado de lodos. La sobredosificación se puede presentar por muchos factores los cuales giran en torno a:

- Conocimientos insuficientes en el comportamiento del agua en determinado sector por una composición parcialmente definida.
- Insuficiencia en la velocidad de agitación y tiempo de retención en las etapas del proceso según el diseño estructural de la planta.
- La ineficiencia en los dosificadores en seco por manteamiento o vida útil caducada.
- La constante fluctuación de las características del agua en las épocas del año donde se presenta mayores días con lluvias.
- La tecnología aun en desarrollo para el tratamiento de agua, la cual no se ha definido y cambia según la ubicación.

Los valores de consumo teórico y sobredosificación son una aproximación a las condiciones reales de la planta para el problema de sustitución del coagulante.

2.5.1.1 Sobredosificación de pre-alcalinizante. La dosificación de cal hidrata se puede definir según diferentes rangos de turbiedad del agua cruda teniendo un valor intermedio el cual la planta usa con frecuencia y unos valores de dosificación máximos y mínimos, lo que indica el rango de trabajo para determinada turbiedad. Cabe mencionar que estos datos son históricos; tomados a lo largo del año 2017. Ver **tabla 16**.

Tabla 16. Sobredosificación de cal hidrata en PTAP El Dorado en el año 2017.

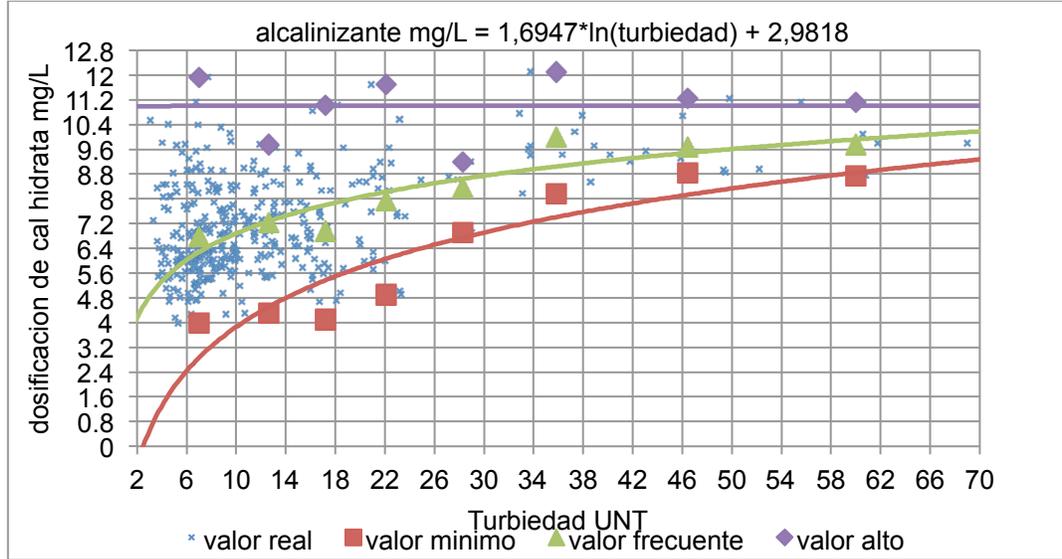
SOBREDOSIFICACION CAL HIDRATA					
RANGO DE TURBIEDAD		VALOR MINIMO CAL HIDRATA	VALOR FRECUENTE CAL HIDRATA	VALOR MAXIMO CAL HIDRATA	TURBIEDAD PROMEDIO
BAJO	ALTO				
2	10	3,98	6,80	11,93	7,01
10	15	4,31	7,24	9,76	12,65
15	20	4,10	6,95	11,02	17,18
20	25	4,90	7,92	11,68	22,08
25	30	6,89	8,36	9,21	28,25
30	40	8,17	9,98	12,10	35,82
40	50	8,85	9,68	11,25	46,47
50	70	8,75	9,75	11,13	60,00

Fuente: elaboración propia.

Para poder cuantificar estas pérdidas se grafica la dosificación del coagulante sulfato de aluminio en función de la turbiedad que presenta el agua a la entrada del proceso, como se muestra en la **gráfica 17**, donde se obtiene una curva de

operación para la dosificación frecuente actual según los rangos de turbiedad de agua cruda planteados en la **tabla 16**.

Gráfica 17. Sobredosificación de cal hidrata en PTAP El Dorado para el año 2017.



Fuente: elaboración propia.

En la **gráfica 17** se muestra una mayor dispersión de los datos en turbiedades bajas de agua cruda (entre 4 y 20 UNT), lo que significa que se presenta menor precisión en la adición de pre-alcalinizante, y un mayor error en la temporada de sequía.

Los datos muestran una tendencia logarítmica, siendo esta la correlación que mejor se ajusta a los datos de frecuencia con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.8271, por lo que se realiza una regresión logarítmica de los límites superior, inferior y del valor frecuente donde arroja la relación de la **ecuación 5**:

Ecuación 5. Dosificación alcalinizante con modelo de regresión logarítmica.

$$\text{Dosificación alcalinizante} \left[\frac{mg}{L} \right] = 1,6947 * \ln(\text{turbiedad}[UNT]) + 2,9818$$

Fuente: elaboración propia.

Esta relación idealizada entre la cantidad de alcalinizante que se debe usar para determinada turbiedad nos brinda valores aproximados que se deben usar frente a los valores reales que se usaron. Los valores encontrados bajo la línea de dosificación frecuente son sub-dosificaciones. Los valores encontrados por encima

de la línea de dosificación frecuente son sobredosificaciones, las cuales generan pérdidas innecesarias de cal hidrata.

Para realizar un análisis de consumo de sulfato de aluminio granula se halla la dosificación teórica según la turbiedad, y con el caudal se halla el consumo teórico en kilogramos y se compara con el total gastado en la planta durante el mes, la cantidad de compuesto químico por encima del ideal se conoce como sobredosificación. Ver **tabla 17**.

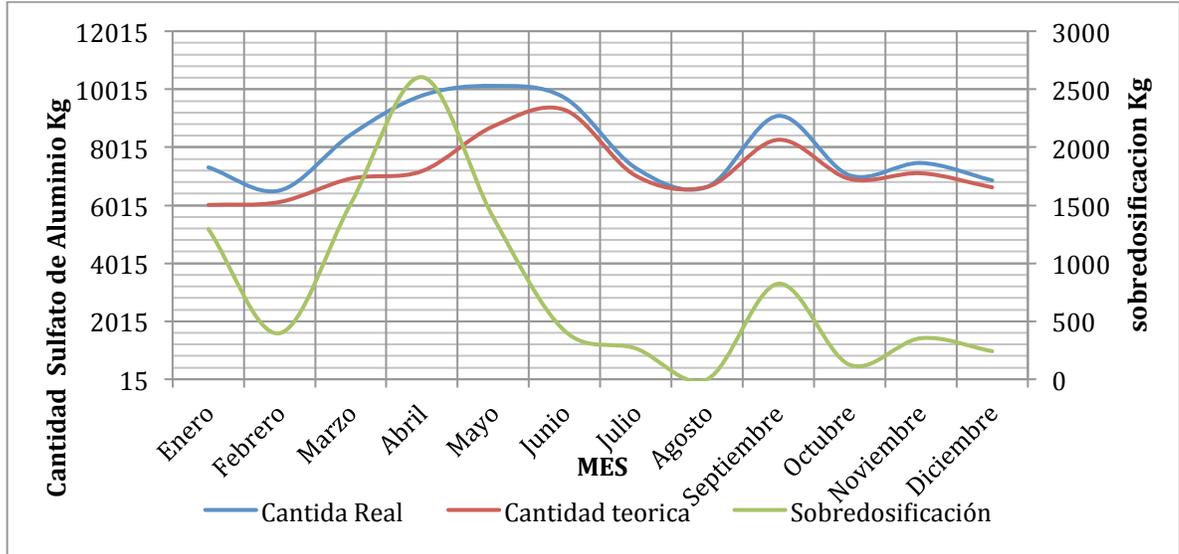
Tabla 17. Sobredosificación de cal hidrata, en Kilogramos, en PTAP El Dorado, año 2017.

MES	Masa de Cal Hidratada por mes		
	Consumo Real	Consumo Teórico	Sobredosificación
Enero	7325,00	6031,69	1293,31
Febrero	6525,00	6128,13	396,87
Marzo	8450,00	6936,51	1513,49
Abril	9800,00	7194,28	2605,72
Mayo	10135,00	8740,12	1394,88
Junio	9725,00	9306,99	418,01
Julio	7300,00	7034,40	265,60
Agosto	6650,00	6650,00	0,00
Septiembre	9100,00	8276,23	823,77
Octubre	7050,00	6925,35	124,65
Noviembre	7475,00	7120,93	354,07
Diciembre	6875,00	6633,18	241,82

Fuente: PTAP EL DORADO. Empresa de Agua, Aseo y Alcantarillado de Bogotá.

De acuerdo a los datos presentados en la **tabla 17**, se presenta en la **gráfica 18** la sobredosificación de cal hidratada en relación con el consumo teórico y real de la misma, para los meses del año 2017.

Gráfica 18. Sobredosificación de cal hidrata, en Kilogramos, en PTAP El Dorado, año 2017.



Fuente: elaboración propia.

El año empieza con casi 1300 Kg de sobredosificación de cal hidrata, la que tiene un pico que desciende y aumenta en el mes de abril con un máximo de sobredosis de cal de 2600 Kg, la que posteriormente desciende hasta no obtener sobredosis en el mes de agosto, en septiembre se incrementa a 820kg y al final de año la sobredosificación se estabiliza en un valor promedio de 30 Kg.

2.5.2 Sobredosificación de coagulante. La dosificación de sulfato de aluminio se puede delimitar según diferentes rangos de turbiedad del agua cruda teniendo un valor intermedio el cual la planta usa con frecuencia y unos valores de dosificación máximos y mínimos, los cuales indican el rango de trabajo para determinada turbiedad. Estos valores fueron obtenidos de los datos históricos del año 2017 de la PTAP El Dorado.

A continuación, se presentan en **la tabla 18** los valores mínimos, frecuentes y máximos para la dosificación de sulfato de aluminio en la planta El Dorado, tomando en cuenta el rango de turbiedad que se presente.

Tabla 18. Sobredosificación de coagulante en PTAP El Dorado.

Sobredosificación sulfato de aluminio					
RANGO DE TURBIEDAD		VALOR MINIMO SULFATO DE ALUMINIO	VALOR FRECUENTE SULFATO DE ALUMINIO	VALOR MAXIMO SULFATO DE ALUMINIO	TURBIEDAD FRECUENTE
BAJO	ALTO				
2	10	9,49	17,49	22,14	5,20
10	15	15,36	18,82	21,28	11,00
15	20	16,73	20,69	23,95	16,00
20	25	18,24	22,27	25,51	21,10
25	30	23,67	24,74	26,42	28,25
30	40	23,15	26,82	30,27	33,70
40	50	25,19	27,62	29,21	46,47
50	70	26,76	29,81	30,37	60,00

Fuente: elaboración propia.

Al igual que para el pre-alcalinizante, para cuantificar estas pérdidas se grafica la dosificación del coagulante sulfato de aluminio en función de la turbiedad que presenta el agua a la entrada del proceso. En la **gráfica 19** se obtienen unos límites mínimos y máximos para los datos históricos de dosificación de coagulante dependiente de la turbiedad, y también una curva de frecuencia de la dosificación de coagulante en los valores de turbiedad de agua cruda representados en la **tabla 18**, resaltando que la adición de coagulante que se realiza actualmente tiene el mismo comportamiento (directamente proporcional) a la adición de pre-alcalinizante, pero no significa que sea el realmente necesario, debido a que existen variables del proceso que no se tuvieron en cuenta para este análisis como la alcalinidad en el agua, el oxígeno disuelto, la carga orgánica y microbiana, los cuales pueden incidir en los resultados.

Al igual que la adición de pre-alcalinizante, la dosificación de coagulante presenta complicación de control en turbiedades de agua cruda menores a 20 UNT, con una mayor dispersión de los datos con respecto al dato frecuente, obtenidos en los meses con menor días de lluvia.

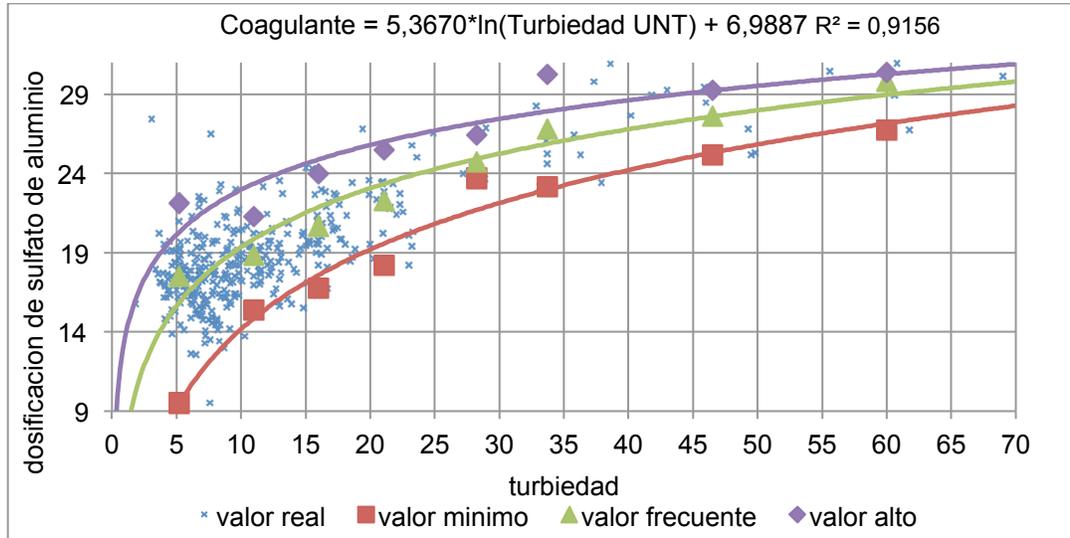
Los datos muestran una tendencia logarítmica, siendo esta la mejor representación de los datos de dosificación frecuente de coagulante con respecto a la turbiedad del agua cruda, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.9156, arrojando la relación de la **ecuación 6**:

Ecuación 6. Dosificación de coagulante con modelo de regresión logarítmica.

$$\text{Dosificación Coagulante} \left[\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right] = 5,3670 * \ln(\text{turbiedad}[\text{UNT}]) + 6,9887$$

Fuente: elaboración propia.

Gráfica 19. Sobredosificación de coagulante en PTAP El Dorado.



Fuente: elaboración propia.

Esta relación idealizada entre la cantidad de alcalinizante que se debe usar para determinada turbiedad nos brinda valores aproximados que se deben usar frente a los valores reales que se usaron. Los valores encontrados bajo la línea de dosificación frecuente son sub-dosificaciones, donde la coagulación, floculación y sedimentación no se logró con mayor eficiencia por lo que probablemente se verán apoyadas con un mayor uso y desgaste de los filtros, generando periodos más frecuentes de mantenimiento y posibles pérdidas en el lavado de filtros. Los valores encontrados por encima de la línea de dosificación frecuente son sobredosificaciones, las cuales generan pérdidas innecesarias de sulfato de aluminio.

Para realizar un análisis de consumo de sulfato de aluminio granula se halla la dosificación teórica según la turbiedad, y con el caudal se halla el consumo teórico en kilogramos y se compara con el total gastado en la planta durante el mes, hallando la sobredosificación. Ver **tabla 19**.

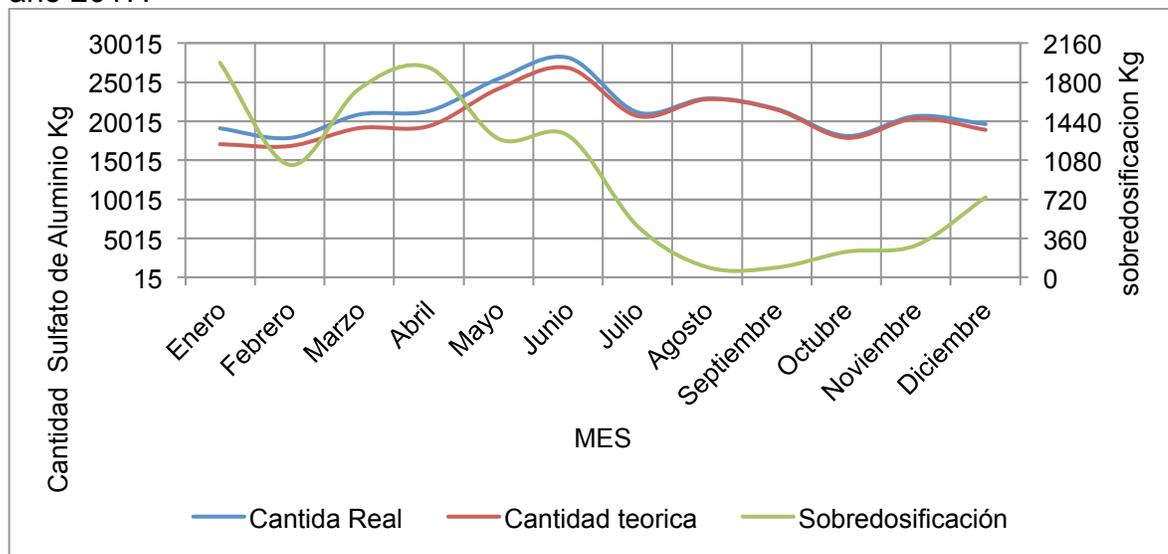
Tabla 19. Sobredosificación de coagulante, en Kilogramos, en PTAP El Dorado, año 2017.

MES	Masa de Cal Hidratada por mes		
	Consumo Real	Consumo Teórico	Sobredosificación
Enero	19075,00	17097,27	1977,73
Febrero	17875,00	16837,35	1037,65
Marzo	20875,00	19135,79	1739,21
Abril	21325,00	19390,39	1934,61
Mayo	25450,00	24170,92	1279,08
Junio	28150,00	26841,87	1308,13
Julio	21150,00	20678,25	471,75
Agosto	22925,00	22830,16	94,84
Septiembre	21575,00	21483,86	91,14
Octubre	18125,00	17888,46	236,54
Noviembre	20670,00	20374,55	295,45
Diciembre	19650,00	18911,73	738,27

Fuente: PTAP EL DORADO. Empresa de Agua, Aseo y Alcantarillado de Bogotá.

En la **gráfica 20**, se presenta la sobredosificación de coagulante en relación con el consumo teórico y real del mismo para los meses del año 2017.

Gráfica 20. Sobredosificación de coagulante, en Kilogramos, en PTAP El Dorado, año 2017.



Fuente: elaboración propia.

Existen altas sobredosificaciones para los primeros meses del año, cercano a los 2000 Kilogramos al mes y luego desciende para los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre con valores entre 300 y 100 kilogramos mes, para terminar el año con una sobredosis en el mes de diciembre de 740 kilogramos.

2.5.3 Relación entre la concentración de coagulante y pre- alcalinizante. Al tomar la función entre el pre–alcalinizante y coagulante con la turbiedad, se puede crear una relación entre la concentración ideal de cal hidrata según la concentración de sulfato de aluminio que se quiera aplicar y esta expresada de la siguiente forma en la **ecuación 7**:

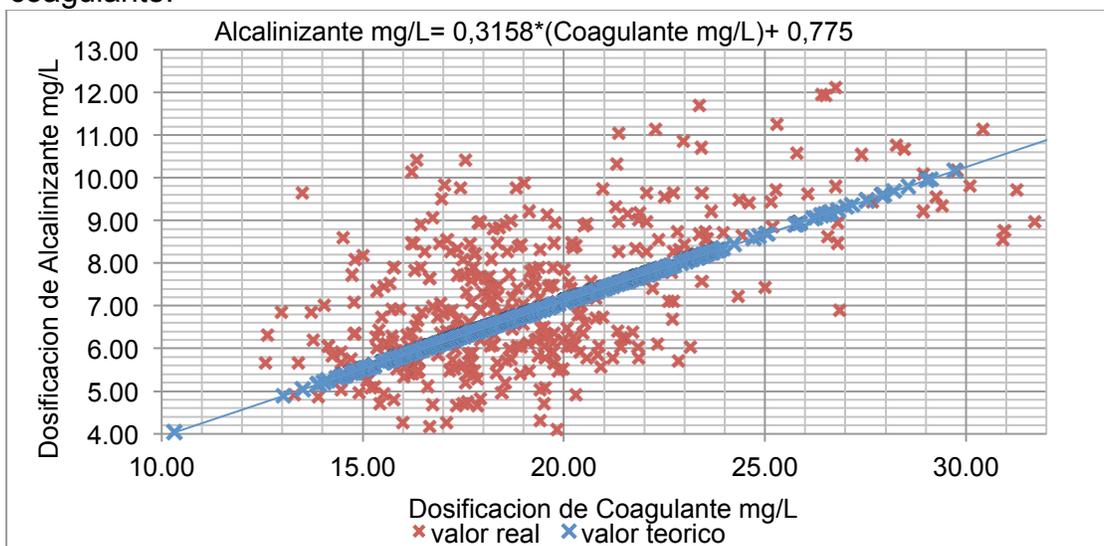
Ecuación 7. Relación dependiente de la concentración del pre-alcalinizante con respecto a la concentración del coagulante.

$$\text{concent. Alcalinizante} \left[\frac{mg}{L} \right] = 0,3158 * (\text{concent. Coagulante} \left[\frac{mg}{L} \right]) + 0,775$$

Fuente: elaboración propia.

La variación de la expresión obtenida con los datos reales fija una relación directamente proporcional entre la dosificación de pre-alcalinizante y coagulante. Los datos reales difieren de los teóricos por sobredosificación, sub-dosificación y por las características fisicoquímicas presentes en el agua, las cuales hacen que la variables del proceso aumente junto a su complejidad.

Gráfica 21. Relación de valor real y valor teórico de dosificación de coagulante.



Fuente: elaboración propia.

La **gráfica 21** muestra la relación directamente proporcional que existe entre la dosificación de pre-alcalinizante y coagulante; la línea recta azul representa los valores obtenidos de la relación del pre-alcalinizante y el coagulante en función dependiente de la turbiedad de agua cruda, y los datos en color rojo representan el valor real (obtenidos de los datos históricos del año 2017). Como se mencionó anteriormente la relación entre el pre-alcalinizante y el coagulante no es necesariamente proporcional y lineal, pero la planta mantiene su operación siguiendo este criterio, el cual se relacionará con los datos experimentales en el *test* de jarras para reiterar o desmentir esta afirmación.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este capítulo se muestra el desarrollo experimental que se llevó a cabo a nivel laboratorio y a nivel planta piloto, para determinar la viabilidad técnica de sustituir el coagulante utilizado actualmente (sulfato de aluminio granular) en el proceso de potabilización de agua en la planta El Dorado. Además se exponen los resultados obtenidos mediante tablas y gráficos, y se dan conclusiones al respecto.

3.1 DESARROLLO EXPERIMENTAL A NIVEL LABORATORIO

Los coagulantes son productos químicos utilizados en la industria de tratamiento de aguas, para lograr una disminución de la turbiedad (remoción de coloides, sólidos, etc.) mediante el proceso de coagulación-floculación que ocurre con la adición de esta sustancia.

Debido a que la PTAP El Dorado lleva a cabo el proceso de potabilización utilizando sulfato de aluminio granular como sustancia coagulante, se requiere llevar a cabo una experimentación para implementar el cambio de esta sustancia debido a las pérdidas monetarias y de tiempo que está sufriendo la empresa a causa de la dilución exhaustiva que se debe hacer de los gránulos y las grandes cantidades de sobredosificación que se evidencian en el **capítulo 3** de este documento.

3.1.1 Alternativas de sustancias coagulantes. A continuación se realiza una descripción de los diferentes coagulantes con los que se llevará a cabo la experimentación para este proyecto, presentando sus características químicas, físicas, ventajas y desventajas en el proceso de potabilización de agua.

3.1.1.1 Sulfato de aluminio. El sulfato de aluminio es una sal ácida, cuya fórmula química es $Al_2(SO_4)_3 - 18H_2O$, obtenida generalmente por la reacción entre el ácido sulfúrico y una materia prima rica en aluminio como el hidróxido de aluminio, o la bauxita. Este es un coagulante cuyo fin principal es el tratamiento de aguas para consumo humano y residual, el cual, mediante la remoción de sólidos presentes en el fluido, ayuda a regular características como color, turbiedad y sabor³⁷.

³⁷ QUINSA, QUÍMICA INTEGRADA S.A. Sulfato de Aluminio Granulado Tipo B. [En línea]. < <http://quinsa.com.co/modulos/pagina/vista/producto/index.php?id=7> >

En la actualidad, el sulfato de aluminio se utiliza predominantemente en la industria de tratamiento de aguas, considerándose como un coagulante convencional, pero tiene usos en el encolado de papel, como mordiente en tintorerías, entre otros. La industria papelera requiere en mayor parte el sulfato de aluminio libre de hierro como encolante en método ácido. El sulfato de aluminio, o también conocido comercialmente como “alumbre”, es el coagulante de más bajo costo en el mercado, y su manejo es bastante sencillo, debido a esto es el más utilizado en la industria³⁸.

Actualmente se comercializan 2 tipos de sulfato de aluminio; tipo A y tipo B, ambos en presentaciones líquido y sólido (granular), cuyas diferencias se basan en el color, el porcentaje de Al_2O_3 , hierro (Fe_2O_3), basicidad y material insoluble presente en estos.

- **Sulfato de aluminio granular.** Por ser un producto higroscópico es empacado en sacos de polipropileno con laminado interno, estos deben ser almacenado en bodegas cerradas sobre estibas plásticas o de madera, protegido de humedad. Este coagulante se destaca en clarificación para condiciones de baja y mediana turbiedad (hasta 1000 NTU aproximadamente)³⁹. La planta El Dorado utiliza en su proceso, el sulfato de aluminio granular tipo B, cuyas características se muestran en la **tabla 20**.

Previo a la utilización de este coagulante en el proceso de potabilización de agua, es necesario realizar una homogeneización mediante agitación continua en un tanque para evitar la sedimentación de los gránulos y garantizar la correcta absorción de la sustancia en el agua a tratar. Cabe resaltar que con ningún tipo de agitación se garantiza el 100 % de disolución del coagulante en el agua, por esta razón una parte del sulfato de aluminio sedimenta al fondo de las canaletas, los tanques y las tuberías del proceso, generando taponamientos y mayor cantidad de lodos con alto contenido de alúmina.

³⁸ DISTRIBUIDORA ALIADOS LTDA. Ficha técnica del sulfato de aluminio. [en línea]. < <http://www.distribuidoraaliados.com/portfolio-items/sulfato-de-aluminio-granulado-liquido/> >

³⁹ QUINSA, QUÍMICA INTEGRADA S.A. Sulfato de Aluminio Granulado Tipo B. Ficha Técnica. [En línea]. < <http://quinsa.com.co/modulos/pagina/vista/producto/index.php?id=7> >

Tabla 20. Características del sulfato de aluminio granular tipo B en la empresa PQP S.A.

Parámetro	Especificación
Presentación	Granulado, bultos de 25 Kg, color amarillo/café.
Contenido de Al ₂ O ₃	14.2 % mínimo
Contenido de hierro Fe ₂ O ₃	2.0 % máximo
Material insoluble	8.0 % máximo
Basicidad	0.05 % mínimo

Fuente: ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA S.A. E.S.P. Invitación a cotizar No. Amb-015-07 suministro de sulfato de aluminio tipo B granular y líquido. [en línea]. <<http://www.amb.com.co/docs/contratos/Informe%20de%20Evaluaci%C3%B3n%20amb-015-07.pdf>>

- **Sulfato de aluminio en solución.** El sulfato de aluminio en solución, o también llamado líquido, se despacha en isotanques, tambores plásticos, garrafas y a granel. Este coagulante se destaca en clarificación de agua para turbiedades bajas (hasta 400 NTU aproximadamente), es necesario tener como lugar de almacenamiento tanques de fibra de vidrio, polietileno, polipropileno, garrafas o contenedores de plástico.

Este tipo de coagulante, a diferencia del coagulante granular, no debe ser homogeneizado previamente, lo que genera un ahorro en la energía total y el tiempo necesario para llevar a cabo el proceso de potabilización, además, mediante la implementación de este, se eliminan los residuos que quedan debido a los gránulos que no fueron disueltos en totalidad (siempre hay un porcentaje de coagulante granular que no se disuelve) y que afectan tanto equipos como tuberías y tanques a lo largo del proceso. En la **tabla 21** se describen sus especificaciones.

Tabla 21. Características del sulfato de aluminio líquido tipo B en la empresa PQP S.A.

Parámetro	Especificación
Densidad	1.31 – 1.34 g/mL
Contenido de Al ₂ O ₃	7.3 % mínimo
Contenido de hierro Fe ₂ O ₃	1.2 % máximo
Material insoluble	0.1 % máximo
Color	Café - ámbar

Fuente: ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA S.A. E.S.P. Invitación a cotizar No. Amb-015-07 suministro de sulfato de aluminio tipo B granular y líquido. [en línea]. <<http://www.amb.com.co/docs/contratos/Informe%20de%20Evaluaci%C3%B3n%20amb-015-07.pdf>>

3.1.1.2 Hidroxicloruro de aluminio (PAC). El hidroxicloruro de aluminio, también llamado policloruro de aluminio, o PAC, es un polinuclear de aluminio líquido, que se desempeña efectivamente como coagulante inorgánico para aguas potables y residuales, cuya fórmula química es $Al_2(OH)_5Cl_2 \cdot 5H_2O$.

Este coagulante es conocido como “coagulante alternativo” debido a su comportamiento distintivo de los coagulantes convencionales (sulfato de aluminio); el PAC tiene diferentes fases sólidas en las reacciones hidrolíticas, los flóculos que se generan con este tienden a ser grupos de pequeñas esferas y/o estructuras tipo cadena con tamaño menor a 25 mm, mientras que los flóculos de sulfato de aluminio tienden a presentar un mayor tamaño (entre 25 y 100 mm) pero con estructuras esponjosas y porosas, lo que genera una menor velocidad de sedimentación y un *floc* menos pesado⁴⁰.

Algunas de las ventajas que tiene el uso de esta sustancia como coagulante es que no altera el pH del sistema por tanto no es necesario agregar grandes cantidades de cal (lo que si es necesario con el uso de sulfato de aluminio), genera baja cantidad de lodos a una alta velocidad de sedimentación, es fácil de dosificar, económico y altamente efectivo con dosis muy bajas.

Al observar la **tabla 22** se puede considerar que un PAC es más eficiente que el sulfato de aluminio debido a su mayor capacidad de remoción de sólidos suspendidos y su necesidad de menos dosis; dependiendo del tipo de agua que se quiera tratar, el PAC puede sustituir de 1.5 a 2 partes de sulfato de aluminio tipo A, y de 3.5 a 3.9 de sulfato de aluminio tipo B⁴¹.

⁴⁰ COGOLLO FLÓREZ, Juan Miguel. Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxicloruro de aluminio. Medellín: Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, 2010. Disponible en: <<https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25636/39133>>

⁴¹ COGOLLO FLÓREZ, Juan Miguel. Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxicloruro de aluminio. Medellín: Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, 2010. Disponible en: <<https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25636/39133>>

Tabla 22. Comparación de algunos criterios básicos entre sulfato de aluminio y PAC.

Criterio	Sulfato de Aluminio	PAC
Temperatura	La temperatura afecta la hidrólisis y, por ende, la producción de complejos hidroxilos cargados positivamente esenciales para la coagulación.	Menor efecto de la temperatura debido a la presencia de formas de aluminio prepolimerizadas.
pH	El rango de pH controla cuál especie de hidroxilo de aluminio se produce.	Se espera menos impacto del pH debido a la presencia de formas de aluminio prepolimerizadas.
Especie de aluminio	La mayoría de especies de aluminio son complejos hidroxilo monoméricos con una carga catiónica de $+1$ a $+3$.	Presencia de formas de aluminio monoméricas y poliméricas.
Cinética	Más lenta.	Más rápida.

Fuente: ZOUBOULIS, A., TRASKAS, G. Y SAMARAS, P. Comparison of efficiency between poly-aluminum chloride and aluminum sulphate coagulants during full-scale experiments in a drinking water treatment plant. Separation Science and Technology, 43 (6), 1507-1519, 2008.

El hidroxiclورو de aluminio se presenta comercialmente como un líquido ligeramente viscoso de color ámbar claro, presenta una gran ventaja debido a su fácil manejo y dosificación sin dejar residuos insolubles indeseados, a diferencia del sulfato de aluminio granular, el cual debe disolverse previamente y deja residuos que dañan tanto los equipos dosificadores como las tuberías por donde se transporta el agua que se trata a lo largo del proceso. Este coagulante tiene un pH óptimo de funcionamiento entre 5.0 y 9.0 dependiendo del contenido de carbono orgánico disuelto en el agua⁴².

3.1.2 Metodología. A continuación se describe la metodología empleada para llevar a cabo la experimentación a nivel laboratorio; se muestran los parámetros más relevantes en la coagulación-floculación y la manera en que se llevó a cabo el desarrollo de este proyecto.

⁴² COGOLLO FLÓREZ, Juan Miguel. Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclورو de aluminio. Medellín: Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, 2010. Disponible en: <<https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25636/39133>>

3.1.2.1 Parámetros físico-químicos que influyen en el proceso de coagulación-floculación. Existen distintos parámetros físico-químicos del agua que influyen en el proceso de coagulación y floculación, los cuales se deben tener en cuenta al momento de generar una optimización del proceso. Estos parámetros son de gran importancia para la determinación de la dosis óptima de coagulante que debe agregarse al agua para llevar a cabo una correcta coagulación, floculación y posterior sedimentación.

Las características y factores que se tuvieron en cuenta para llevar a cabo la experimentación de este trabajo de grado son:

- pH
- Turbiedad
- Color
- Alcalinidad
- Temperatura del agua
- Condiciones de mezcla

Destacando la turbiedad y el pH como las variables críticas para una correcta selección de la dosis y tipo de coagulante.

- **Influencia del pH.** El pH es una medida de la actividad del ion hidrógeno en una solución. Esta es una de las variables más importantes en el proceso de coagulación debido a que cada uno de los coagulantes tiene un rango de pH óptimo, en el cual es capaz de generar grandes cantidades de *floc* con un velocidad de coagulación alta. Si el proceso se realiza por fuera del rango óptimo de pH, la cantidad de coagulante que se debe agregar debe ser mayor, generando gastos extra en producto y costos. Por esta razón, las unidades de pH fueron medidas durante la experimentación tanto en el agua cruda como en el agua clarificada (después de ocurrida floculación).

Durante la experimentación los valores de pH se determinaron con ayuda de un pHmetro digital.

- **Influencia de la Turbiedad.** La turbiedad es una forma indirecta de medir la concentración de las partículas suspendidas en el líquido; esta mide el efecto de la dispersión que las partículas presentan al paso de luz y, en el caso de la potabilización de agua, presenta una relación directa con el color del fluido debido a que es capaz de mostrar el nivel de contaminación presente.

Al analizar la variación de la concentración de las partículas suspendidas en el agua, se puede determinar que para cada turbiedad de agua cruda existe una determinada cantidad de coagulante (dosis óptima), con la cual se debe obtener una turbiedad más baja. Por estas razones, la turbiedad se estableció como el

parámetro de mayor importancia al momento de determinar la dosis óptima de coagulante.

A lo largo de la experimentación, las UNT se determinaron con el uso de un turbidímetro HACH 2100N.

- **Influencia del Color.** El color, se puede decir, está relacionado en gran parte con la turbiedad del agua, ya que las partículas coloidales cargadas negativamente aportan color al agua y adicionalmente su remoción puede lograrse por medio de un agente coagulante. Además, el color evidencia la presencia de partículas sólidas de tamaño coloidal y de naturaleza química, orgánica e inorgánica.

Se pueden distinguir dos formas de expresar el color: color aparente y color verdadero, siendo el primero el que se determina en la muestra original, y el último el que se determina después de haber sido removida la turbiedad⁴³.

Durante la experimentación, el color se midió utilizando un colorímetro digital.

- **Influencia de la alcalinidad.** Se entiende como alcalinidad, la capacidad que tiene el agua de neutralizar los ácidos, esta es producida por la presencia en el agua de los iones OH^- (hidroxilo), HCO_3^- (bicarbonato) y $\text{CO}_3^{=}$ (carbonato) y se expresa en mg/L como CaCO_3 .

La alcalinidad del agua puede ser considerada como un parámetro importante al momento de realizar el proceso de coagulación debido a que teóricamente, el coagulante utilizado reacciona con los agentes alcalinos para favorecer la reacción de desestabilización de las partículas y formar el *floc*.

Para determinar la alcalinidad durante la experimentación se realizaron titulaciones con ácido sulfúrico (0.02 N) y fenolftaleína.

- **Influencia de la temperatura del agua.** Este parámetro se considera de gran importancia en la experimentación debido a que el cambio en 1°C en la temperatura del agua lleva a la variación de la densidad de esta, lo cual afecta la energía cinética de las partículas en suspensión, por lo que la coagulación se hace más lenta; temperaturas muy elevadas desfavorecen igualmente a la coagulación⁴⁴.

Para llevar a cabo la medición de la temperatura en las muestras de la experimentación se utilizó la función complementaria de un pHmetro digital.

⁴³ RODRIGUEZ PEÑA, Carlos. Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de agua. Bogotá D.C.: Santafé de Bogotá: Universidad distrital, 1995.

⁴⁴ ANDÍA CÁRDENAS, Yolanda. Tratamiento de agua: Coagulación y floculación. Lima: Sedapal, 2000. Disponible en: <http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154>

- **Influencia de las condiciones de mezcla.** Debido a que el grado de agitación que se le da a la mezcla determina la correcta o incorrecta acción del coagulante, se debe resaltar como un parámetro importante en el proceso. Si se realiza un mezclado desigual, la distribución del coagulante será uniforme, lo que genera una concentración mayor de este en ciertos puntos, y otros con menor concentración (poco o casi nada). Por esta razón, en las pruebas realizadas en el laboratorio se manejan las mismas velocidades de agitación, haciendo un tipo de réplica con las agitaciones que se realizan en la planta real.

3.1.2.2 Prueba de Jarras. La prueba de jarras, o también conocida como *test de jarras*, es la principal prueba que se realiza a nivel laboratorio para simular los procesos de coagulación, floculación y sedimentación que se llevan a cabo en el tratamiento de agua (ya sea potable o residual). Esta prueba permite determinar la dosis óptima de coagulante que debe ser agregado al agua que se desee tratar teniendo en cuenta las características del agua cruda que entra al proceso.

Para fines de practicidad, se explicará de manera general la metodología de este procedimiento para determinar la dosis óptima de coagulante en la potabilización de agua. El instructivo del proceso completo y detallado se encuentra al final de este documento como **ANEXO 88**, el cual fue proporcionado por la PTAP El Dorado, perteneciente a la empresa de Acueducto, Agua y Alcantarillado de Bogotá.

- **Terminología.** El equipo principal para esta prueba se denomina *Equipo de jarras*, el cual es un equipo dotado de seis paletas de agitación con rotor de velocidad variable utilizado para realizar ensayos de simulación de tratamiento de aguas.

La *mezcla rápida* es el proceso por medio del cual se logra una rápida reacción entre el coagulante y el agua a tratar.

La *mezcla lenta* se puede definir como la manera en la cual se permite la formación del *floc* por interacción química entre el coagulante y los diferentes elementos presentes en el agua que se desean eliminar (partículas en suspensión productoras de color y turbiedad).

- **Equipos, instrumentos y materiales.**
 - Equipo de jarras provisto de seis agitadores y tacómetro variable de 0 – 120 RPM.
 - Vasos Hudson de 2L con salida frontal para muestreo o en su defecto vasos de precipitados de 1L.
 - Balones volumétricos de 1L.
 - Jeringas de 5 mL graduadas.

- Balanza
- Pipetas graduadas de 25, 10, 5 y 1 mL.

Reactivos necesarios:

- Solución de coagulante (sulfato de aluminio granular, líquido e hidroxiclورو de aluminio). Se prepara la solución dependiendo de la concentración (en partes por millón) que se requiera.
- Solución de cal hidrata al 0.5 %. Se prepara la solución dependiendo de la concentración (en partes por millón) que se requiera.

- **Desarrollo.** Como primer paso, es necesario realizar la caracterización del agua cruda a la cual se le va a realizar el tratamiento; se midieron los parámetros de turbiedad, color, pH, alcalinidad y temperatura a la muestra de agua. Con ayuda de estos parámetros y un análisis de la muestra, se deciden las dosificaciones de cal hidrata (pre alcalinizante) y de coagulante con las que se deba realizar la prueba.

Se toma 1 litro de agua cruda en cada uno de los *beakers* (seis en total) y se aplica la dosificación determinada de alcalinizante. Se agita para que se mezcle perfectamente.

Se colocan los vasos en su posición en el equipo de jarras tal como se muestra en la **figura 25**, cada uno con su agitador y se prende el equipo regulando el tacómetro a 100 RPM (simula la agitación que ocurre en la planta real).

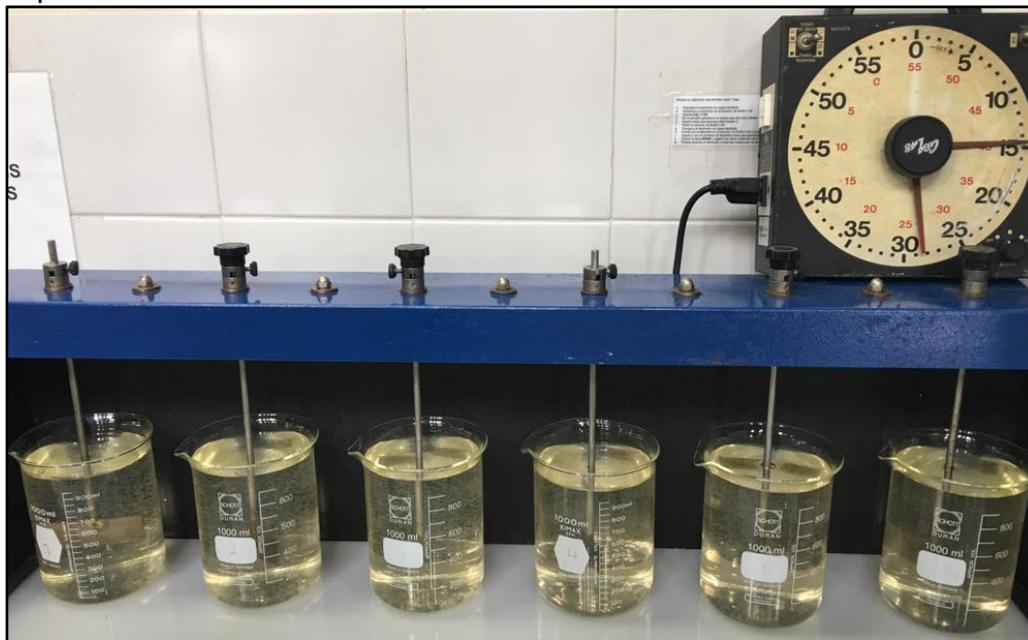
Una vez regulado el tacómetro se aplica el coagulante en los vasos; debe ser agregado en el mismo instante a todos los vasos, en el centro, lo más cercano posible a la superficie del líquido. Con ayuda de un cronómetro se miden 60 segundos de agitación a 100 RPM, y al cabo de este tiempo se ajusta a 40 RPM (mezcla lenta). Se cronometran 19 minutos de agitación.

Una vez transcurrido el tiempo de agitación de mezcla lenta, se ajusta el tacómetro hasta eliminar completamente la agitación y se cronometran 20 minutos más para la sedimentación.

Una vez terminado el tiempo, se toman aproximadamente 100 mL de muestra de cada uno de los vasos teniendo como precaución no agitar el fluido.

Debido a que este proyecto se enfoca en las operaciones de coagulación y floculación, la muestra se caracteriza inmediatamente termina el tiempo de sedimentación. No se realiza el proceso de filtrado.

Figura 25. Equipo de Jarras proporcionado por la plata El Dorado para experimentación.



Fuente: elaboración propia.

3.1.2.3 Experimentación previa. En esta etapa se realizó un evaluación del agua cruda y sus características más relevantes para determinar el efecto de las diferentes dosis de coagulante y pre-alcalinizante en el proceso, y así encontrar los rangos de dosificación adecuados.

Se realizó un ensayo de jarras para cada uno de los coagulantes con grandes rangos de dosificaciones determinados con los datos históricos de la planta; se evaluaron parámetros como turbiedad, color, pH, alcalinidad y temperatura, y de acuerdo a esto se determinó con los datos históricos la cantidad de coagulante que podría funcionar para el tratamiento. El experimento se realizó con cantidades mayores y menores a las determinadas por la PTAP El Dorado en los momentos de operación a lo largo del año para garantizar un rango amplio y completo.

Según esta experimentación previa se determinó un rango de operación promedio que consisten en: de 0 a 10 mg/L de cal hidrata y de 4 a 55 mg/L de coagulante. Estos rangos varían dependiendo de la turbiedad del agua cruda y del tipo de coagulante.

Previo a la experimentación se debe tener en cuenta que:

- La turbiedad, pH, temperatura, color y alcalinidad del agua cruda que ingresa a la planta El Dorado, varían con el clima, y las horas del día como se muestra en el **capítulo 2** de este documento.
- La experimentación con prueba de jarras se realizó durante los meses de marzo y abril del año 2018; teniendo turbiedades bajas (4 – 5 UNT) en el mes de marzo y turbiedades más altas (10 – 30 UNT) en el mes de abril. Debido a esto se realizaron pruebas en turbiedades bajas y altas con cada uno de los coagulantes.
- No existe hasta el momento ninguna formulación teórica que permita calcular o determinar la dosis de los coagulantes y de otras sustancias químicas que deban adicionarse al agua para obtener un resultado deseado. Por esta razón la dosificación debe determinarse de manera experimental.
- Cabe resaltar que no es posible controlar la turbiedad del agua cruda debido a que al agregar material sólido extra al agua (lodo, arena, colorantes, etc.) se cambian por completo características como pH, color, alcalinidad, e incluso temperatura, lo que daría como resultado una experimentación poco confiable para la PTAP El Dorado, pues se estarían determinando dosis de coagulante y alcalinizante para un agua diferente a la que ingresa al proceso de la planta.

3.1.2.4 Experimentación. A continuación se muestran tabulados los resultados obtenidos en la prueba de jarras con cada uno de los coagulantes propuestos y el coagulante actual de la planta El Dorado, además se muestran también de manera gráfica los resultados de turbiedad en función de la dosificación de coagulante. Los resultados de las réplicas y las características del agua cruda para todos los experimentos se muestran en el **anexo D**.

Se resaltan los resultados que cumplen con la norma clarificada utilizando menor cantidad tanto de pre-alcalinizante como de coagulante. En algunos casos se obtuvieron, por ejemplo, buenos resultados con menor cantidad de coagulante pero mayor cantidad de cal; estos resultados también se tendrán en cuenta a la hora de evaluar los costos totales del proceso.

A continuación se muestra en la **figura 26** el proceso de floculación, en la **figura 27** el proceso de sedimentación y en la **figura 28** el agua ya clarificada en el ensayo de jarras realizado en la PTAP El Dorado.

Figura 26. Ensayo de jarras en el proceso de floculación.



Fuente: elaboración propia.

Figura 27. Ensayo de jarras en el proceso de sedimentación.



Fuente: elaboración propia.

Figura 28. Agua clarificada.



Fuente: elaboración propia.

En las **tablas 23 y 24** se muestran los datos obtenidos mediante la prueba de jarras para el sulfato de aluminio granular como coagulante, en turbiedades bajas (3.6 – 4.89 UNT) y en turbiedades altas (15 – 23.5 UNT), respectivamente. Se realizaron variaciones en la cantidad de cal hidrata y la dosis de sulfato de aluminio granular teniendo en cuenta principalmente la turbiedad y el pH del agua cruda y clarificada.

Tabla 23. Resultados de prueba de jarras con sulfato de aluminio granular en turbiedades bajas (3.6 – 4.89 UNT) de agua cruda.

Cal hidrata (mg/L)	S.A.g (mg/L)	Turbiedad (UNT)	pH (UpH)	Color	Alcalinidad	Temperatura (°C)
0	6	3.25	4.9	14.7	2.1	14.4
	8	3.53	4.76	17.0	3.3	14.4
	10	3.37	4.72	15.2	3	14.2
	12	3.86	4.68	18.6	3.7	14.4
	14	3.61	4.68	17.4	3.5	14.5
	16	2.69	4.64	13.0	1.7	14.4
	18	2.35	4.58	11.3	2.3	14.3
2	6	2.16	4.46	10.1	3.1	14.2
	8	1.28	4.9	5.7	2	14.4
	10	1.25	4.76	5.6	3	14.4
	12	1.19	4.72	5.3	3	14.2

Tabla 23. (Continuación).

Cal hidrata (mg/L)	S.A.g (mg/L)	Turbiedad (UNT)	pH (UpH)	Color	Alcalinidad	Temperatura (°C)
2	14	1.22	4.68	5.4	3.3	14.4
	16	1.31	4.68	5.8	2.5	14.5
	18	1.47	4.64	7.6	3.4	14.4
4	4	1.92*	4.12	7.2	3.9	15
	6	1.34	4.98	5.3	3.1	14.8
	8	1.12	4.77	5.0	2.6	14.9
	10	1.27	4.64	5.7	2.2	14.7
	12	1.3	4.63	5.8	3	14.9
	14	1.31	4.64	5.8	2	14.9
	16	1.42	4.6	7.3	4	14.9
	18	1.37	4.6	7.1	3.3	14.1
6	4	1.82	4.04	9.4	3.5	14.6
	6	1.63	4.97	8.2	3.7	14.4
	8	1.4	4.86	7.2	2	14.6
	10	1.81	4.71	9.4	3	14.4
	12	1.57	4.63	8.1	2.5	14.7
	14	1.2	4.59	5.4	3	14.6
	16	1.48	4.54	7.6	4.2	14.6
	18	1.09	4.56	4.9	2.7	14.5
8	4	1.48	4.24	7.6	3.9	14.9
	6	1.62	4.18	8.1	4	14.9
	8	1.41	4.12	7.3	3.7	14.9
	10	1.72	4.03	8.9	3.2	14.5
	12	1.6	4.92	8.2	3	14.9
	14	1.1	4.81	5.0	2.1	14.7
	16	1.32	4.76	5.9	2.9	14.8
	18	1.21	4.69	5.4	3.6	14.6
10	4	1.66	4.22	8.5	2	14.9
	6	1.5	4.97	7.7	2.4	14.9
	8	1.52	4.86	7.8	2.8	14.1
	10	1.37	4.76	7.1	3.2	15
	12	1.49	4.69	7.7	3.5	14.8
	14	1.78	4.62	9.2	3.8	14.9
	16	1.69	4.55	8.7	1.7	14.1

*En los resultados de la réplica se obtuvo un valor superior a 2 UNT.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 24. Resultados de prueba de jarras con sulfato de aluminio granular en turbiedades altas (15 – 23.5 UNT) de agua cruda.

Cal hidrata (mg/L)	S.A.g (mg/L)	Turbiedad (UNT)	pH (UpH)	Color	Alcalinidad	Temperatura (°C)
0	16	3.58	4.27	17.2	4.2	14.5
	22	2.66	4.06	12.8	4	14.4
	26	2.45	4.01	11.8	3.1	14.5
	30	2.65	4.95	12.8	3	14.6
	34	2.3	4.94	11.2	2.6	14.3
	36	2.3	4.81	10.5	2	14.6
2	14	12.5	4.72	27.6	4.7	14.4
	18	2.23	4.61	11.4	4.6	14.5
	20	1.88	4.9	9.8	5	14.4
	22	1.78	4.17	9.2	3.8	14.4
	24	1.63	4.12	8.4	3.3	14.6
	26	1.61	4.11	8.3	2.9	14.6
	28	1.61	4.08	8.3	2.7	14.8
4	18	1.92	5.21	9.1	5	14.6
	20	1.34	5.17	5.5	4.4	14.7
	22	1.23	4.73	4.9	4.5	14.7
	24	1.2	4.65	4.8	4.4	14.4
	26	1.03	4.44	4.0	4.4	14.7
	28	1.07	4.27	4.2	4.4	14.6
	30	1.06	4.24	4.1	3.7	14.8
6	12	24.2	5.68	58.6	10.8	14.7
	16	24.5	5.67	59.3	9.9	14.7
	20	4.82	5.45	11.2	4.8	14.5
	22	1.65	5.21	8.5	4.9	15.6
	26	1.2	4.74	5.4	4.2	16
	28	1.33	4.54	5.8	5	14.7
	30	1.4	4.3	7.2	3.8	15.2
8	20	3.51	4.99	8.2	4.1	14.1
	22	3.02	4.92	7.0	4.9	14.1
	24	2.64	4.11	5.1	4.3	14.1
	26	2.12	4.08	9.4	3.6	14.5
	28	1.99	4.2	8.5	4.9	15
	30	1.96	4.26	8.3	7.8	14.3

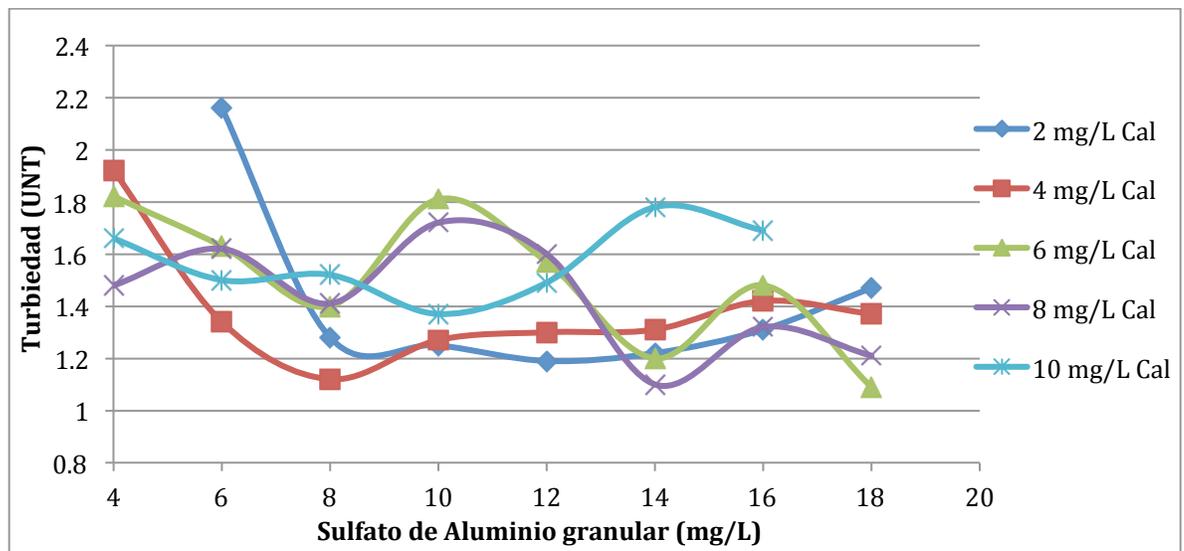
Fuente: elaboración propia.

A medida que se avanzaba en el desarrollo experimental, se pudo evidenciar que las condiciones cambiaban continuamente, debido a esto, a la cantidad de pre-

alcalinizante, y a la naturaleza de cada coagulante, fue necesario ajustar el rango de la dosis de cada uno para lograr resultados confiables y con los que se pudiera llegar a un resultado conciso sin necesidad de utilizar elevadas cantidades de químicos. Por esta razón se pueden encontrar rangos desde 12 hasta 28 miligramos por litro de coagulante, y otros de 20 a 30 miligramos por litro.

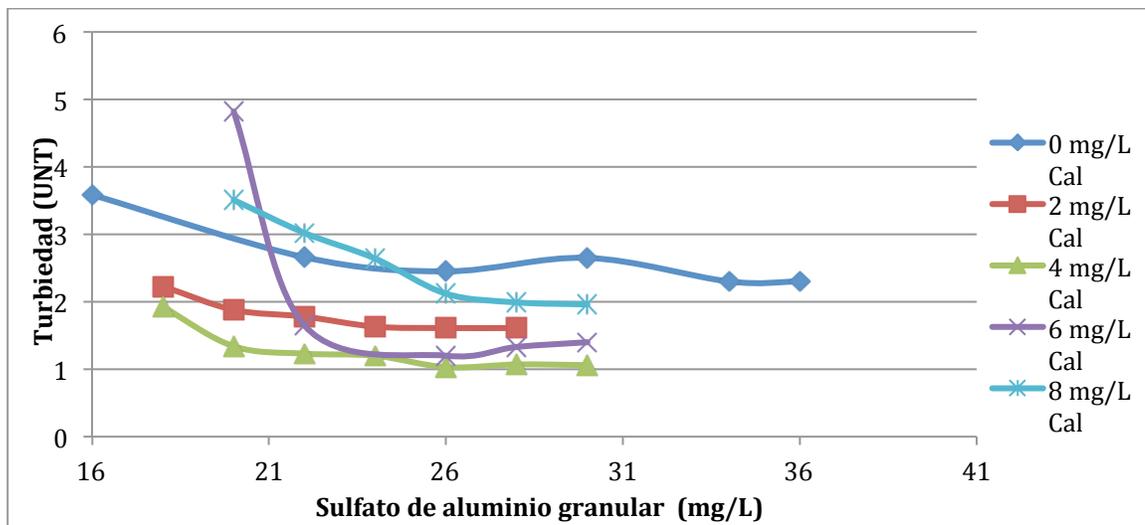
En las **gráficas 22 y 23** se muestran los resultados obtenidos de la prueba de jarras con sulfato de aluminio granular con turbiedades bajas y altas de agua cruda, respectivamente. Algunos de los resultados (determinadas dosificaciones de coagulante), por cuestiones de orden y practicidad, no se muestran debido a que dieron valores de turbiedad demasiado grandes, lo que genera que se salga del área de trazado del gráfico.

Gráfica 22. Resultados de turbiedad vs dosificación de coagulante en prueba de jarras con sulfato de aluminio granular en turbiedades bajas (3.6 – 4.89 UNT) de agua cruda.



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 23. Resultados de turbiedad vs dosificación de coagulante en prueba de jarras con sulfato de aluminio granular en turbiedades altas (15 – 23.5 UNT) de agua cruda.



Fuente: elaboración propia.

En las **tablas 25** y **26** se muestran los datos obtenidos mediante la prueba de jarras para el sulfato de aluminio líquido como coagulante, en turbiedades bajas (13.8 – 19.5 UNT) y en turbiedades altas (29.1 – 29.5 UNT), respectivamente. Se realizaron variaciones en la cantidad de cal hidrata y la dosis de sulfato de aluminio líquido teniendo en cuenta principalmente la turbiedad y el pH del agua cruda y clarificada.

Tabla 25. Resultados de prueba de jarras con sulfato de aluminio líquido en turbiedades bajas (13.8 – 19.5 UNT) de agua cruda.

Cal hidrata (mg/L)	S.A.I* (mg/L)	Turbiedad (UNT)	pH (UpH)	Color	Alcalinidad	Temperatura (°C)
2	25	13.8	4.95	43.1	7.8	14.5
	35	1.74	4.44	9.0	4.1	14.8
	40	1.71	4.3	8.8	5.5	14.6
	45	1.69	4.16	8.7	4.5	14.6
	50	1.58	4.14	8.1	4.5	14.4
	55	1.87	4.07	9.8	3.1	14.4
4	30	19.9	5.18	49.9	5.5	15
	32	18.8	5.05	48.7	5.3	14.8
	35	3.64	4.94	22.5	5.2	14.2
	38	2.6	4.7	14.6	4.3	14.3
	40	1.57	4.65	8.1	4.5	14.4
	42	2.01	4.67	9.2	4	14.3
	45	3.21	4.64	19.8	4.2	14.4
6	35	5.03	7.03	37.3	7.3	14.4
	38	4.08	5.31	31.4	4.8	14.2
	40	1.65	5.8	8.5	5.1	14.2
	45	1.15	5.67	5.2	4.5	15
	50	0.942	4.9	4.4	4.6	15
	55	1.03	5.04	4.7	4.2	14.9
8	35	17.9	7.28	52.7	7.5	14.4
	38	18.9	7.25	51.8	8.7	14.3
	42	4.1	7.13	24.4	7.2	14.4
	45	2.15	5.93	11.7	5.3	14.4
	50	1.1	5.64	5.0	4.8	14.6
	55	1.15	5.07	5.2	8.9	14.7
10	40	17.9	7.11	52.7	8.6	14.2
	45	18.4	7.07	53.2	10.2	14.2
	48	18.7	5.8	51.5	10.3	14.4
	50	2.7	5.94	15.6	9.9	14.2
	52	3.52	5.47	24.8	6	14.1
	55	1.01	5.71	4.6	10.7	14.3

*Sulfato de aluminio líquido.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 26. Resultados de turbiedad vs dosificación de coagulante en prueba de jarras con sulfato de aluminio líquido en turbiedades altas (29.1 – 29.5 UNT) de agua cruda.

Cal hidrata (mg/L)	S.A.I (mg/L)	Turbiedad (UNT)	pH (UpH)	Color	Alcalinidad	Temperatura (°C)
0	20	34.2	4.31	80.2	3.4	15
	25	31.1	4.23	72.9	2.1	15
	30	11.8	4.09	27.7	2	15
	35	8.03	4.03	18.8	3	15
	40	5.05	4.21	14.2	2	14.6
	45	4.51	4.04	12.9	3.5	14.6
	50	4.98	4.05	11.7	2.5	14.6
2	30	34.5	4.64	78.2	4.1	15
	35	5.87	4.6	15.1	4	14.3
	40	3.56	4.46	10.3	3	14.3
	45	2.12	4.48	7.0	1.9	14.4
	50	1.73	4.4	5.1	1.6	14.3
	55	1.55	4.1	4.8	2	14.3
3	30	34.5	5.1	74.9	4	14.3
	35	11.9	4.9	27.9	4.4	14.1
	40	3.86	4.73	11.0	4.9	14.3
	45	1.69	4.44	5.0	3.5	14.5
	50	1.52	4.21	4.6	3	14.5
5	35	11.1	5.9	22.5	3.9	14.1
	40	3.17	4.67	10.8	3.5	14.2
	45	1.93	4.39	8.4	3.6	14.1
	50	1.72	4.36	7.6	3.2	14.9
	55	1.66	4.32	4.9	2.3	14.8
	60	1.51	4.17	4.4	3	14.9

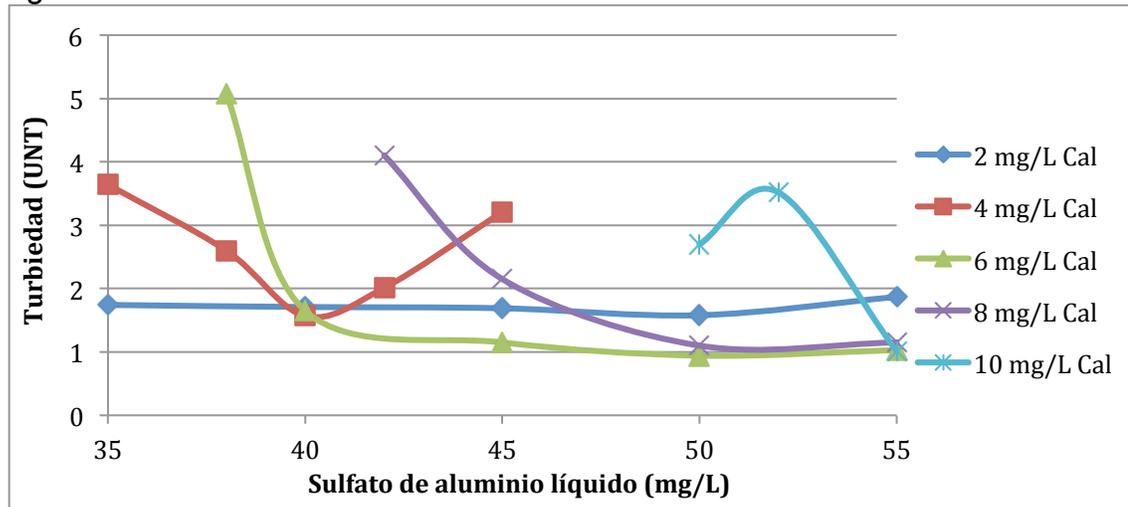
Fuente: elaboración propia.

Cabe resaltar que aunque se denominaron 2 rangos de turbiedad para cada coagulante, como “turbiedad baja” y “turbiedad alta”, no son los mismo rangos entre los diferentes coagulantes debido a que este parámetro cambia de un día para otro, e incluso por horas, por diferentes razones; siendo la principal, el clima.

En las **gráficas 24 y 25** se muestran los resultados obtenidos de la prueba de jarras con sulfato de aluminio líquido con turbiedades bajas y altas de agua cruda, respectivamente. Algunos de los resultados (determinadas dosificaciones de coagulante), por cuestiones de orden y practicidad, no se muestran debido a que

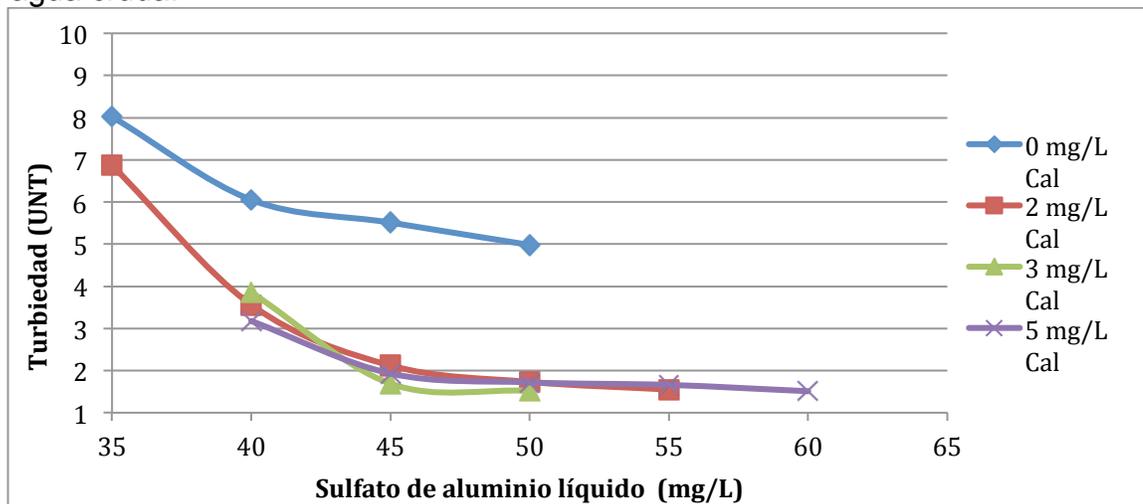
dieron valores de turbiedad demasiado altos, lo que genera que se salga del área de trazado del gráfico.

Gráfica 24. Resultados de turbiedad vs dosificación de coagulante en prueba de jarras con sulfato de aluminio líquido en turbiedades bajas (13.8 – 19.5 UNT) de agua cruda.



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 25. Resultados de turbiedad vs dosificación de coagulante en prueba de jarras con sulfato de aluminio líquido en turbiedades altas (29.1 – 29.5 UNT) de agua cruda.



Fuente: elaboración propia.

En las **tablas 27 y 28** se muestran los datos obtenidos mediante la prueba de jarras para el hidroxiclورو de aluminio (PAC) como coagulante, en turbiedades bajas (4.65 – 4.9 UNT) y en turbiedades altas (18.6 – 20.1 UNT), respectivamente. Se realizaron variaciones en la cantidad de cal hidrata y la dosis de PAC teniendo en cuenta principalmente la turbiedad y el pH del agua cruda y clarificada.

Tabla 27. Resultados de prueba de jarras con hidroxiclورو de aluminio (PAC) en turbiedades bajas (4.65 – 4.9 UNT) de agua cruda.

Cal hidrata (mg/L)	PAC (mg/L)	Turbiedad (UNT)	pH (UpH)	Color	Alcalinidad	Temperatura (°C)
0	4	4.64	7.27	34.9	10.1	13.5
	6	4.79	5.94	34.8	10.3	14
	8	4.84	5.84	35.1	9	14
	10	3.94	5.74	24.4	7.7	14
	12	2.36	5.67	10.6	7.5	13.8
	14	1.84	7.17	8.1	8.1	13.8
	16	0.806	5.97	3.0	7.8	14.2
	18	0.941	5.85	3.7	7.1	14.2
	20	0.995	5.8	4.0	5.6	14.3
	22	0.929	5.7	3.7	5.2	14.5
	24	1.5	5.52	5.4	5.2	14.2
2	10	5	7.04	30.9	9.7	14
	12	2.27	7.08	10.1	10.1	14
	14	1.91	7.1	8.4	9.3	14.5
	16	1.55	7.15	5.7	9.2	14.6
	18	1.15	7.21	4.7	8.9	14.5
	20	1.63	7.47	7.1	8.2	14.7
4	10	4.35	7.53	33.1	12.6	14
	12	4.18	7.53	32.0	11.8	13.8
	14	3.51	7.46	21.7	12.8	14.2
	16	2.17	7.53	9.7	11.7	14.3
	18	1.75	7.56	7.6	11.5	14.2
	20	1.34	7.68	4.7	12.2	14.2
6	10	4.8	8.21	29.7	14.6	14.6
	12	4.28	8.27	32.6	14.1	14.5
	14	4.17	8.24	32.0	14.5	14.8
	16	4.4	8.14	27.2	14.5	14.8
	18	3.88	8.01	24.0	14.9	14.7
	20	3.06	7.9	18.9	14	14.9

Fuente: elaboración propia.

Con conocimientos basados en experiencia de algunos ingenieros de la PTAP El Dorado, y teoría previamente expuesta en este documento, se quiso verificar y demostrar la poca dependencia que tiene el hidroxicloriguro de aluminio con la pre-alcalinización. Por esta razón se realizaron una mayor cantidad de pruebas sin adición de cal hidrata, obteniendo excelentes resultados. Además se observa que a medida que se aumenta la cantidad de cal hidrata es necesaria una mayor cantidad de coagulante, lo que genera mayor cantidad de costos en el proceso.

Tabla 28. Resultados de prueba de jarras con hidroxicloriguro de aluminio (PAC) en turbiedades altas (18.6 – 20.1 UNT) de agua cruda.

Cal hidrata (mg/L)	PAC (mg/L)	Turbiedad (UNT)	pH (UpH)	Color	Alcalinidad	Temperatura (°C)
0	14	7.34	4.97	24.4	4.2	13.8
	16	3.24	4.75	10.2	3.6	13.6
	18	2.31	4.64	8.3	3.9	13.7
	20	1.23	4.58	4.4	3.5	14
	24	1.08	4.23	4.5	3	14
	26	1.57	4.17	4.3	3.5	14.2
	28	0.93	4.13	3.1	3.4	14
	30	1.03	4.14	3.4	3.9	13.9
	34	0.991	4.06	3.0	3.9	14.1
2	6	19.4	5.65	54.8	8.3	13.7
	10	20.1	5.57	62.8	7.6	13.7
	12	20.9	5.47	64.3	7	13.8
	14	20.5	5.34	59.0	4.6	13.8
	18	4.62	5.21	13.3	4.9	13.8
	20	1.95	5.04	5.6	4.5	13.7
	22	1.17	4.99	3.4	4.1	14
	24	1.18	4.83	3.4	4.2	13.8
	28	1.15	4.53	3.7	4.4	13.6
4	16	20.2	5.61	63.1	8	13.7
	20	3.71	5.47	10.7	5.1	13.8
	22	1.57	5.38	3.5	7.2	14
	24	1.3	5.35	3.4	5.9	13.9
	26	1.68	5.27	3.8	4.7	13.7
	30	1.42	5.09	3.1	4.3	14
6	16	19.7	7.19	60.7	10.3	13.9
	18	20.3	7.06	63.4	9.1	13.9
	20	20.3	5.98	63.2	8.6	14

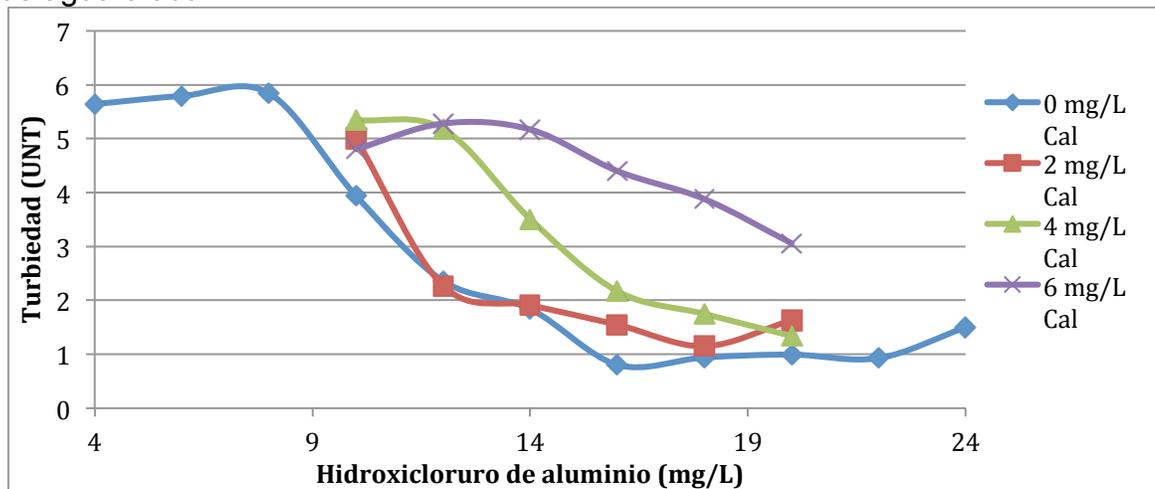
Tabla 28. (Continuación).

Cal hidrata (mg/L)	PAC (mg/L)	Turbiedad (UNT)	pH (UpH)	Color	Alcalinidad	Temperatura (°C)
6	22	8.26	5.88	22.8	7.1	14.1
	26	1.43	5.79	3.1	7	14
	30	0.959	5.74	2.8	5.2	14.2
	34	1.43	5.91	3.1	4.3	14
8	24	20.3	7.19	61.4	10.7	14.4
	26	18.7	7.25	55.8	9.5	14.3
	30	1.64	5.87	4.7	7.8	14.3
	32	1.21	7.14	3.5	7.5	14.4
	36	1.19	7	3.4	5.8	14.3

Fuente: elaboración propia.

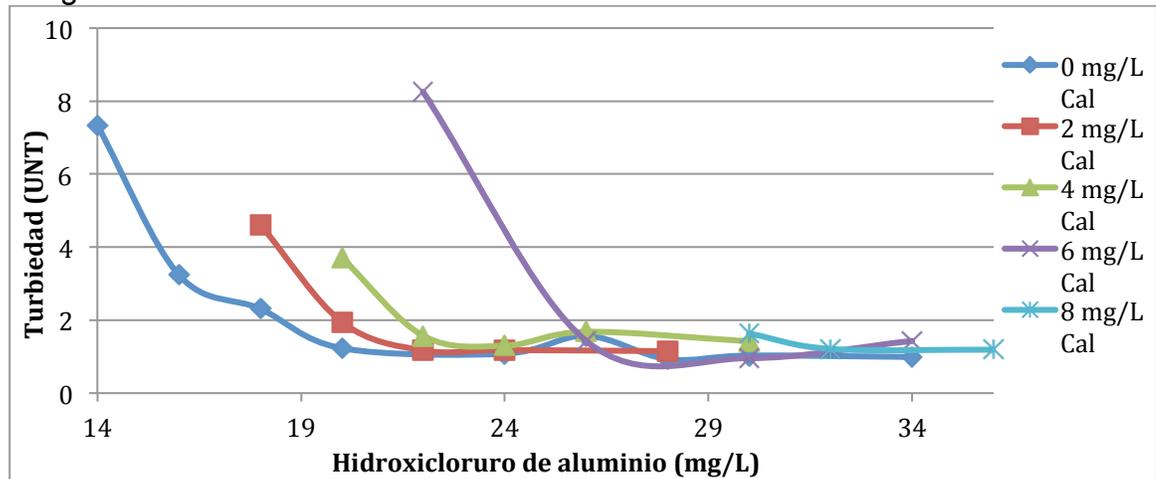
A continuación, se muestran las **gráficas 26 y 27** correspondientes a las tablas **27 y 28**, en donde observan los resultados de los coagulantes de acuerdo la turbiedad.

Gráfica 26. Resultados de turbiedad vs dosificación de coagulante en prueba de jarras con hidroxiclورو de aluminio (PAC) en turbiedades bajas (4.65 – 4.9 UNT) de agua cruda.



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 27. Resultados de turbiedad vs dosificación de coagulante en prueba de jarras con hidroxiclорuro de aluminio (PAC) en turbiedades altas (18.6 – 20.1 UNT) de agua cruda.



Fuente: elaboración propia.

Una vez terminada la experimentación en laboratorio, se determinan, siguiendo la normatividad de la planta (para agua clarificada, turbiedad < 2.00 UNT), las dosificaciones de cal hidratada y coagulante que cumplan con la norma teniendo en cuenta que: se debe escoger la dosificación que dé como resultados los valores más cercanos a la normatividad para lograr una mayor reducción de costos. En el caso de la turbiedad, por ejemplo, lo ideal es no tomar dosificaciones con valores de turbiedad muy cercanos a 2 UNT (entre 1.97 y 1.99 UNT) debido a que un mezclado deficiente puede llevar a que el agua tratada no cumpla con la norma.

3.1.3 Análisis de resultados de la experimentación a nivel laboratorio. Se denominaron los rangos de turbiedad como “turbiedad baja” y “turbiedad alta” debido a que fueron los menores y mayores valores de turbiedad, respectivamente, obtenidos en el desarrollo del experimento.

Para llevar a cabo la experimentación a nivel laboratorio y determinar las dosis óptimas de coagulante se tomó como variable principal la turbiedad del agua cruda y del agua clarificada, la segunda variable de criterio fue el pH y por último la temperatura, el color y la alcalinidad. Cabe aclarar que todas las variables fueron monitoreadas a lo largo de la experimentación, en mayor proporción el pH y el color del agua clarificada, teniendo en cuenta que estas siempre estuvieran ligadas a la turbiedad.

Debido a que el mayor cambio de temperatura que se experimentó con cada coagulante fue de 1.5 °C, este parámetro no se tuvo en cuenta para analizar el desarrollo de cada sustancia.

A pesar de que la turbiedad es el parámetro de mayor importancia al momento de determinar la dosis óptima de coagulante, se debe resaltar que el pH toma un papel muy importante debido a que después de los procesos de coagulación, floculación, sedimentación y filtración se realiza una última alcalinización para llevar al agua a un pH neutro (7 UpH). Si se disminuye de gran manera el pH debido a la coagulación, será necesario adicionar una mayor cantidad de alcalinizante al final del proceso. Por esta razón se tiene en cuenta la variabilidad del pH que experimenta el agua con cada uno de los coagulantes.

La dosis de alcalinizante que se debe agregar al agua cruda depende en gran parte al coagulante que se vaya a utilizar. En los resultados se evidencia que el hidroxiclورو trabaja muy bien en turbiedades bajas, medias y altas, sin necesidad de agregar pre-alcalinizante a la mezcla, al contrario, a medida que se agregan dosis de cal hidratada (aunque sean pequeñas cantidades), es necesario dosificar mayor cantidad de coagulante. Además de esto, se evidencia que el pH del agua clarificada no varía mucho a medida que se aumenta o disminuye la dosificación de PAC; en turbiedades bajas el pH permanece muy cerca del valor neutro y no difiere mucho del valor de pH del agua cruda con la que se realizó la práctica.

A pesar de que no existe una ley cinética que determine la cantidad de coagulante que se debe agregar a una muestra de agua (debido a que depende de varios factores), se evidencia en los resultados que a medida que aumenta la turbiedad del agua cruda, debe aumentarse la cantidad de coagulante para conseguir una turbiedad óptima en agua clarificada (menos de 2 UNT).

El propósito básico de esta experimentación con prueba de jarras fue observar el comportamiento de cada uno de los coagulantes en diferentes rangos de turbiedad, pH, color, alcalinidad y temperatura, y así lograr determinar las dosificaciones que deben usarse en la experimentación a nivel planta piloto.

Además de tener en cuenta los parámetros físico-químicos del agua, previamente mencionados, también se tuvieron en cuenta las características del *floc* formado por cada coagulante, puesto que para que sea una dosis óptima válida, los flóculos deben ser pesados, con una rápida velocidad de sedimentación.

Con el sulfato de aluminio líquido se pudo observar un *floc* poco denso, o con alta porosidad debido a que se veía esponjoso y con el más mínimo movimiento del *beaker*, este tendía a subir nuevamente a la superficie. Con el hidroxiclورو de aluminio, se observó un *floc* más pesado y con mayor velocidad de sedimentación.

En todos los experimentos que se llevaron a cabo, se evidenció una disminución de las unidades de color proporcional a la disminución de turbiedad. No se utilizó

el parámetro de alcalinidad para determinar el desarrollo de los coagulantes debido a que el método de medición de este era bastante subjetivo; titulación con ácido sulfúrico y fenolftaleína como indicativo de color. La muestra debía pasar de un color azul celeste a un color rojo vino (en ocasiones rojo pálido o rosado), lo que dificultaba determinar con exactitud la cantidad de titulante que debía ser agregado.

3.2 DESARROLLO EXPERIMENTAL A NIVEL PLANTA PILOTO

Al determinar el comportamiento de cada uno de los coagulantes en distintos rangos de turbiedad de agua cruda, se logró hallar una dosis óptima de coagulante-cal hidrata, con las cuales se realizaron corridas en la planta piloto de El Dorado con el fin de llevar la experimentación a un nivel más similar al real.

La planta piloto de El Dorado es un sistema a escala que permite investigar y observar cada una de las etapas de tratamiento de la planta El Dorado, ajustando dosificaciones y parámetros generales de operación. Esta planta tiene capacidad de tratamiento de 1.0 litro/segundo con los procesos de mezcla rápida hidráulica, unidad de floculación con agitadores de paletas en 5 etapas, sedimentador de alta tasa con placas inclinadas y sistema de filtros. Cada una de las unidades de proceso está construida de manera que representa las condiciones reales de tratamiento de la planta El Dorado⁴⁵.

Previo a la experimentación en la planta piloto, fue necesario realizar un nuevo test de jarras para cada coagulante debido al cambio que se generó en la turbiedad del agua cruda por los días de lluvias. En la **tabla 29** se muestran las dosificaciones de pre-alcalinizante y coagulante escogidas para realizar las pruebas a nivel planta piloto.

Tabla 29. Dosificaciones de cada sustancia usadas en la experimentación en planta piloto.

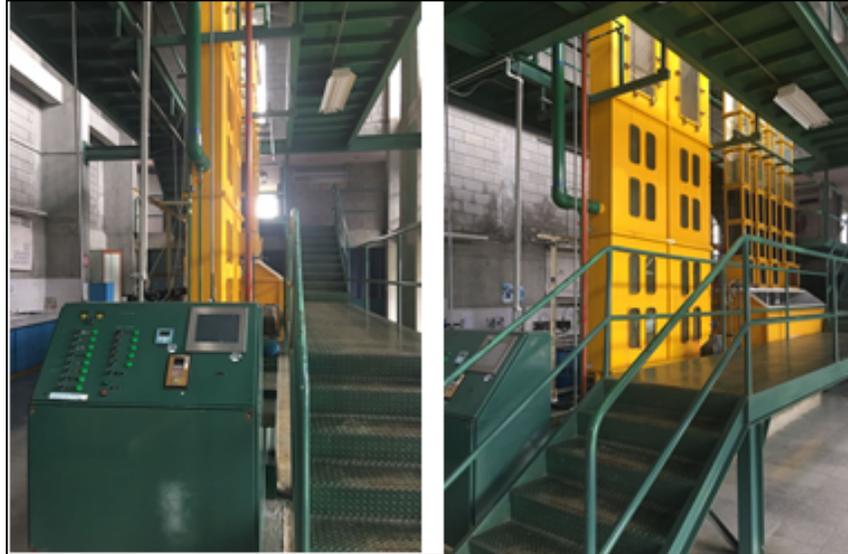
Sustancia	Dosificación de cal hidrata	Dosificación de coagulante
Sulfato de aluminio granular	10 mg/L	25 mg/L
Sulfato de aluminio líquido	4 mg/L	37 mg/L
PAC	0 mg/L	16 mg/L

Fuente: elaboración propia.

⁴⁵ Instalaciones de Planta de tratamiento El Dorado.

En la **figura 29** se observa la planta piloto implementada en la PTAP El Dorado.

Figura 29. Vista lateral y trasera, respectivamente, de la planta piloto El Dorado.



Fuente: elaboración propia.

Para la utilización de la planta piloto fue necesario preparar 40 litros de solución de coagulante y 60 litros de solución de cal hidratada, debido al tiempo de operación y el caudal de entrada.

Para asegurar que la dosificación que estaba llegando a los tanques de floculación era la adecuada (según el caudal y la concentración) se llevaron a cabo pruebas de laboratorio para determinar el pH después de agregar el pre-alcalinizante y después de agregar el coagulante.

Para fines de un correcto manejo y correctas prácticas, fue necesario elaborar el instructivo de funcionamiento de la planta piloto de El Dorado, el cual se encuentra al final de este documento como **anexo C**. En este instructivo se explica más a fondo el funcionamiento de la planta piloto y las partes que la conforman (válvulas, tanques, interruptores, etc.).

En esta experimentación se midieron las características fisicoquímicas (pH, turbiedad, alcalinidad, color, temperatura) del agua cruda, clarificada y filtrada, y los resultados se muestran en las **tablas 29, 30 y 31**. No se realizó post-alcalinización ni desinfección.

Tabla 29. Resultados de la experimentación en planta piloto utilizando 25 mg/L de sulfato de aluminio granular y 10 mg/L de cal.

Muestra	Turbiedad (UNT)	pH (UpH)	Alcalinidad	Color	Temperatura (°C)
Agua cruda	19.3	5.67	7.6	55.4	14.3
Agua clarificada	1.24	4.34	4.6	5.2	14.8
Agua filtrada	0.42	5.15	4.0	2.3	14.9

Fuente: elaboración propia.

Tabla 30. Resultados de la experimentación en planta piloto utilizando 37 mg/L de sulfato de aluminio líquido y 4 mg/L de cal.

Muestra	Turbiedad (UNT)	pH (UpH)	Alcalinidad	Color	Temperatura (°C)
Agua cruda	14.9	5.39	8.8	45.6	14.9
Agua clarificada	1.58	4.06	4.2	7.9	14.8
Agua filtrada	0.182	4.1	4.6	3.8	14.6

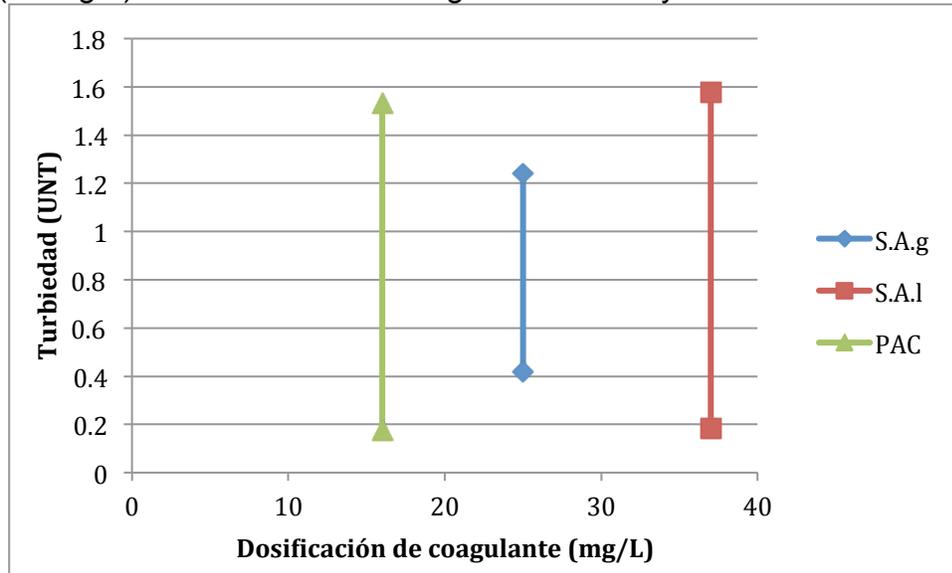
Fuente: elaboración propia.

Tabla 31. Resultados de la experimentación en planta piloto utilizando 16 mg/L de PAC, sin cal.

Muestra	Turbiedad (UNT)	pH (UpH)	Alcalinidad	Color	Temperatura (°C)
Agua cruda	18.5	7.07	8.6	51.6	14.7
Agua clarificada	1.53	5.18	5.7	8.9	16
Agua filtrada	0.175	5.41	5.3	3.2	14.8

Fuente: elaboración propia.

Gráfica 28. Resultados de dosificación de los diferentes coagulantes (en mg/L) con la turbiedad del agua clarificada y filtrada.



Fuente: elaboración propia.

3.2.1 Análisis de resultados. En la **gráfica 28** se evidencia la disminución que tuvieron las unidades de turbiedad en el agua clarificada y filtrada, y se observa la cantidad de coagulante que fue necesario utilizar para llevar a cabo esta experimentación; dando como resultado una mayor disminución en la turbiedad y menor cantidad de dosificación de coagulante utilizando el hidroxocloruro de aluminio (PAC).

Debido a que de sulfato de aluminio granular se utilizaron 25 mg/L, este se posiciona en segundo lugar, seguido del sulfato de aluminio líquido, del cual fue necesario mayor cantidad de dosificación para disminuir la turbiedad.

Para llegar a los resultados expuestos, se realizaron 3 corridas en la planta piloto, cada una con una duración de 8 horas aproximadamente, de las cuales 4 horas son tomadas para la estabilización de la planta, regulación de caudales y monitoreo de variables, y 1 hora para lavado de filtros y desagüe.

En todas las corridas que se realizaron, con cada uno de los coagulantes, se obtuvo la remoción deseada de turbiedad (clarificada con turbiedad menor a 2 UNT), lo cual indica que las dosificaciones que se determinaron de cal y coagulante fueron correctas.

El objetivo principal de esta experimentación fue determinar el comportamiento de cada uno de los coagulantes en el proceso de potabilización para lograr generar una reducción en gastos de la empresa mediante el cambio de coagulante.

Debido a que, por ejemplo, con el sulfato de aluminio líquido se necesitó mayor dosificación de coagulante (37 mg/L) que con el granular (25 mg/L), pero menor cantidad de cal hidrata (4 mg/L para el sulfato de aluminio líquido y 10 mg/L para el granular), se requiere de un análisis financiero de las sustancias y los equipos necesarios para la implementación de cada uno, el cual se desarrollará en el **capítulo 5**.

Hasta este punto, basados en conceptos teóricos y los resultados obtenidos tanto a nivel laboratorio como planta piloto, se puede concluir que el coagulante con mejor desempeño es el hidroxiclورو de aluminio, debido a la baja dosificación que fue necesaria para cumplir con los parámetros requeridos de turbiedad, color y pH. Además, este coagulante no necesita de la adición de cal hidrata como pre-alcalinizante, únicamente como post-alcalinizante para regular el pH del agua de salida del proceso.

3.3 DOSIFICACIÓN DE LOS COAGULANTES PROPUESTOS

Los coagulantes cumplen su función como desestabilizadores de carga, lo cual se evidencia en el evaluación y selección técnica tratado previamente; cada uno de ellos cumple con la reducción de turbiedad recreando características en el agua que abren la posibilidad a diferentes cambios en el diseño de proceso que lo favorecen o lo desfavorecen.

Además de las variaciones en las propiedades del agua en la entrada del proceso y de las concentraciones de contaminantes disueltos, la dosificación de diferentes cantidades de pre-alcalinizante y coagulante recrea características particulares en el agua que se ven reflejadas en la turbiedad, el color, el pH, la alcalinidad, la conductividad y la concentración de diferentes compuestos, como se evidencio en el desarrollo experimental del test de jarras y el escalamiento a la planta piloto; resaltando que las características a nivel de laboratorio son difíciles de recrear con precisión en la planta real pero funcionan como un aproximado.

La selección de la dosificación ideal para cada uno de los coagulantes según los criterios técnicos, se desarrolla a partir de los resultados obtenidos del comportamiento del sulfato de aluminio granular, sulfato de aluminio líquido e hidroxiclورو de aluminio en el ensayo de jarras con respecto a los siguientes criterios:

- Menor cantidad adicionada de alcalinizante y coagulante que cumplan con la norma interna de agua clarificada en turbiedad menor a 2 UNT.
- Se favorece la selección en el caso de que a mayor cantidad de alcalinizante dosificado, se reduzca la cantidad de coagulante necesario para cumplir la

norma. Esto se debe a que cada kilogramo de cal hidrata es más económico que cualquiera de los coagulantes propuestos, para el caso del sulfato de aluminio granular, representa el 62% del precio, para el sulfato de aluminio líquido el 84% y para el hidroxiclorigen de aluminio el 58%.

- Conjuntamente con la turbiedad en el agua clarificada, el pH debe estar entre los límites de la norma interna; mayor a 4.9 UpH. El límite superior se debe ajustar debido a que el hidroxiclorigen de aluminio hace variar el pH del agua en menor proporción que el sulfato de aluminio, lo que optimiza en cierta forma el proceso reduciendo la adición de post-alcalinizante.

Con las observaciones anteriores, correspondientes a la cantidad de cal hidrata y coagulante que se debe aplicar en los rangos de turbiedad baja y alta, y los valores obtenidos en la experimentación, se cuantificó y registraron los valores en la **tabla 32**, presentando un valor aproximado de la situación que se puede presentar en la planta real.

Tabla 32. Dosificación Optima experimental de Pre-alcalinizante y Coagulante según el rango de turbiedad.

Rango de turbiedad	Turbiedad agua cruda UNT	Alcalinizante mg/L	Coagulante mg/L	Agua clarificada	
				Turbiedad UNT	pH UpH
Sulfato de Aluminio Granular					
Bajo	4,83	8	12	1,6	4,92
Alto	25	4	22	1,65	5,73
Sulfato de Aluminio Liquido					
Bajo	16,5	2	35	1,74	5,44
Alto	29,5	3	45	1,69	5,44
Hidroxiclorigen de Aluminio					
Bajo	4,9	0	16	0,806	6,97
Alto	20,1	0	20	1,23	5,58

Fuente: elaboración propia.

La relación de la cantidad de coagulante y alcalinizante tiene diferentes comportamientos en los tres coagulantes analizados :

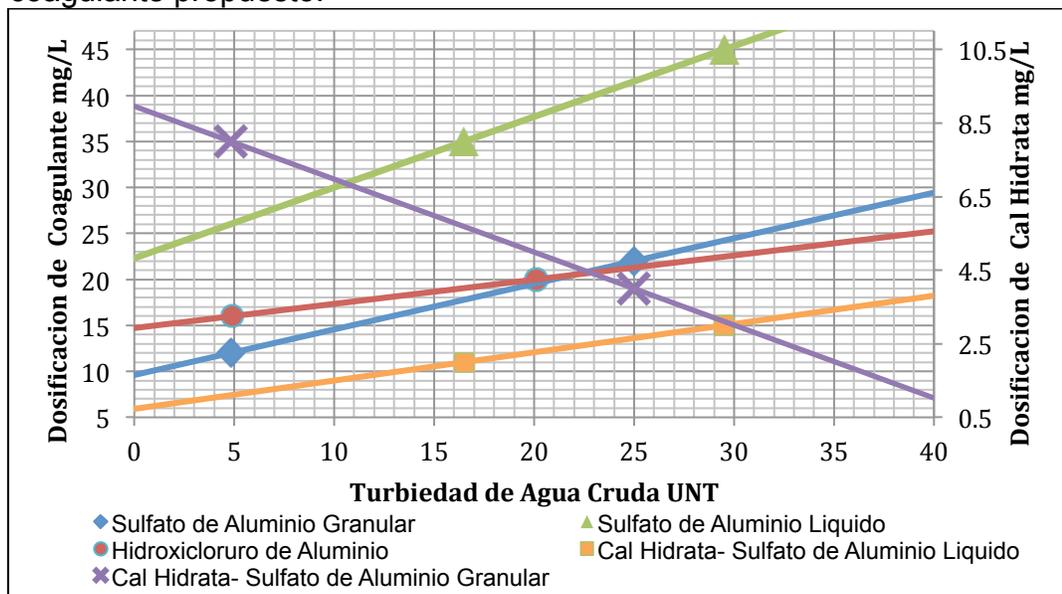
- La cantidad de sulfato de aluminio granular tiene una relación inversamente proporcional a la cantidad de cal hidratada que se necesita en el proceso. A medida que la turbiedad en el agua cruda aumenta se necesita más coagulante y menos alcalinizante, que se puede explicar mediante los sólidos disueltos en el agua; a medida que estos aumentan funcionan como precursores de la coagulación y la disociación de los iones en el agua.
- La cantidad de sulfato de aluminio líquido es directamente proporcional a la cantidad de cal hidrata necesaria en el proceso. A medida que la turbiedad aumenta, la cantidad de coagulante y alcalinizante para tratar el agua debe ser

mayor, pero a diferencia del sulfato de aluminio granular, la dosis necesaria de cal hidrata para la coagulación es mucho menor y se gasta mayor cantidad de coagulante, en promedio hasta el 97% en exceso de sulfato de aluminio líquido con respecto al sulfato de aluminio granular.

- La cantidad de hidroxicloriguro de aluminio es independiente de la cal hidrata que se le adicione en la pre-alcalinización, esto quiere decir que este polímero está diseñado para adecuarse a la variabilidad de propiedades del agua cruda, y es directamente proporcional a la turbiedad en la entrada del proceso, a mayor turbiedad mayor alcalinizante es necesario para la coagulación.

Para representar mejor las variables dependientes del proceso (dosificación de coagulante y alcalinizante) y las variables independientes (turbiedad del agua) se grafica y se representa el comportamiento de cada coagulante con su respectivo alcalinizante. Ver **Gráfica 29**.

Gráfica 29. Relación de la dosificación de pre-alcalinizante con cada coagulante propuesto.



Fuente: elaboración propia.

Asumiendo un comportamiento lineal en cada una de las dosificaciones, se recrea una función de dosificación en miligramos por cada litro de agua que depende de la turbiedad en el agua cruda y se explica de la siguiente manera:

- Para el sulfato de aluminio granular se utilizan las **ecuaciones 8 y 9**.

Ecuación 8. Dosificación Alcalinizante para el sulfato de aluminio granular, con correlación experimental.

$$\text{Dosificación Alcalinizante} \left[\frac{mg}{L} \right] = -0,1983 * (\text{turbiedad}[UNT]) + 8,9579$$

Fuente: elaboración propia.

Ecuación 9 Dosificación Coagulante sulfato de aluminio granular, con correlación experimental.

$$\text{Dosificación Coagulante} \left[\frac{mg}{L} \right] = 0,4958 * (\text{turbiedad}[UNT]) + 9,6054$$

Fuente: elaboración propia.

- Para el sulfato de aluminio líquido se utilizan las **ecuaciones 10 y 11**

Ecuación 10 Dosificación Alcalinizante para el sulfato de aluminio líquido, con correlación experimental.

$$\text{Dosificación Alcalinizante} \left[\frac{mg}{L} \right] = 0,0769 * (\text{turbiedad}[UNT]) + 0,7308$$

Fuente: elaboración propia.

Ecuación 11 Dosificación Coagulante sulfato de aluminio líquido, con correlación experimental.

$$\text{Dosificación Coagulante} \left[\frac{mg}{L} \right] = 0,7692 * (\text{turbiedad}[UNT]) + 22,308$$

Fuente: elaboración propia.

- Para el hidróxido de aluminio se utiliza la **ecuación 12.**

Ecuación 12 Dosificación Coagulante Hidroxicloruro de Aluminio, con correlación experimental.

$$\text{Dosificación Coagulante} \left[\frac{mg}{L} \right] = 0,2632 * (\text{turbiedad}[UNT]) + 14,711$$

Fuente: elaboración propia.

La expresión que relaciona la dosificación con el consumo másico en el día se determina mediante la ecuación 13:

Ecuación 13 Consumo en masa de reactivo diario.

$$\text{Consumo} \left[\frac{Kg}{\text{dia}} \right] = \text{Dosificación} \left[\frac{mg}{L} \right] * \left(\frac{1g}{1000mg} \right) * \left(\frac{1Kg}{1000g} \right) * \text{Caudal} \left[\frac{m^3}{s} \right] * \left(\frac{1000L}{1m^3} \right) * \left(\frac{86400s}{1\text{ dia}} \right)$$

Fuente: elaboración propia.

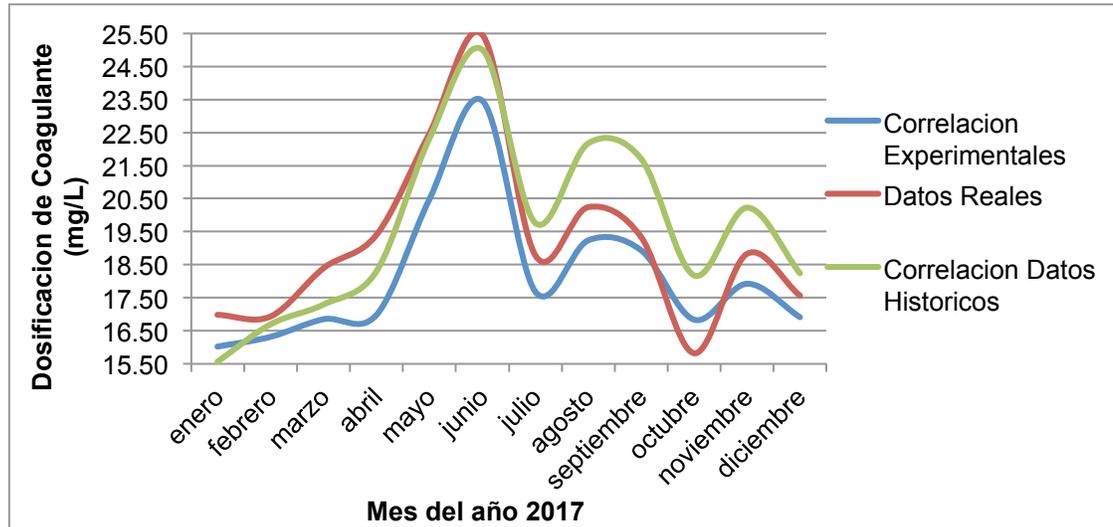
La anterior expresión puede ser aplicada para el análisis del consumo tanto de pre-alcalinizante, coagulante o cualquier reactivo químico adicionado al proceso. Esta expresión es necesaria para llevar a cabo la evaluación económico de los coagulantes propuestos debido a que es necesario determinar valores aproximados de consumo de pre-alcalinizante y coagulante.

3.4 COMPARACIÓN ENTRE SOBREDOSIFICACIÓN CON DATOS HISTÓRICOS Y DATOS EXPERIMENTALES

La operación de la planta se rige por la cantidad de carga de contaminante y solidos suspendidos que se presenta en el agua captada, aumentando en los meses con mayor cantidad de días de lluvia. Según el análisis del consumo de coagulante y pre-alcalinizante durante el año 2017, a medida que aumenta la turbiedad en el agua cruda, se aumenta la dosificación de coagulante y la dosificación de pre-alcalinizante, haciendo de esta una relación directamente proporcional. Los resultados obtenidos del análisis experimental mostraron un comportamiento diferente del sulfato de aluminio granular como coagulante frente al pre-alcalinizante, aunque es necesario mayor coagulante para la remoción de mayor turbiedad, no es necesaria la adición de más cantidad de pre-alcalinizante por lo que su relación es inversamente proporcional.

En la **gráfica 30** se relaciona la dosificación del coagulante actual obtenida para los distintos periodos en el año 2017, la dosificación encontrada a partir de la correlación teórica de los datos históricos (regresión logarítmica) y la dosificación obtenida en la experimentación con el *test* de jarras tratados en los capítulos anteriores, teniendo en cuenta las correlaciones halladas en los anteriores capítulos, el volumen diario de agua tratada y la turbiedad diaria.

Gráfica 30. Comparación de la dosificación del coagulante actual a lo largo del año 2017.



Fuente: elaboración propia.

La **gráfica 30** presenta la existencia de los problemas de sobredosificación y subdosificación de coagulante, respalda el problema que existe de sobredosificación de coagulación (Datos Reales) frente a la correlación experimental, cuyos valores son más evidentes en los meses de enero a agosto, noviembre y diciembre. En el mes de septiembre la sobredosificación disminuye al punto de involucrar una subdosificación en el mes de octubre, siendo menores los datos reales de dosificación de coagulante que la del modelo experimental propuesto.

Para tener mayor claridad de la pérdida de coagulante a lo largo del año 2017, se tomaron en cuenta únicamente los días en los cuales se evidenció sobredosificación, hallando valores cuantificables para la cantidad de coagulante con las siguientes expresiones:

- Para la correlación experimental se utiliza la **ecuación 14**:

Ecuación 14. Coagulante en exceso experimental.

$$\text{Coagulante en Exceso (Kg)} = CM(Kg) - CE (Kg)$$

Fuente: elaboración propia.

Donde:

CM = Coagulante usado en el mes

CE = Coagulante necesario según la correlación experimental

- Para la correlación de datos experimentales se utiliza la **ecuación 15**:

Ecuación 15. Coagulante en exceso histórico.

$$\text{Coagulante en Exceso (Kg)} = CM \text{ (Kg)} - CH \text{ (Kg)}$$

Fuente: elaboración propia.

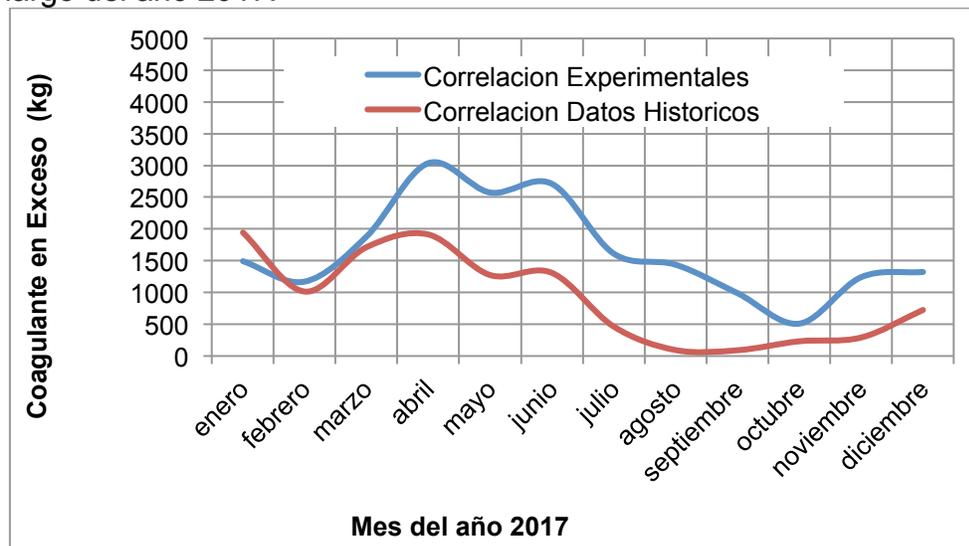
Donde:

CM = Coagulante usado en el mes

CH = Coagulante necesario según la correlación de datos históricos

Esto brinda una perspectiva aproximada a las pérdidas en kilogramos de coagulante durante el transcurso del año 2017 que se representa por la **gráfica 31** y la cual muestra que en el mes de octubre la subdosificación es dominante pero existe en pequeña proporción sobredosificación.

Gráfica 31. Correlación de la adición en exceso del coagulante a lo largo del año 2017.



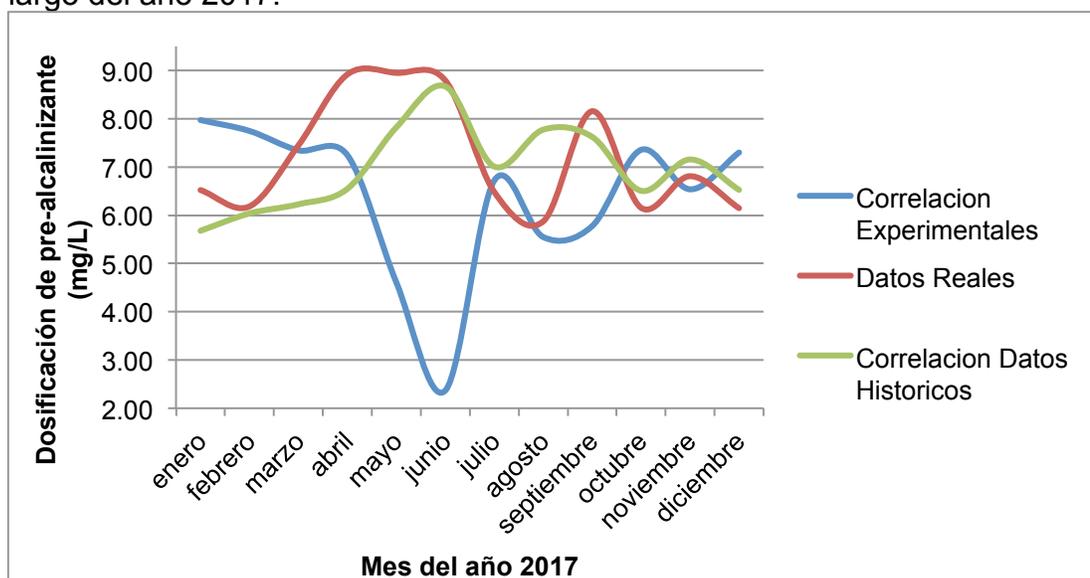
Fuente: elaboración propia.

De igual forma se evidencia que hubo pérdidas mayores en los meses de abril a junio, y en todo el transcurso del año existió algún tipo de pérdida. Existe un comportamiento similar entre la sobredosificación de sulfato de aluminio granular hallada por correlación de los datos históricos del año 2017 de mayor frecuencia y la correlación obtenida a partir de la experimentación; donde para los meses de febrero y marzo los valores son iguales pero para los meses entre abril y septiembre la sobredosificación experimental tiene un comportamiento similar al

arrojado por los datos históricos, con valores mayores, lo que se puede traducir en que las pérdidas de coagulante son mayores que las que se estimaron con los datos históricos por lo que la sustitución del coagulante adquiere un grado de importancia mayor.

Además de la pérdidas de coagulante también existe pérdidas de pre alcalinizante debido a la presencia de compuesto en aguas crudas con alto contenido orgánico que puede ayudar a la asimilación del coagulante en el agua, en la **gráfica 32** se presenta una comparación de la dosificación de pre-alcalinizante que se realizó en el año 2017, frente a la dosificación recomendada por la correlación experimental y la correlación frente a los datos históricos.

Gráfica 32. Comparación de la dosificación del pre-alcalinizante actual a lo largo del año 2017.



Fuente: elaboración propia.

Durante los primeros meses del año se logra manejar el coagulante con menos pre-alcalinizante del necesario, indicado por la correlación experimental, ahorrando en pre-alcalinizante, que se refleja en mayor pérdida de coagulante representado en la **gráfica 30**, desde enero hasta marzo donde este se iguala, la conducta que está tomando actualmente la planta es que a medida que la turbiedad aumenta (abril a julio) la dosificación de pre-alcalinizante aumenta, presentando un sobredosificación y pérdida de pre-alcalinizante; pero siguiendo los resultados de la correlación experimental se debe reducir esta dosificación, esto se puede explicar mediante el contenido de compuestos que le aporta mayo cantidad al agua como los silicatos, haciendo que el agua sea una mejor receptora del coagulante ácido.

Para tener mayor claridad de la pérdida de pre-alcalinizante a lo largo del año 2017, se tomaron en cuenta únicamente los días que se obtuvo sobredosificación, hallando valores cuantificables para la cantidad de pre-alcalinizante con las siguientes expresiones:

- Para la correlación experimental se utiliza la **ecuación 16**:

Ecuación 16. Correlación experimental para el pre-alcalinizante en exceso.

$$Pre\ alcalinizante\ en\ Exceso\ (Kg) = PM(Kg) - PE\ (Kg)$$

Fuente: elaboración propia.

Donde:

PM = Pre-alcalinizante usado en el mes

PE = Pre-alcalinizante necesario según la correlación experimental

- Para la correlación datos históricos se utiliza la **ecuación 17**:

Ecuación 17. Correlación de datos históricos para el pre-alcalinizante en exceso.

$$Pre\ alcalinizante\ en\ Exceso\ (Kg) = PM\ (Kg) - PH\ (Kg)$$

Fuente: elaboración propia.

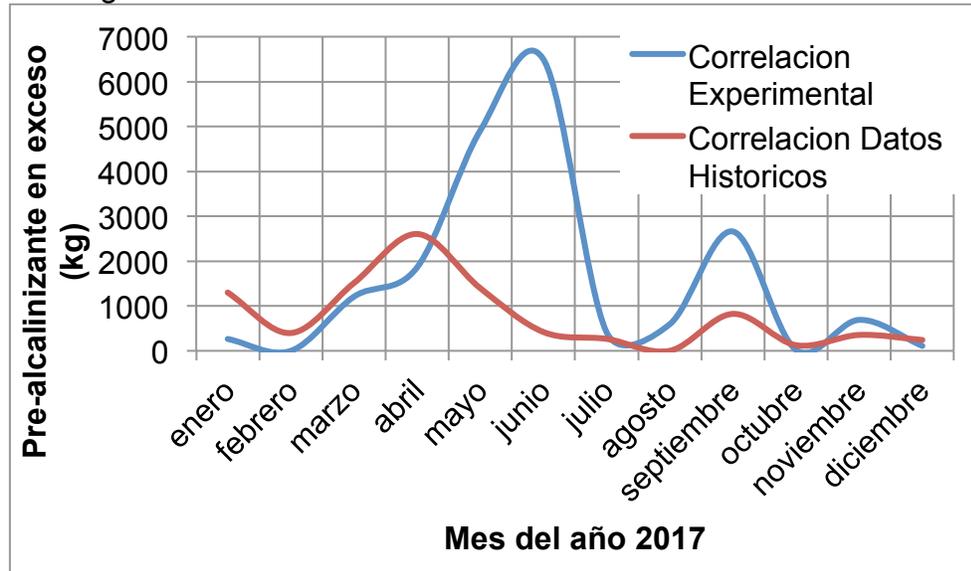
Donde:

PM = Pre-alcalinizante usado en el mes

PH = Pre-alcalinizante necesario según la correlación de datos históricos

Esto brinda una perspectiva aproximada de las pérdidas en kilogramos de pre-alcalinizante durante el transcurso del año 2017 que se representa por la **gráfica 33** y la cual muestra en los meses de enero a marzo la subdosificación es dominante pero existe en pequeña proporción sobredosificación.

Gráfica 33. Correlación de la adición en exceso del Pre-alcalinizante a lo largo del año 2017.



Fuente: elaboración propia.

Se puede encontrar una cantidad de pre-alcalinizante en exceso con valores similares para las dos correlaciones trabajadas, lo cual representa que el modelo basado en los datos históricos de frecuencia se ajusta al modelo experimental en turbiedades bajas pero a medida que se aumenta la turbiedad el modelo experimental muestra mayor pérdida de pre-alcalinizante debido a que se debería usar menos pre-alcalinizante, y no lo contrario como lo muestra el modelo basado en los datos históricos, esto significa que con mayor carga orgánica en el agua es necesario mayor sulfato de aluminio granular pero se necesita menos cantidad de pre-alcalinizante debido a que el agua tiene la capacidad de neutralizar el carácter ácido de coagulante, y desestabiliza sus coloides en suspensión sin necesidad de un Pretratamiento.

Nota: La cantidad en exceso de reactivo propuesta en los dos modelos es solo una aproximación a las pérdidas reales, las cuales corroboran la existencia de un problema con la operación actual en la planta y control del coagulante en uso, estas pérdidas se debe enfocar desde una perspectiva cualitativa.

4. ANÁLISIS DE COSTOS

El análisis de costos permite evaluar los recursos monetarios necesarios para llevar a cabo la implementación o no de un nuevo coagulante. Estos análisis muestran la viabilidad financiera de cada una de las opciones de coagulante que se presentan en este trabajo.

Primero, se realiza un diagnóstico de los costos actuales de la planta (únicamente energía y sustancias químicas) y a esto, se adicionan los costos que conlleva la implementación de cada uno de los nuevos coagulantes teniendo en cuenta la dosificación, la pre-alcalinización, la energía requerida y los equipos necesarios.

4.1 DIAGNÓSTICO DE COSTOS ACTUALES

Para colocar en términos financieros todas las relaciones que se han desarrollado, se tomó como base el consumo de la planta de El Dorado y su procedencia expresados como se muestra en la **tabla 33**.

Tabla 33. Costos de la planta El Dorado a lo largo del año 2017.

Fecha	Costos Totales	Costo Insumos	Costo de Energía	Costos de Personal
Enero	\$ 469.952.565	\$ 29.847.977	\$ 21.911.165	\$ 418.193.423
Febrero	\$ 428.195.684	\$ 28.121.277	\$ 18.340.425	\$ 381.734.982
Marzo	\$ 443.285.241	\$ 33.511.452	\$ 19.792.486	\$ 389.982.303
Abril	\$ 558.583.444	\$ 34.360.336	\$ 20.310.668	\$ 503.912.440
Mayo	\$ 519.057.893	\$ 39.599.179	\$ 19.694.503	\$ 459.763.211
Junio	\$ 568.864.602	\$ 41.579.630	\$ 24.705.141	\$ 501.579.831
Julio	\$ 355.074.152	\$ 31.581.304	\$ 24.824.702	\$ 299.669.146
Agosto	\$ 384.952.307	\$ 29.311.050	\$ 17.142.374	\$ 338.498.883
Septiembre	\$ 400.059.679	\$ 33.930.348	\$ 20.637.120	\$ 344.492.211
Octubre	\$ 364.708.582	\$ 29.384.348	\$ 24.778.817	\$ 311.544.417
Noviembre	\$ 480.317.172	\$ 32.475.615	\$ 24.902.657	\$ 422.937.900
Diciembre	\$ 494.084.347	\$ 30.537.005	\$ 25.512.512	\$ 437.034.830

Fuente: PTAP EL DORADO. Empresa de Acueducto, Agua y Alcantarillado de Bogotá.

De la **tabla 33** se puede destacar que los costos significativos de la empresa están ligados al personal que la constituye; los operadores de la planta, técnicos al

servicio, mantenimiento, administrativos, personal de laboratorio, de muestreo, de aseo y seguridad, entre otros.

En cuanto a los costos de energía, estos corresponden a la distribución de electricidad a toda la planta y equipos usados en el proceso de tratamiento y administración de la misma (computadores, y demás aparatos electrónicos), representando un 4.84% del costo total de la operación de la planta mientras que el costo de los insumos es del 7.21%; lo componen sustancias químicas usadas frecuentemente como el sulfato de aluminio granular, el cloro y la cal hidrata, y productos sustitutos y oxidantes como son la sal de mina y el MIOX.

La **tabla 34** muestra los precios manejados en el año 2017 para los insumos en la planta El Dorado y otras plantas de tratamiento pertenecientes a la empresa de Acueducto de Bogotá con diferentes sistemas de tratamiento.

Tabla 34. Precio por kilogramo de insumos de plantas de tratamiento del Acueducto de Bogotá para el año 2017.

Período	Sulfato de aluminio granular	Cloro	Hipo-clorito	PAC	Cal Hidratada	Bicarbonato de sodio	Sal de mina
Enero a Diciembre 2017	\$918,00	\$3074.00	\$1731.45	\$984.84	\$571.00	\$2100.00	\$250.00

Fuente: PTAP EL DORADO. Empresa de Acueducto, Agua y Alcantarillado de Bogotá.

Con referencia al consumo diario de coagulante, alcalinizante y desinfectante y según el precio presentado en la **tabla 34** se hallan los precios para los diferentes meses del año 2017, y se presentan en la **tabla 35**.

Tabla 35. Costos de los productos químicos utilizados en la PTAP El Dorado durante el año 2017.

Periodo	Costo Productos Químicos		
	Costos S.A.g*	Costos Cloro	Costos Cal Hidratada
Enero	\$ 17.510.850	\$ 7.448.302	\$ 4.182.575
Febrero	\$ 15.409.250	\$ 7.985.252	\$ 3.724.775
Marzo	\$ 19.163.250	\$ 9.523.252	\$ 4.824.950
Abril	\$ 19.575.350	\$ 9.188.186	\$ 4.594.800
Mayo	\$ 23.363.100	\$ 9.854.244	\$ 4.787.085
Junio	\$ 25.599.050	\$ 5.670.580	\$ 4.710.000
Julio	\$ 19.414.700	\$ 4.059.804	\$ 4.168.300
Agosto	\$ 21.044.150	-	\$ 3.797.150
Septiembre	\$ 19.804.850	\$ 8.459.648	\$ 4.195.100
Octubre	\$ 15.638.750	\$ 5.077.298	\$ 4.024.550
Noviembre	\$ 18.974.060	\$ 4.902.080	\$ 4.268.225
Diciembre	\$ 18.038.700	\$ 4.978.930	\$ 3.924.625

*Sulfato de aluminio granular.

Fuente: PTAP EL DORADO. Empresa de Acueducto, Agua y Alcantarillado de Bogotá.

Los costos de sulfato de aluminio son mayores para los meses de mayo y junio donde la frecuencia de días con lluvia aumenta, y a su vez la turbiedad y solidos disueltos en el agua. En agosto se probó un sustituto, sal de mina, en la desinfección por lo que no se presenta consumo de cloro aunque se pronostica un costo promedio de \$ 7.235.716 de pesos.

4.1.1 Determinación de costos de la sobredosificación (sobrecostos). La PTAP El Dorado está en la obligación no solo de cumplir con los parámetros establecidos para el agua tratada, si no también, debe estar en la capacidad de generar un equilibrio económico entre sus ingresos (según la demanda en su red de distribución) y egresos (costos operacionales, mantenimiento, energía y personal); por esta razón los cambios generados en las operaciones unitarias en el proceso están ligadas a una reducción de costos, que para el caso de la aplicación de un nuevo coagulante afecta directamente los costos de los insumos.

El diagnóstico de la planta mediante la nube de datos tomados de dosificación durante todos los días del año 2017 frente al análisis de los valores frecuentes para cada rango de turbiedad (con un diagnóstico de tendencia logarítmica, ver **gráfica 19**), nos muestra un valor aproximado de la sobredosificación que ocurre

en la planta. Con los valores máxicos teóricos y reales de coagulante y alcalinizante, y la **ecuación 18**, es posible determinar los costos en el transcurso del año, con evidencia de sobrecostos.

Ecuación 18. Costo diario de químico.

$$\text{Costo diario de químico} \left(\frac{\$ \text{ pesos}}{\text{día}} \right) = \text{consumo} \left(\frac{\text{kg}}{\text{día}} \right) * \text{precio químico} \left(\frac{\$ \text{ pesos}}{\text{kg}} \right)$$

Fuente: elaboración propia.

Se recreó el costo de alcalinizante y coagulantes para cada uno de los días del año; el costo mensual se realizó con la sumatoria del costo de cada uno de los días que los componen, y de la misma forma el costo anual.

4.1.1.1 Diagnóstico de costos del coagulante actual. Con el consumo de sulfato de aluminio que brindan los datos históricos, la relación de consumo teórico y sobredosificación hallada anteriormente, y el costo por kilogramo se puede relacionar con los costos reales de la planta como se evidencia en la **tabla 36**.

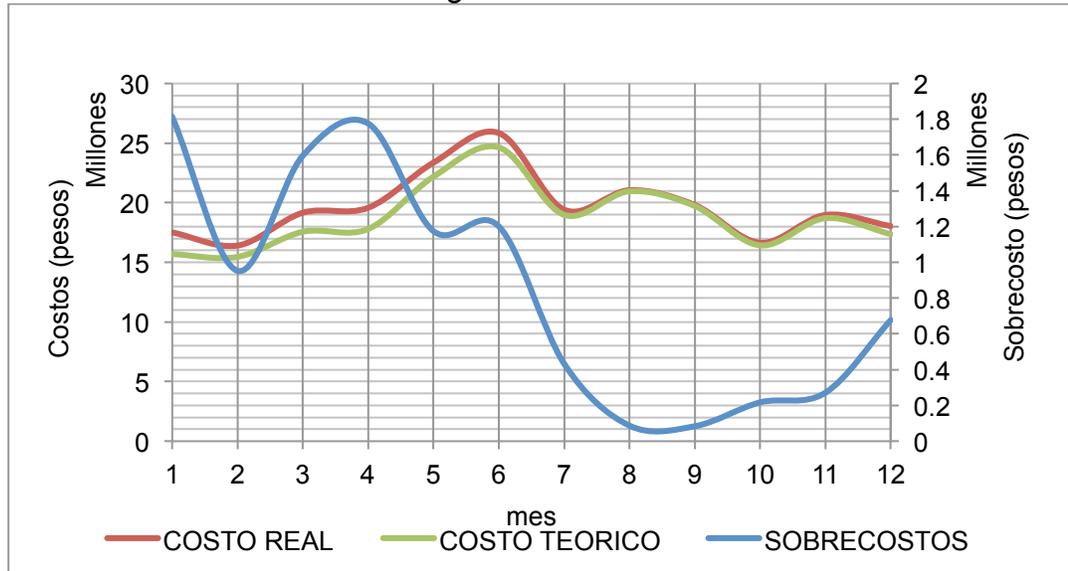
La **gráfica 34** muestra la relación entre el costo real, teórico y el sobrecosto que se genera en la planta El Dorado con el sulfato de aluminio granular como coagulante.

Tabla 36. Sobrecostos actuales de la planta El Dorado en sulfato de aluminio granular.

mes	Sobrecosto (%)	Sobrecostos	Costo real	Costo teórico
Enero	11,5675	\$ 1.814.555,23	\$ 17.510.849,99	\$ 14.694.294,77
Febrero	6,1628	\$ 952.564,03	\$ 15.409.249,99	\$ 14.455.685,96
Marzo	9,0888	\$ 1.595.591,50	\$ 19.163.249,99	\$ 17.565.658,50
Abril	9,9772	\$ 1.774.972,29	\$ 19.575.349,99	\$ 17.800.377,70
Mayo	5,2918	\$ 1.174.196,06	\$ 23.363.099,99	\$ 22.188.903,93
Junio	4,8735	\$ 1.200.862,29	\$ 24.841.699,99	\$ 24.640.837,69
Julio	2,2814	\$ 433.069,16	\$ 19.414.699,99	\$ 18.982.630,83
Agosto	0,4154	\$ 87.064,48	\$ 21.044.149,99	\$ 20.958.085,51
Septiembre	0,4242	\$ 83.665,20	\$ 19.804.849,99	\$ 19.722.184,79
Octubre	1,3223	\$ 217.146,79	\$ 15.638.749,99	\$ 15.421.603,20
Noviembre	1,4501	\$ 271.226,67	\$ 18.974.059,99	\$ 18.703.833,32
Diciembre	3,9038	\$ 677.735,03	\$ 18.038.699,99	\$ 17.360.964,96

Fuente: elaboración propia.

Gráfica 34. Sobrecostos actuales, en millones de pesos, de la planta El Dorado en sulfato de aluminio granular.



Fuente: elaboración propia.

El comportamiento es proporcional al consumo de masa de coagulante; se observan sobrecostos (eje secundario) desde \$ 1'800.000 COP en los meses de enero, marzo y abril hasta sobrecostos mínimos de \$ 83.000 COP en el mes de septiembre. Como se mencionó anteriormente la totalidad de los sobrecostos no necesariamente pueden venir de la sobredosificación, también se puede relacionar con el sobreuso de algunos equipos de dosificación por su vida útil y su grado de obsolescencia; además la frecuencia del uso de lavado de filtros también trae pérdidas económicas.

4.1.1.2 Diagnóstico de costos actuales del pre-alcalinizante. Con el consumo de cal hidrata que brindan los datos históricos, la relación de consumo teórico y sobredosificación hallada anteriormente, por medio del costo por kilogramo, se puede relacionar con los costos reales de la planta como se evidencia en **la tabla 37**.

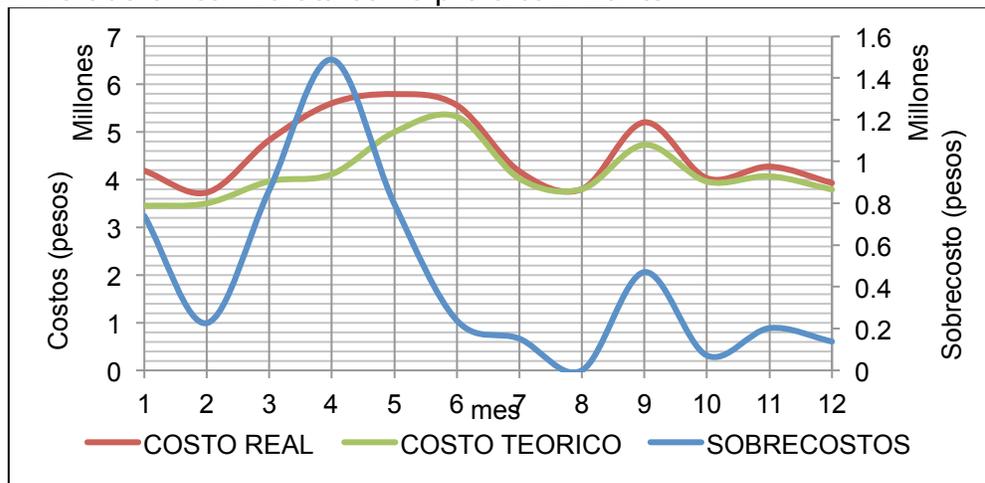
Tabla 37. Sobrecostos actuales de la planta El Dorado en cal hidrata como pre-alcalinizante.

Costo de cal hidrata como pre-alcalinizante				
Mes	Sobre-costos (%)	Sobrecostos	Costo real	Costo teórico
Enero	21,4419	\$ 738.479,33	\$ 4.182.575,00	\$ 3.444.095,67
Febrero	6,4762	\$ 225.612,97	\$ 3.724.775,00	\$ 3.499.162,03
Marzo	21,8191	\$ 864.200,19	\$ 4.824.950,00	\$ 3.960.749,81
Abril	36,2193	\$ 1.487.866,36	\$ 4.594.800,00	\$ 4.107.933,64
Mayo	15,9595	\$ 795.476,77	\$ 4.787.085,00	\$ 4.990.608,23
Junio	4,4914	\$ 238.685,93	\$ 4.552.975,00	\$ 4.314.289,07
Julio	3,7757	\$ 151.657,11	\$ 4.168.300,00	\$ 4.015.642,89
Agosto	0,0000	\$ -	\$ 3.797.150,00	\$ 3.797.150,00
Septiembre	9,9535	\$ 470.373,99	\$ 4.195.100,00	\$ 4.724.726,01
Octubre	1,7998	\$ 71.172,65	\$ 4.024.550,00	\$ 3.954.377,35
Noviembre	4,9722	\$ 202.172,77	\$ 4.268.225,00	\$ 4.065.052,23
Diciembre	3,6457	\$ 138.081,95	\$ 3.924.625,00	\$ 3.787.543,05

Fuente: elaboración propia.

Al igual que el coagulante, el pre-alcalinizante, presenta un sobrecosto excesivo en el mes de abril con pérdidas alrededor de \$ 1'500.000 COP. No se presenta un sobrecosto en el mes de agosto debido a que no se utilizó esta sustancia, y unos valores bajos entre \$ 70.000 COP y \$ 200.000 COP para los meses de julio, octubre, noviembre y diciembre.

Gráfica 35. Sobrecostos actuales, en millones de pesos de la planta El Dorado en cal hidrata como pre-alcalinizante.



Fuente: elaboración propia.

4.1.1.3 Sobrecostos actuales de coagulante y pre-alcalinizante. A partir de los datos anteriores, se pueden determinar los costos totales de coagulante y pre-alcalinizante en el proceso de potabilización en la PTAP El Dorado, como se muestra en la **tabla 38**.

Tabla 38. Sobrecostos totales de sulfato de aluminio granular y cal hidrata como pre-alcalinizante en PTAP El Dorado para el año 2017.

mes	Costo total de sulfato de aluminio y cal hidrata		
	Sobrecostos	Costo real	Costo teórico
Enero	\$ 2.554.034,56	\$ 21.693.424,99	\$ 19.139.390,44
Febrero	\$ 1.179.177,00	\$ 20.134.024,99	\$ 18.954.848,00
Marzo	\$ 2.460.791,69	\$ 23.988.199,99	\$ 21.527.408,30
Abril	\$ 3.263.838,65	\$ 24.172.149,99	\$ 21.908.311,34
Mayo	\$ 1.970.672,82	\$ 29.150.184,99	\$ 27.179.512,17
Junio	\$ 1.439.548,23	\$ 31.394.674,99	\$ 29.954.126,76
Julio	\$ 584.726,27	\$ 23.583.999,99	\$ 22.999.273,73
Agosto	\$ 87.064,48	\$ 24.842.299,99	\$ 24.754.235,51
Septiembre	\$ 554.039,19	\$ 24.001.949,99	\$ 24.447.910,80
Octubre	\$ 288.319,44	\$ 20.664.299,99	\$ 20.374.980,55
Noviembre	\$ 473.399,45	\$ 23.243.284,99	\$ 22.769.885,55
Diciembre	\$ 814.816,98	\$ 21.964.324,99	\$ 21.148.508,01

Fuente: elaboración propia.

Los sobrecostos determinados, llegan a representar el 13% de los costos de compra del coagulante y el pre-alcalinizante, lo que genera pérdidas significativas para la empresa. Posiblemente con el uso de otro compuesto o polímero, y optimizando la operación y control se eliminarían las pérdidas económicas presentes en la planta y estabilizarían los parámetros en cada una de las etapas del proceso de tratamiento de agua en la planta El Dorado.

El sobrecosto, a partir de los datos históricos del año 2017, con el coagulante actual, es de \$14.671.428,75 COP por cada año de operación de la planta, lo que requiere plantear una estrategia interna para optimizar el proceso, con el uso de los mismos químicos y equipos, reestructurando los sistemas de control en la adición del coagulante y el pre-alcalinizante debido a que el pH tiene una relación con los compuestos orgánicos disueltos en el agua, pero no en la totalidad de las magnitudes de turbiedad y características del agua cruda que entra al proceso en el año.

4.2 PRONÓSTICO DE COSTOS DEL SULFATO DE ALUMINIO GRANULAR

Los valores históricos y los valores frecuentes en el rango de turbiedad para la dosificación de los químicos presentan un patrón aproximado y sobrecostos en su análisis, aunque existe otra forma de corroborar la existencia de un déficit en la operación de adición de coagulante la cual surge a partir del desarrollo experimental. Es necesario resaltar que las expresiones teóricas linealizadas determinadas a partir del test de jarras, son un valor aproximado que cambia al escalarse a la planta real.

Según la expresión de dosificación ideal de cal hidrata y sulfato de aluminio granular en función de la turbiedad del agua cruda y con las ecuaciones de consumo y costo diario de sustancia química se obtiene los costos durante el año representados en la **tabla 39**.

Tabla 39. Representación de costos teóricos de sulfato de aluminio granular por año.

Estudio de costos teóricos de sulfato de aluminio granular con los datos experimentales		
Fecha	Costo coagulante	Costo alcalinizante
Enero	\$ 16.523.830,48	\$ 5.112.436,27
Febrero	\$ 15.811.073,61	\$ 4.668.652,29
Marzo	\$ 17.551.496,39	\$ 4.758.552,36
Abril	\$ 17.132.209,05	\$ 4.546.366,73
Mayo	\$ 21.295.509,56	\$ 3.058.791,34
Junio	\$ 23.817.270,58	\$ 1.843.106,38
Julio	\$ 18.278.486,23	\$ 4.319.813,62
Agosto	\$ 19.999.619,75	\$ 3.587.393,48
Septiembre	\$ 19.395.735,44	\$ 3.679.236,83
Octubre	\$ 17.708.206,55	\$ 4.812.000,67
Noviembre	\$ 18.061.737,68	\$ 4.097.578,44
Diciembre	\$ 17.366.063,02	\$ 4.662.536,42
Subtotal	\$ 222.941.238,34	\$ 49.146.464,83
Total Costos Insumo	\$ 272.087.703,18	

Fuente: elaboración propia.

El sobrecosto a partir de los datos experimentales con el coagulante actual es de \$18.745.116,70 COP por cada año de operación de la planta, en comparación al sobrecosto a partir de los datos históricos, estos tienen valores bastante cercanos lo que involucra que:

- Los valores de sobrecosto anual rondan entre los 14.6 y 18.7 millones de pesos, como pérdidas de la empresa de Acueducto Y Alcantarillado de Bogotá.
- El sulfato de aluminio granular en los datos históricos tiene un comportamiento logarítmico y en el análisis experimental se asume la dosificación ideal con un comportamiento lineal; esta aproximación es válida debido a que arrojan valores similares de sobrecosto anual.

4.3 PRONÓSTICO DE COSTOS DEL SULFATO DE ALUMINIO LÍQUIDO

Según la expresión de dosificación ideal de cal hidrata y sulfato de aluminio líquido en función de la turbiedad del agua cruda y con las ecuaciones de consumo y costo diario de la sustancia química se obtiene el pronóstico de los costos durante un año representados en la **tabla 40**.

Tabla 40. Costos teóricos de sulfato de aluminio líquido, por año.

Estudio de costos teóricos de sulfato de aluminio líquido con los datos experimentales		
Fecha	Costo coagulante	Costo alcalinizante
Enero	\$ 19.910.625,52	\$ 714.569,09
Febrero	\$ 19.325.383,67	\$ 723.485,92
Marzo	\$ 21.972.271,86	\$ 878.597,43
Abril	\$ 21.568.099,67	\$ 875.143,09
Mayo	\$ 30.082.790,21	\$ 1.563.261,49
Junio	\$ 35.898.462,56	\$ 2.075.666,81
Julio	\$ 23.661.597,41	\$ 1.028.168,20
Agosto	\$ 27.285.687,10	\$ 1.327.755,50
Septiembre	\$ 26.216.499,43	\$ 1.252.035,20
Octubre	\$ 22.155.020,40	\$ 884.491,00
Noviembre	\$ 23.590.589,38	\$ 1.046.415,73
Diciembre	\$ 21.796.188,84	\$ 877.456,88
Subtotal	\$ 293.463.216,05	\$ 13.247.046,32
Total Costos Insumo	\$ 306.710.262,37	

Fuente: elaboración propia.

La implementación de el sulfato de aluminio líquido generaría mayor costo anual que el coagulante actual de operación de la planta debido a que aunque este no requiere gran cantidad de pre-alcalinizante, necesita aproximadamente el doble de

masa que el coagulante actual, lo que genera mayor costo; es importante resaltar que el precio por kilogramo de sulfato de aluminio líquido es hasta de 26% menor al precio por kilogramo de sulfato de aluminio granular.

4.4 PRONÓSTICO DE COSTOS DEL HIDROXICLORURO DE ALUMINIO (PAC)

Según la expresión de dosificación ideal de cal hidrata y PAC en función de la turbiedad del agua cruda y con las ecuaciones de consumo y costo diario de la sustancia química se obtiene el pronóstico de los costos durante un año representados en la **tabla 41**.

Tabla 41. Costos teóricos de hidroxiclорuro de aluminio, por año.

Estudio de costos teóricos de hidroxiclорuro de aluminio con los datos experimentales		
Fecha	Costo coagulante	Costo alcalinizante
Enero	\$ 17.726.938,14	\$ -
Febrero	\$ 16.962.285,12	\$ -
Marzo	\$ 18.829.428,87	\$ -
Abril	\$ 18.379.613,03	\$ -
Mayo	\$ 22.846.045,35	\$ -
Junio	\$ 25.551.416,95	\$ -
Julio	\$ 19.609.351,17	\$ -
Agosto	\$ 21.455.801,22	\$ -
Septiembre	\$ 20.807.947,81	\$ -
Octubre	\$ 18.997.549,17	\$ -
Noviembre	\$ 19.376.821,06	\$ -
Diciembre	\$ 18.630.494,02	\$ -
Subtotal	\$ 239.173.691,91	\$ -
Total Costos Insumo	\$	239.173.691,91

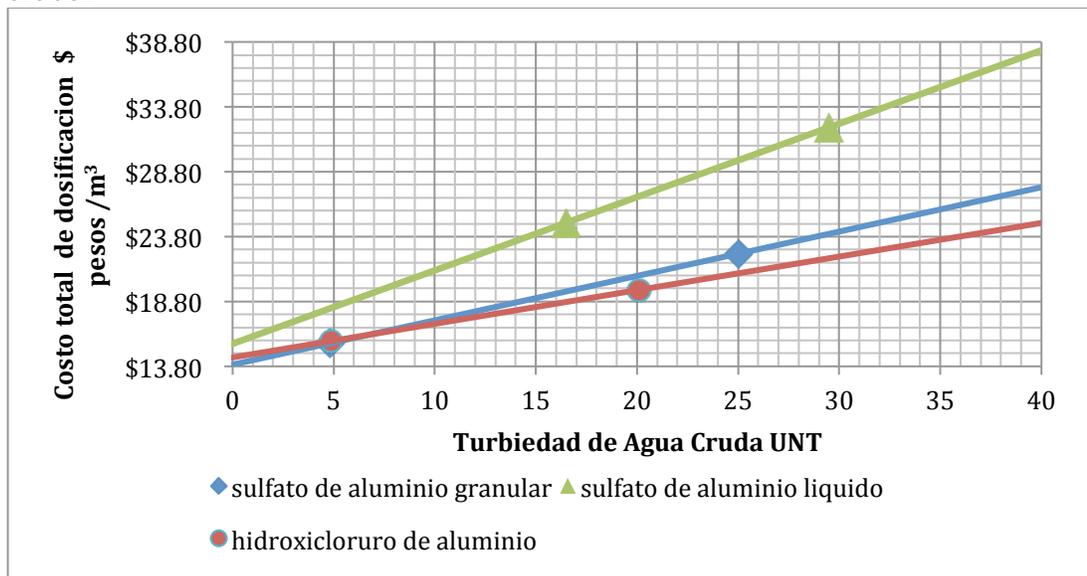
Fuente: elaboración propia.

Este coagulante tiene un mayor costo por kilogramo que el actual en operación en la PTAP El Dorado, por esta razón los costos anuales de coagulante son mayores, pero, debido a que se elimina la necesidad de utilizar pre-alcalinizante, los costos totales (coagulante y pre-alcalinizante) son menores a los del sulfato de aluminio tanto granular como líquido.

4.5 COMPARACIÓN Y SELECCIÓN DEL COAGULANTE

La selección del coagulante que se adapte mejor al proceso debe tener la capacidad de desestabilizar y reducir los contaminantes disueltos en el agua, esto combinado a la forma más económica de realizarlo. Teniendo en cuenta el consumo de coagulante y alcalinizante se logra obtener el costo final (en pesos colombianos) de dosificación de cada coagulante por cada metro cubico de agua que se quiera tratar teniendo en cuenta la turbiedad del agua cruda. El costo final incluye el costo de coagulante y el costo de la cal hidrata que se requiere para cada uno. La **gráfica 35** muestra los costos de coagulación dependiendo de la turbiedad a la entrada del proceso.

Gráfica 35. Relación de costos de coagulación con la turbiedad del agua cruda.



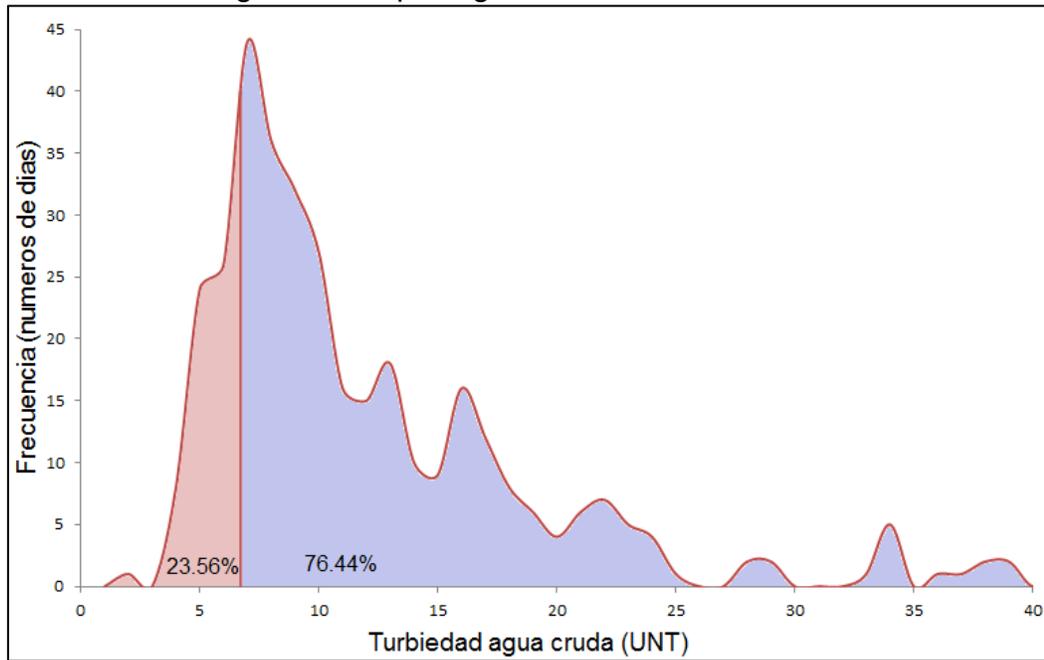
Fuente: elaboración propia.

El coagulante que tiene mejor desempeño y minimiza los costos de coagulación es el **Hidroxicloriguro de Aluminio (PAC)** debido a que a medida que aumenta la turbiedad genera menor costo que los otros coagulante.

El análisis de la gráfica muestra que en los valores de turbiedad del agua cruda que son menores a 5.71 UNT, el menor costo de dosificación es del **sulfato de aluminio granular** por lo que se puede realizar una operación de coagulación en conjunto, en los periodos de tiempo donde la turbiedad este entre 2.0 y 5.7 UNT se puede trabajar con sulfato de aluminio granular y en turbiedades superiores a 5.7 UNT se logra una reducción de costos utilizando el hidroxicloriguro de aluminio.

Para analizar la importancia de un operación conjunta del coagulante actual e hidroxiclóruo de aluminio se obtiene la frecuencia de las turbiedades en el transcurso del año y se representa como se muestra en la **gráfica 36**.

Gráfica 36. Representación de la frecuencia de distintos valores de turbiedad en el agua cruda que ingresa a la PTAP El Dorado.



Fuente: elaboración propia.

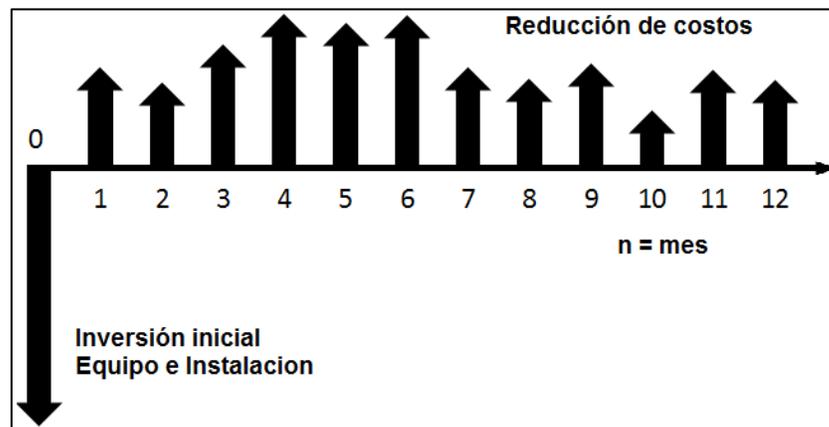
Donde los valores de turbiedad menores a 5.71 UNT representan aproximadamente el 23.56% de días del año mientras que los valores mayores a 5.71 UNT representan el 76.44% de los días en el año. Los costos de tratamiento se reducirían manteniendo el sistema de operación y control de la planta habilitado para trabajar con los dos tipos de coagulantes.

5. EVALUACIÓN FINANCIERA

Esta evaluación financiera tiene como objetivo analizar la viabilidad financiera del proyecto de inversión, demostrando que las inversiones previstas tendrán por efecto mejorar la calidad, eficacia y eficiencia del servicio. Esta evaluación se encarga de la modernización parcial y/o sustitución de infraestructuras existentes, con arreglo a las normas y disposiciones legales ⁴⁶.

La evaluación financiera se realiza mediante la planificación con el flujo de efectivo en periodos mensuales donde el consumo será proporcional a la cantidad de días de lluvia (precipitación); el ahorro con la reducción de costos implementando el nuevo coagulante son los ingresos, y los costos iniciales de inversión serán los egresos. Ver **figura 30**.

Figura 30. Forma general de flujo de efectivo para evaluación financiera.



Fuente: elaboración propia.

El análisis de viabilidad del proyecto se determina con el valor presente neto (VPN), donde se analiza el periodo en el que los ingresos cubren la inversión inicial, y la factibilidad del proyecto con un horizonte de planeación de 5 años.

La metodología de la empresa de Acueducto, Agua y Alcantarillado de la ciudad de Bogotá establece una tasa de inversión, tasa de oportunidad o tasa de retorno sobre el capital invertido, la cual se encuentra dentro del rango del 9 % al 14 %; se

⁴⁶ FLORIO, Massimo., FINZI, Ugo., GENCO, Mario., LEVARLET, François., MAFFII, Silvia., TRACOGNA, Alessandra. Y VIGNETTI, Silvia. Guía del análisis costes-beneficios de los proyectos de inversión. Fondos estructurales – FEDER, Fondo de cohesión fondos. 2003.

optó por el 14 %, debido a que es un porcentaje que se está sobreestimado, teniendo en cuenta un nivel de riesgo alto en la inversión⁴⁷.

5.1 EQUIPOS PROPUESTOS PARA EL CAMBIO DE COAGULANTE

La ruta de dosificación del hidroxiclورو de aluminio puede ser de manera directa o por medio de una dilución previa, la cual tiene una serie de ventajas y desventajas presentadas en la **tabla 42**.

Tabla 42. Ventajas y desventajas de dosificación directa o por disolución del hidroxiclورو de aluminio.

Dosificación directa	Dosificación por disolución
<ul style="list-style-type: none"> • Genera menos pérdidas de coagulante por entrar en contacto directo con el agua. • Los tanques de dilución funcionaria como coagulación simultánea con el sulfato de aluminio granular. • La mezcla rápida en la canaleta Parshall puede ser insuficiente para la homogenización de la mezcla • Existe mayor control en la cantidad de coagulante dosificado, el flujo del coagulante se controla en la dosificación del agua 	<ul style="list-style-type: none"> • Puede generar pérdidas al momento de disolución en los tanques de disolución. • La disolución en cada tanque es única para cada especie y no se puede usar simultáneamente. • La disolución previa ayuda a la homogeneidad de la mezcla en el agua a tratar. • Necesita control de flujo del coagulante al tanque de disolución y además el flujo de la disolución al agua a tratar, lo implica que el sistema de dosificación falle, sin una operación conjunta con el tanque de disolución.

Fuente: elaboración propia.

La selección del tipo de dosificación (directa o por disolución) requiere estudios previos del comportamiento del coagulante en la planta a escala real.

⁴⁷ ENDEMANN VANEGAS, Marianne. Y BULLA BELTRÁN, Aureliano. Análisis sobre la adopción del nuevo marco regulatorio a fin de establecer su efecto en las tarifas de acueducto y alcantarillado en Bogotá. Bogotá D.C.: Contraloría de Bogotá D.C., 2004. Disponible en: < www.contraloriabogota.gov.co >

5.1.1 Bomba de dosificación para PAC. Con el desarrollo diario del consumo de hidroxiclorigerato de aluminio se encontró que la capacidad de dosificación del coagulante será de 441.91 a 1185.53 kilogramos por día, lo que traduce a una capacidad de la bomba entre 13.74 y 35.89 litros por hora; la capacidad máxima debe ser mayor en caso de que se requiera.

En la planta El Dorado hay 3 tanques de disolución del coagulante con sus respectivos dosificadores volumétricos en seco, para seguir con este criterio se planea la adquisición de 3 bombas con caudal máximo superior a 40 litros por hora, las cuales estén en la capacidad de dosificar fluidos viscosos.

La empresa contactada, que cumple con las especificaciones de dosificación es *JCP Supplies* dedicada a atender los suministros de repuestos y partes de equipos de bombeo del sector petrolero, industrias químicas, alimenticias y farmacéuticas. En la **figura 31** se muestra la bomba dosificadora de solenoide-diafragma que se debe utilizar MAGDOS DE/DX 100, que tiene las siguientes características se según la hoja técnica de la bomba:

- Adecuado para medios tóxicos, viscosos y agresivos.
- El caudal @ presión máxima es de 115 LPH.
- Alimentación de tensión 115 V o 230 V \pm 10%.
- Consumo de energía 230 V: 70 W, 115 V: 66 W.
- Longitud de carrera ajustable 0 - 100%.
- Frecuencia de carrera ajustable de 70 / min.
- Conmutable a control externo (por ejemplo, medidor de agua).
- Conexión para monitoreo de nivel con alarma de advertencia temprana.
- Entrada de control de pulso y nivel aislada eléctricamente.
- Relé de señalización de fallas y / o pantalla digital (opcional).
- Válvulas de doble bola para mayor precisión.

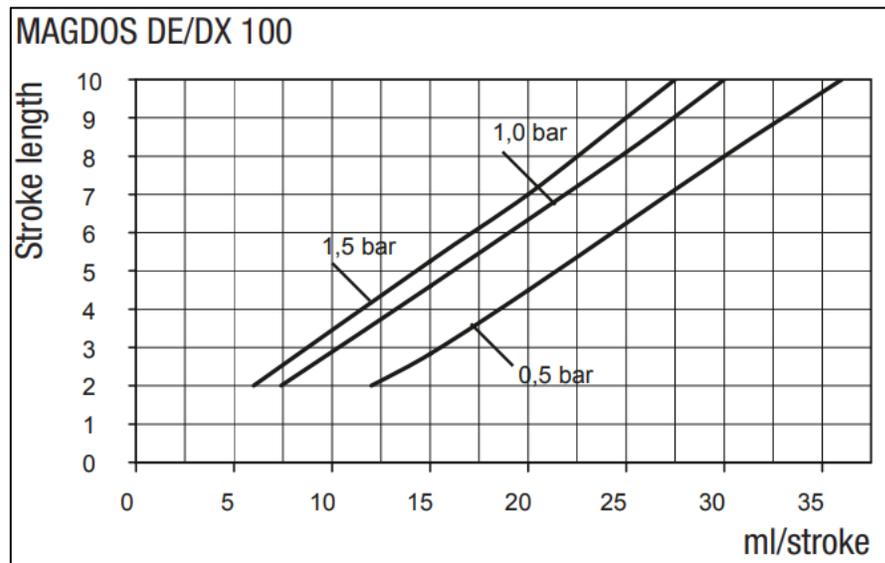
Figura 31. Bomba dosificadora MAGDOS DE/DX 100.



Fuente: Empresa JCPsupplies, División de Dosificación de Químicos, manual de bomba MAGDOS DE/DX 100.

El flujo volumétrico se regula por medio de la presión y la longitud de la carrera ajustable en que se encuentre, teniendo en cuenta que aumenta la presión, el flujo volumétrico decrece de la forma en que se muestra en la **gráfica 37**.

Gráfica 37. Flujo volumétrico en relación con la presión de la bomba MAGDOS DE/DX 100.



Fuente: Empresa JCPsupplies, División de Dosificación de Químicos, manual de bomba MAGDOS DE/DX 100.

El flujo volumétrico que se puede trabajar está dado por la **ecuación 19**:

Ecuación 19. Flujo volumétrico.

$$Flujo \left[\frac{L}{hora} \right] = \left(\frac{stroke\ length}{10} \right) * \left(\frac{mL}{stroke} \right) * \frac{70}{min} * \frac{60min}{1hora} * \frac{1L}{1000mL}$$

Fuente: elaboración propia.

Los límites de flujo mínimo y máximo son de 10.416 L/h a presión de 0.5 bares y de 114.08 a presión de 1,5 bares. La dosificación se da a una presión atmosférica de 0.74661 bares (presión atmosférica Bogotá) sin cabeza de presión (no existe diferencia de altura significativa).

Para la automatización del proceso se puede conectar a la sala de operación mediante un control externo, y manipular el caudal según los requerimientos del sistema de tratamiento y el caudal de agua.

5.1.2 Tanques de almacenamiento. El sulfato de aluminio granular y la cal hidrata manejados en la planta son insumos solidos por lo que su manejo y almacenamiento se da en bolsas de 50 kilogramos, para la implementación del hidroxicloriguro de aluminio hay dos formas de hacerlo:

- Tanques proporcionados por la empresa P.Q.P, los cuales llegan directamente a la planta con ciertas especificaciones de volumen, e incrementan el precio por kilogramo del PAC.
- Carro tanques con el coagulante, los cuales lo depositan en tanques plásticos instalados en la planta. De esta forma se reduce el costo del PAC.

Según los pronósticos determinados en este proyecto, se concluye que tener un inventario de aproximadamente 20000 litros de coagulante es suficiente. Para la planificación de la inversión se estudia la obtención de 4 tanques de capacidad individual de 5000 litros marca COLEMPAQUES, tal como se muestra en la **figura 32**.

Figura 32. Tanque de almacenamiento de COLEMPAQUES.



Fuente: Tienda HOMECENTER. [En Línea] [Citado 24 de mayo del 2018]: Disponible en:<
<http://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/04712/Tanque-5000-Litros/04712>>.
Modificado por los autores.

Este tanque cuenta con materiales anticorrosivos, lo cual es factible debido a que el hidroxicloriguro de aluminio es un polímero ácido con propiedades corrosivas.

5.1.3 Sistema eléctrico e instalación. La consolidación del presupuesto para la inversión inicial debe tener no solo los costos de los equipos básicos, sino también los costos de las líneas hidráulicas y eléctricas, adecuación de las instalaciones, y posibles adquisiciones de materiales necesarios para el control de la dosificación. Para ello se debe tener un presupuesto aproximado que cubra estos gastos asumiendo que el personal de la planta está capacitado para realizar la instalación.

Para fines prácticos del análisis financiero, estos costos fueron asumidos por un valor de \$5'000.000 COP.

5.2 COSTOS DE INVERSIÓN INICIAL

Los costos iniciales de inversión de los equipos según la información brindada de diferentes fuentes como *JCP Supplies* para las bombas y *Homecenter* para los tanques de almacenamiento se muestran en la **tabla 43**.

Tabla 43. Costos por unidad y totales de requerimientos técnicos para implementación de nuevo coagulante.

	valor producto/unidad	Can t.	valor producto+ IVA /unidad	Valor total ítem
Bombas de dosificación (incluye kit de mantenimiento, válvulas de inyección y de descarga, <i>display</i> digital, y adicionalmente un sensor de <i>strokes</i>)	\$ 5.324.210	3	\$ 7.527.000	\$ 22.581.000
Tanque de almacenamiento	\$ 2.288.636	4	\$ 2.723.476	\$ 10.893.905
Sistema eléctrico e instalación	\$ 4.000.000	N.A	\$ 4.950.000	\$ 4.950.000
costo de inversión inicial (equipos e instalación)				\$ 39.424.905

Fuente: elaboración propia.

El costo de inversión inicial en la planificación de flujo de efectivo representan los egresos de la empresa.

5.3 FLUJO DE EFECTIVO

El flujo de efectivo en un proyecto de inversión es el efectivo recibido o expendido considerando los gastos en inversión de capital que beneficiarán el negocio a futuro. El flujo de efectivo consta de cuatro variables fundamentales:

- Entradas: es todo el efectivo que ingresa a la empresa, representado en ganancias. Para el caso de estudio las entradas representan el ahorro de costos de insumos al sustituir el coagulante.
- Salidas: es todo el efectivo que sale de la empresa, representado costo y pérdidas. Para el caso de estudio las salidas representan los costos de inversión de equipos e instalación.
- Periodo: es la variable independiente del sistema, los periodos tienen la particularidad de poseer un flujo neto de efectivo, el periodo representados en este flujo de caja es mensual.
- Tasa de inversión: es la tasa de interés mínima a la que el acueducto de Bogotá, está dispuesto a ganar al invertir en un proyecto. La tasa de inversión se estima mediante la DTF y el porcentaje de nivel de riesgo que toma la empresa. Asumiendo un nivel de riesgo alto la tasa de interés que maneja el acueducto es de 14% anual o 1.0979% mensual. Ver **ecuación 20**.

Ecuación 20. Tasa de interés mensual.

$$i_{em} = (1 + i_{ea})^{1/12} - 1 = 1.0979\%$$

Fuente: elaboración propia.

Para el desarrollo del análisis del flujo de efectivo se tuvieron en cuenta las siguientes aproximaciones:

- No se aplica la inflación en el costo de los productos anuales debido a que también incrementan los ingresos y beneficios, los cuales no se pueden cuantificar en este proyecto.
- La demanda diaria para el horizonte de planeación de 2019 a 2023 se toma igual que la registrada en el año 2017, lo que quiere decir que se toma el mismo caudal y turbiedad de cada uno de los días respectivamente, lo que involucraría un ingreso mensual constante para los 5 años de estudio. Esto es debido a que se puede presentar un aumento de consumo (aumento de población), así como un aumento en el costo de materias primas, los cuales no se conocen con exactitud.
- El flujo de efectivo no muestra el flujo neto en el consumo de energía porque no existe forma de cuantificar estos valores con los equipos actuales.

- El proyecto se inicia el primero de enero del año 2019, por lo que las instalaciones deben estar adecuadas, en funcionamiento y con todos los estudios preliminares antes de esa fecha.

Según las consideraciones anteriores se compararán las salidas y entradas de efectivo con el valor presente neto y el calor presente neto acumulado por medio de las **ecuaciones 21, 22 y 23**:

Ecuación 21. Periodo.

$$\text{periodo} = \eta(\text{mes})$$

Fuente: elaboración propia.

Ecuación 22. Valor presente neto.

$$VPN(\eta) = \frac{\text{flujo de efectivo en } \eta}{(1 + i_{em})^\eta}$$

Fuente: elaboración propia.

Ecuación 23. Valor presente neto acumulado.

$$VPN \text{ acumulado}(\eta) = \sum_{i=0}^{\eta} VPN(i)$$

Fuente: elaboración propia.

Cuando el valor presente neto acumulado tiene un flujo de salida negativo, significa que los ingresos no alcanzan a cubrir el valor de la inversión inicial en ese periodo de tiempo, si el valor presente neto acumulado pasa a ser un valor positivo, significa que se cubrió el costo de la inversión y está generando ganancias descontando la tasa de inversión.

La **tabla 44** muestra el flujo de efectivo para el primer año de funcionamiento del proyecto.

Tabla 44. Flujo de efectivo para el primer año (2019) del proyecto.

año	mes	Flujo de efectivo	VPN	VPN ACUMULADO
2018	diciembre	-\$ 39.424.905,00	-\$ 39.424.905,00	-\$ 39.424.905,00
2019	Enero	\$ 3.965.486,85	\$ 3.923.412,2890	-\$ 34.501.492,7110
	Febrero	\$ 3.172.739,88	\$ 3.104.204,5073	-\$ 32.397.288,2037
	Marzo	\$ 4.158.771,12	\$ 4.992.522,6873	-\$ 27.404.765,5164
	Abril	\$ 5.792.536,96	\$ 5.502.250,9490	-\$ 20.902.514,5674
	Mayo	\$ 5.304.139,64	\$ 4.969.190,9171	-\$ 14.933.323,6503
	Junio	\$ 5.757.633,04	\$ 5.329.103,2276	-\$ 8.604.220,4227
	Julio	\$ 3.974.648,82	\$ 3.682.173,6491	-\$ 4.922.046,7736
	Agosto	\$ 3.385.498,77	\$ 3.103.232,7868	-\$ 1.818.813,9868
	Septiembre	\$ 4.194.002,18	\$ 3.801.456,3949	\$ 1.982.642,4081
	Octubre	\$ 1.665.750,82	\$ 1.494.341,8827	\$ 3.475.984,2908
	Noviembre	\$ 3.865.463,93	\$ 3.428.871,2834	\$ 5.904.855,5742
	Diciembre	\$ 3.333.830,98	\$ 2.924.413,1375	\$ 9.830.268,7117

Fuente: elaboración propia.

Según los valores arrojados por el flujo de efectivo, la inversión se cubre a partir del mes de septiembre del primer año de la puesta en marcha del proyecto, lo que implica que a partir de este mes el flujo de efectivo neto es positivo; generando ganancias para la planta.

La evaluación anterior nos muestra que el proyecto es **viable económicamente**, para cuantificar la viabilidad y rentabilidad del proyecto en un horizonte de planeación de 5 años, se realiza el procedimiento partiendo de los valores arrojados en el flujo de efectivo del primer año y las expresiones anteriores para los siguientes años, manteniendo constante el volumen diario tratado, turbiedad y los precios del hidroxiclورو de aluminio y la cal hidrata.

En la **tabla 45** se presentan los valores de Valor presente neto acumulado para cada uno de los meses del horizonte de planeación total del proyecto a cinco años.

Tabla 45. Valores de VPN acumulado para cada uno de los meses del horizonte de planeación total del proyecto (5 años).

mes	ingresos	año	VPN ACUMULADO						
Enero	\$3.965.487	2020	\$13.271.858	2021	\$55.054.500	2022	\$93.584.010	2023	\$125.504.633
Febrero	\$3.172.740		\$14.994.845		\$58.444.084		\$94.680.259		\$128.343.571
Marzo	\$4.158.771		\$20.374.251		\$62.284.668		\$99.050.070		\$131.299.545
Abril	\$5.792.537		\$25.077.980		\$67.288.939		\$103.438.904		\$134.149.400
Mayo	\$5.304.140		\$31.314.112		\$71.882.038		\$107.467.938		\$138.683.640
Junio	\$5.757.633		\$35.864.957		\$75.752.077		\$111.739.902		\$142.430.977
Julio	\$3.974.649		\$40.094.934		\$79.584.390		\$114.224.265		\$144.611.119
Agosto	\$3.385.499		\$42.818.068		\$81.973.227		\$115.319.858		\$145.448.482
Septiembre	\$4.194.002		\$45.152.679		\$84.898.325		\$118.884.733		\$148.699.250
Octubre	\$1.665.751		\$47.463.505		\$85.048.172		\$119.894.371		\$149.584.020
Noviembre	\$3.865.464		\$50.471.287		\$88.685.577		\$122.208.762		\$151.614.187
Diciembre	\$3.333.831		\$53.035.561		\$90.935.818		\$124.182.658		\$153.344.674

Fuente: elaboración propia.

La sustitución del sulfato de aluminio granular, coagulante actual en la planta El Dorado, podría generar un ingreso total de \$153.344.674 COP, lo que representa un 389% la inversión inicial, cuya recuperación se da en los primeros tres cuartos del primer año. Los valores presentados en este análisis financiero no son exactos a los que se pueden obtener en la planta, debido a que se asumieron variables técnicas equivalentes a los registros del 2017 como es las características del agua a la entrada del procesos, el caudal, condiciones ambientales; y variables financieras no se tomaron en cuenta como incremento en precio unitario, cambio de distribuidor, desarrollo de mercado etc. Sin embargo la evaluación financiera desarrollada en este capítulo funcionan como una aproximación válida que muestra la viabilidad del proyecto.

6. CONCLUSIONES

- Los procesos de coagulación y floculación son fundamentales en el tratamiento de aguas, ya que de estos depende en gran medida el cumplimiento de las normas para agua potable, ya sean nacionales o internas de la empresa. La escogencia de un coagulante adecuado para el proceso es una decisión fundamental para garantizar las mejores condiciones de operación y una óptima calidad del agua resultante del tratamiento.
- La planta de tratamiento de agua potable, El Dorado, actualmente utiliza como coagulante el sulfato de aluminio granular, un coagulante convencional, el cual genera altas pérdidas monetarias debido a las sobredosificaciones que se llevan a cabo y la alta cantidad necesaria en épocas de precipitaciones. Para el correcto funcionamiento de este coagulante, es necesario llevar a cabo una pre-alcalinización en el agua cruda, lo que también genera costos adicionales a la empresa.
- Para la experimentación realizada, fue necesario llevar a cabo varias pruebas de jarras debido a la alta variabilidad de las características del agua que ingresa al proceso en la PTAP El Dorado. Cada una de las pruebas realizadas arrojaron resultados similares, con cierto punto de proporcionalidad; a medida que aumentaba la turbiedad era necesario aumentar la cantidad de coagulante.
- A pesar de ser prácticamente imposible simular las mismas condiciones de funcionamiento de la planta real, a escala laboratorio, los resultados obtenidos mediante las pruebas de jarras, fueron altamente acertados debido a la similitud que arrojaron al ser escalados a planta piloto, lo cual indica que habrá una gran semejanza al momento de llevar este proyecto a escala real.
- El PAC tuvo un desempeño superior a los coagulantes convencionales a lo largo de la experimentación; este coagulante reduce los costos del proceso debido a la baja dosificación necesaria para llevar al agua cruda a cumplir con los parámetros internos de la planta, tanto para agua clarificada como para agua tratada (como se muestra en la experimentación en planta piloto).
- El análisis financiero permite determinar, mediante una aproximación, el tiempo que le tomará al proyecto estabilizarse en cuanto a los costos de operación. Este análisis es importante debido a que muestra un panorama amplio de la inversión y la recuperación de esta.
- Al analizar los resultados experimentales, técnicos y financieros, se concluye que el hidroxiclورو de aluminio es la mejor opción para la sustitución del coagulante actual de la PTAP El Dorado debido a que este posee mejores

propiedades, lo que lleva a un mejor desarrollo durante el proceso de potabilización. Además, el PAC reduce los costos del proceso debido a que se elimina la necesidad de utilizar cal hidrata como pre-alcalinizante y la cantidad de coagulante que se debe agregar es menor, obteniendo mejores resultados de agua clarificada y generando también, cierto ahorro monetario incluso en el proceso de post-alcalinización.

7. RECOMENDACIONES

- Sin importar la naturaleza o tipo de coagulante que se implemente en el proceso, es necesario llevar a cabo pruebas a nivel laboratorio (prueba de jarras) regularmente debido a los grandes cambios que experimentan las características del agua cruda que ingresa a la planta y a la naturaleza dinámica de la dosificación de los coagulantes, con el fin de garantizar su óptimo desempeño.
- Se recomienda llevar a cabo un estudio a profundidad de los procesos de cloración y tratamiento de lodos que se realizan en la potabilización de agua, debido a que es importante conocer los efectos que trae para estos procesos el uso de un nuevo coagulante como el hidroxiclorigenato de aluminio, ya que según se expresa en la literatura, el PAC como coagulante, trae consigo un proceso de tratamiento de lodos más sencillo debido a que se eliminan las precipitaciones de sulfato de aluminio granular a lo largo del proceso de potabilización⁴⁸.
- Para llevar a cabo un estudio con una mayor exactitud al comportamiento de cada una de las etapas del proceso, se recomienda a la PTAP El Dorado hacer un seguimiento a la relación del coagulante y el pre-alcalinizante con la turbiedad, pH y otros parámetros importantes para la potabilización de agua. Este seguimiento es importante realizarlo a nivel laboratorio (o planta piloto si se desea), una vez al día durante aproximadamente 8 meses o un año para lograr una mayor cercanía de los modelos matemáticos con el comportamiento real en la planta, teniendo en cuenta los cambios de las características del agua cruda que se presentan a lo largo del año.

⁴⁸ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Purificación del agua. 2da edición. Bogotá D.C.: Escuela colombiana de ingenieros, 2006.

BIBLIOGRAFÍA

ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA S.A. E.S.P. Invitación a cotizar No. Amb-015-07 suministro de sulfato de aluminio tipo B granular y líquido. [en línea].

<<http://www.amb.com.co/docs/contratos/Informe%20de%20Evaluaci%C3%B3n%20amb-015-07.pdf>> [citado el 22 de mayo de 2018]

AGUA.ORG.MX. ¿Qué es el agua?. [en línea]. < www.agua.org.mx/que-es/ > [citado el 26 de febrero de 2018].

AMBIENTUM.COM. Características físicas y organolépticas. [en línea] <http://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/aguas/Caracteristicas_fisicas_y_organolepticas.asp > [citado el 26 de febrero de 2018].

ANDÍA CÁRDENAS, Yolanda. Tratamiento de agua: Coagulación y floculación. Lima: Sedapal, 2000. Disponible en :

<http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154>

COGOLLO FLÓREZ, Juan Migue. Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclورو de aluminio. Medellín: Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, 2010. Disponible en:

<<https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25636/39133>>

DISTRIBUIDORA ALIADOS LTDA. Ficha técnica del sulfato de aluminio. [en línea]. < <http://www.distribuidoraaliados.com/portfolio-items/sulfato-de-aluminio-granulado-liquido/> > [citado el 22 de mayo de 2018].

EJEMPLODE.COM. Características Químicas del Agua. [En línea] <https://www.ejemplode.com/38-quimica/3953-caracteristicas_quimicas_del_agua.html > [citado el 26 de febrero de 2018].

EL AGUA POTABLE. La coagulación-floculación en el proceso de tratamiento. [en línea]. <<http://www.elaguapotable.com/coagulacion-floculacion.htm>> [citado el 27 de febrero de 2018].

ENCICLOPEDIA DE CARACTERÍSTICAS. Agua. [en línea]. <<https://www.caracteristicas.co/fisicas-del-agua/> > [citado el 26 de febrero de 2018].

ENDEMANN VANEGAS, Marianne. Y BULLA BELTRÁN, Aureliano. Análisis sobre la adopción del nuevo marco regulatorio a fin de establecer su efecto en las tarifas

de acueducto y alcantarillado en Bogotá. Bogotá D.C.: Contraloría de Bogotá D.C., 2004. Disponible en: < www.contraloriabogota.gov.co >

FLORIO, Massimo., FINZI, Ugo., GENCO, Mario., LEVARLET, François., MAFFII, Silvia., TRACOGNA, Alessandra. Y VIGNETTI, Silvia. Guía del análisis costes-beneficios de los proyectos de inversión. Fondos estructurales – FEDER, Fondo de cohesión fondos. 2003.

FYNDECOL. Potabilización de agua en Colombia. [en línea]. <<https://tratamientodeagua.co/agua-potable/potabilizacion-agua-colombia/>> [citado el 26 de febrero de 2018]

HERNÁNDEZ, M. A., Y SÁNCHEZ CONTRERAS, T. Procedimiento: Operación normal, parada y reinicio de la Planta El Dorado. Bogotá D.C.: Acueducto, agua, alcantarillado y aseo de Bogotá. 2017.

HIDROJING. Canal Parshall, casi cien años midiendo caudales. [en línea]. <<http://www.hidrojing.com/canal-parshall-casi-cien-anos-midiendo-caudales>> [citado el 2 de marzo de 2018].

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Sexta actualización, 1 ed. Bogotá: ICONTEC, 2008. 33p.

_____. Referencias bibliográficas, contenido, forma y estructura. NTC 5613. 1 ed. Bogotá: El instituto, 2008. 38 p.

_____. Referencias documentales para fuentes de información electrónicas. NTC 4490. 1 ed. Bogotá: El Instituto, 2008. 23 p.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES – IDEAM. Número medio de días con lluvia, promedio mensual multianual 1981-2010. República de Colombia. 2014.

LA VOZ. Tipos de agua disponibles en la naturaleza. [en línea]. <<http://www.lavoz.com.ar/agua/tipos-agua-disponibles-naturaleza>> [citado el 26 de febrero de 2018]

MATIZ CORREA, Leonardo Fabio. Optimización del proceso de floculación en la planta de tratamiento de agua potable El Dorado de Bogotá. Bogotá D.C., 2008. Trabajo de grado (ingeniero ambiental). Universidad de los Andes. Facultad de ingeniería. Departamento de ingeniería civil y ambiental. Disponible en: <http://oab2.ambientebogota.gov.co/apc-aa-files/57c59a889ca266ee6533c26f970cb14a/Optimizaci%F3n_proceso_floculaci%F

[3n_planta_%20tratamiento_%20aguapotable%20Dorado%20_Bogot%E1.pdf.PDF](#)
>

MECÁNICA DE FLUIDOS. Flujo en canales abiertos. [en línea]. <
<http://mecanicafluidos7mo.blogspot.com/2008/04/flujo-en-canales-abiertos.html> >
[citado el 11 de marzo de 2018].

MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO. DIRECCIÓN DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico (RAS-2000). Bogotá D.C.: 2000. (Vol. TÍTULO C. Sistemas de potabilización).

QUINSA, QUÍMICA INTEGRADA S.A. Sulfato de Aluminio Granulado Tipo B. Ficha Técnica. [En línea].
<<http://quinsa.com.co/modulos/pagina/vista/producto/index.php?id=7> > [Citado el 12 de mayo de 2018].

RODRIGUEZ PEÑA, Carlos. Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de agua. Bogotá D.C.: Santafé de Bogotá: Universidad distrital, 1994.

ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Purificación del agua. 2da edición. Bogotá D.C.: Escuela colombiana de ingenieros, 2005.

SECRETARÍA DISTRITAL DE SALUD. Mapa de riesgo de la calidad del agua de PTAP El Dorado. Bogotá, 2014.

SECRETARÍA DISTRITAL DEL HÁBITAT. Empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá. Disponible en: < www.habitatbogota.gov.co/node/231 > [citado el 20 de febrero de 2018]

ZOUBOULIS, A., TRASKAS, G. Y SAMARAS, P. Comparison of efficiency between poly-aluminum chloride and aluminum sulphate coagulants during full-scale experiments in a drinking water treatment plant. Separation Science and Technology, 43 (6), 1507-1519, 2008.

ANEXOS

**ANEXO A.
ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS DEL AGUA CRUDA.**

Tabla de promedio mensual de análisis físicoquímicos y microbiológicos del agua cruda en PTAP El Dorado, año 2017.

MES	Turbiedad UNT	Color UC	pH	Conductividad umho/cm	Alcalinidad mg/L	Hierros mg/L	Dureza total mg/L	Dureza calcica mg/L	Cloruros mg/L	Nitratos mg/L	Nitritos ug/L	Sulfatos mg/L	Oxígeno disuelto mg/L O2	Coliformes Totales NMP ò UFC/100	E - Coli NMP ò UFC/100mL
ENERO	4.98	31.93	5.56	27.21	5.65	0.84	10.98	7.81	1.83	0.30	0.03	1.23	3.02	7764.48	3.55
FEBRERO	5.11	33.46	5.63	25.15	7.18	1.03	11.36	8.02	1.67	0.13	0.04	1.07	3.39	9567.86	32.32
MARZO	8.14	40.45	5.49	23.56	5.71	1.04	9.39	5.79	0.72	0.22	0.04	1.89	3.97	10641.94	177.42
ABRIL	8.59	35.57	5.46	24.33	4.57	0.82	9.62	5.93	1.19	0.34	0.03	0.87	4.22	15605.90	107.93
MAYO	21.93	53.76	5.43	25.65	5.00	1.10	10.06	5.77	2.91	0.36	0.07	0.60	4.96	5659.03	214.52
JUNIO	33.16	64.42	5.45	28.55	5.20	1.31	9.91	7.58	2.20	0.59	0.09	0.28	4.99	3507.67	173.33
JULIO	11.29	40.00	5.60	20.72	4.35	0.86	9.39	4.90	1.75	0.41	0.05	0.22	5.35	3037.74	180.32
AGOSTO	17.23	44.33	5.55	20.22	4.35	0.93	8.64	5.18	1.78	1.03	0.05	4.54	5.30	4737.10	264.84
SEPTIEMBRE	15.06	47.37	5.58	23.38	5.07	1.35	10.74	7.87	1.36	0.74	0.05	5.15	4.02	2429.33	109.17
OCTUBRE	8.08	35.55	5.58	23.03	5.58	1.08	11.44	7.02	1.60	0.26	0.04	12.07	4.76	4425.45	108.06
NOVIEMBRE	12.22	41.74	5.66	21.80	5.53	1.16	10.52	7.24	0.95	0.29	0.05	10.53	4.69	2629.67	128.33
DICIEMBRE	8.41	35.65	5.63	23.98	7.26	1.19	12.60	8.33	0.29	0.06	0.03	0.92	4.99	8977.95	51.61

Tabla de valores máximos, por mes, de análisis físicoquímicos y microbiológicos del agua cruda en PTAP El Dorado, año 2017.

MES	Turbiedad UNT	Color UC	pH	Conductividad umho/cm	Alcalinidad mg/L	Hierros mg/L	Dureza total mg/L	Dureza calcica mg/L	Cloruros mg/L	Nitratos mg/L	Nitritos ug/L	Sulfatos mg/L	Oxígeno disuelto mg/L O2	Coliformes Totales NMP ò UFC/100	E - Coli NMP ò UFC/100mL
ENERO	7.00	37.10	6.94	36.00	9.00	1.16	25.11	12.36	2.96	0.34	0.04	3.20	5.07	16300.00	50.00
FEBRERO	7.09	39.00	6.96	28.60	10.00	1.68	18.52	15.80	4.00	0.30	0.10	1.98	4.60	19100.00	800.00
MARZO	21.80	56.00	6.80	27.80	10.00	1.35	15.32	9.08	2.59	0.36	0.07	2.91	6.28	23200.00	700.00
ABRIL	20.90	52.00	6.68	29.30	7.00	1.12	17.88	10.12	1.86	0.43	0.06	2.60	6.52	28400.00	500.00
MAYO	55.60	93.00	6.87	32.90	8.00	2.22	20.84	11.32	5.12	0.62	0.15	2.21	6.72	15800.00	1400.00
JUNIO	69.00	98.00	6.73	43.20	10.00	2.66	17.20	12.15	2.69	0.76	0.27	1.12	6.92	12000.00	800.00
JULIO	20.30	49.00	6.89	30.00	9.00	1.64	17.68	9.44	3.83	0.52	0.09	0.63	7.08	7800.00	600.00
AGOSTO	23.30	59.00	6.79	24.20	7.00	1.29	15.12	13.02	2.19	3.00	0.07	9.31	7.04	31500.00	3000.00
SEPTIEMBRE	29.00	65.00	6.89	25.50	7.00	1.88	22.60	13.99	2.25	2.20	0.07	10.84	6.70	12000.00	1200.00
OCTUBRE	13.60	48.00	6.93	25.80	9.00	2.30	19.20	13.72	1.99	0.36	0.06	13.28	6.22	10000.00	1300.00
NOVIEMBRE	27.90	59.00	6.94	26.70	10.00	2.15	16.84	12.80	1.72	0.39	0.07	12.91	6.57	19000.00	800.00
DICIEMBRE	18.80	54.00	7.04	28.40	12.00	3.22	21.80	16.40	2.85	0.42	0.05	14.95	6.27	35100.00	600.00

Tabla de valores mínimos, por mes, de análisis fisicoquímicos y microbiológicos del agua cruda en PTAP El Dorado, año 2017.

MES	Turbiedad UNT	Color UC	pH	Conductividad umho/cm	Alcalinidad mg/L	Hierros mg/L	Dureza total mg/L	Dureza calcica mg/L	Cloruros mg/L	Nitratos mg/L	Nitritos ug/L	Sulfatos mg/L	Oxígeno disuelto mg/L O ₂	Coliformes Totales NMP ò UFC/100	E - Coli NMP ò UFC/100ml
ENERO	4.98	31.93	5.56	27.21	5.65	0.84	10.98	7.81	1.83	0.30	0.03	1.23	3.02	7764.48	3.55
ENERO	3.37	18.00	5.13	24.80	4.00	0.40	7.81	4.32	1.22	0.26	0.02	0.17	0.00	680.00	0.00
FEBRERO	4.35	13.00	5.00	24.10	4.00	0.07	7.80	4.40	0.00	0.03	0.02	0.63	2.03	5800.00	0.00
MARZO	1.86	24.20	5.18	14.70	4.00	0.49	5.68	4.16	0.00	0.04	0.01	0.00	2.25	2100.00	0.00
ABRIL	4.83	18.00	5.10	22.00	4.00	0.18	5.56	4.72	0.00	0.14	0.00	0.00	4.21	6600.00	0.00
MAYO	3.08	33.00	4.88	20.60	4.00	0.35	5.68	4.08	0.31	0.00	0.01	0.00	4.11	430.00	0.00
JUNIO	9.58	40.56	4.74	22.10	4.00	0.49	5.00	3.64	1.69	0.48	0.03	0.00	4.74	260.00	0.00
JULIO	3.62	30.00	5.41	12.20	3.00	0.30	4.92	2.00	0.00	0.36	0.03	0.00	4.63	200.00	0.00
AGOSTO	9.70	18.40	5.18	17.00	4.00	0.35	4.68	1.72	1.11	0.31	0.01	0.78	4.50	1000.00	0.00
SEPTIEMBRE	9.50	39.00	5.27	18.50	4.00	0.46	7.36	4.00	0.00	0.22	0.02	0.03	3.16	500.00	0.00
OCTUBRE	5.70	31.00	5.37	17.90	5.00	0.63	5.10	4.22	1.34	0.00	0.02	11.56	3.15	100.00	0.00
NOVIEMBRE	7.80	34.00	5.16	19.60	4.00	0.89	7.00	4.52	0.63	0.16	0.03	4.26	4.33	420.00	0.00
DICIEMBRE	4.11	20.00	5.31	22.40	5.00	0.52	5.80	4.72	0.43	0.31	0.02	0.05	3.90	15.55	0.00

*Los datos de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos del agua que ingresa al proceso de tratamiento en la PTAP El Dorado, fueron proporcionados por la empresa. Estos datos se conocen como datos históricos y los análisis son realizados cada día, por el analista de laboratorio de la empresa durante los años de funcionamiento de la planta.

ANEXO B. INSTRUCTIVO DE ENSAYO DE JARRAS*.

*Este instructivo fue proporcionado por la PTAP El Dorado. Para anexarlo, el formato fue ligeramente modificado. Código: **MA0216I06-01**

Alcance

Aplica el ensayo realizado en las Plantas Vitelma, El Dorado y La Laguna.

Documentos Relacionados

Ministerio de Protección Social, decreto 1575 de 2007.

Terminología

- Equipo de jarras: Equipo dotado de seis paletas de agitación con rotor de velocidad variable utilizado para realizar ensayos de simulación de tratamiento de aguas en plantas
- Mezcla rápida: Es el proceso por medio del cual se logra una rápida reacción entre el coagulante y el agua a tratar
- Mezcla lenta: Es el proceso mediante el cual se permite la formación del floc por interacción química entre el insumo agregado y los diferentes elementos presentes en el agua que se desean eliminar (básicamente partículas en suspensión y disueltas productoras de color y turbiedad)
- Floc: Se le llama al conglomerado de partículas que se forma después de la adición de un coagulante como por ejemplo, sulfato de aluminio al agua.

Aspectos de Seguridad Industrial y Medio Ambiente

No aplica.

Equipos, Instrumentos y Materiales

- Equipo de jarras provisto de seis agitadores y tacómetro variable de 0-120 R.P.M.
- Vasos Hudson de 2L con salida frontal para muestreo o en su defecto vasos de precipitados de 1L.
- Balones volumétricos de 1L.
- Jeringas de 5 ml graduadas.
- Balanza.
- Pipetas graduadas de 25, 10, 5 y 1 mL

REACTIVOS NECESARIOS

• Solución de sulfato de aluminio granulado al 1%: Se pesan 10 g de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ y se disuelven en unos 500 ml de agua destilada, luego se completa a 1000 ml en un balón volumétrico. Esta solución contiene 10mg de sulfato de aluminio por mililitro.

• Solución de sulfato de aluminio líquido al 1% Se calcula el volumen necesario de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ de acuerdo con la densidad para obtener una solución de 10g/L. Por ejemplo si la densidad es 1,304 g/ml:

$$\text{Volumen } \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 = 10 \text{ g}/1,304 = 7,67 \text{ ml}$$

Entonces se requiere tomar 7,7 ml de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ en solución y diluirlo en unos 500 ml de agua y completar a 1000 ml en un balón volumétrico

Solución de hidroxocloruro de Aluminio al 1% Se calcula el volumen necesario de hidroxocloruro de aluminio de acuerdo con la densidad para obtener una solución de 10g/L. Por ejemplo si la densidad es 1,34 g/ml:

$$\text{Volumen hidroxocloruro de aluminio} = 10 \text{ g}/1,34 = 7,46 \text{ ml}$$

Entonces se requiere tomar 7,5 ml de hidroxocloruro de aluminio en solución y diluirlo en unos 500 ml de agua y completar a 1000 ml en un balón volumétrico

• Solución de cal viva al 0.5%: Se pesan 5 gramos de cal viva de la misma que se está utilizando en la planta, se diluyen en 500 ml de agua destilada, y se completa a 1000 ml en un balón volumétrico. Esta solución es de 5 mg de cal por mililitro.

• Solución de cal hidratada al 0.5%: Se pesan 5 gramos de cal hidratada de la misma que se está aplicando en la planta, se diluyen en 500 ml de agua destilada, y se completa a 1000 ml en un balón volumétrico. Esta solución es de 5 mg de cal por mililitro.

• Solución de bicarbonato al 0.5%: Se pesan 5 gramos de cal hidratada de la misma que se está aplicando en la planta, se diluyen en 500 ml de agua destilada, y se completa a 1000 ml en un balón volumétrico. Esta solución es de 5 mg de bicarbonato por mililitro.

Descripción

Las actividades descritas en este instructivo de trabajo son realizadas por el analista químico y / o técnico de tratamiento niveles 032 y/o 040 de la planta.

Se toma una muestra de 100 ml de agua cruda, a la cual se le realiza los siguientes análisis de pH según instructivo FT0109-13, turbiedad según instructivo FT0109-01, color según instructivo FT0106-05 y alcalinidad según instructivo FT0106-01. Se registra en el formato MA0216F06-01 "Ensayo de floculación"

De acuerdo con los análisis realizados a la muestra, se decide la dosificación de productos químicos para realizar el ensayo, si se va a aplicar prealcalinizante se sigue el siguiente procedimiento:

• Se determina la cantidad de alcalinizante necesaria para elevar el pH del agua cruda aproximadamente a 8.0-8.2 unidades de pH

• Se toma un litro de muestra de agua cruda, y se adiciona 0.5 ml (2.5 p.p.m.) de la solución

de alcalinizante (cal viva o hidratada, o Bicarbonato de Sodio), y se mide el valor de pH, si es menor de 8.0 se sigue adicionando alcalinizante hasta obtener el valor de pH deseado, una vez obtenido, se anota el valor en mg/l que se debe adicionar a cada vaso para el ensayo en el formato MA0216F06-01 "Ensayo de floculación".

- Se miden 2L de agua cruda en una probeta graduada si se tienen vasos Hudson o 1L si se utilizan Beakers de 1L, y se llenan los vasos del ensayo.
- Se aplica a cada vaso la dosificación determinada de alcalinizante, y se agita para que se mezcle perfectamente.

De acuerdo al valor obtenido de turbiedad y color en la muestra de agua cruda se escoge un rango de concentración de coagulante, teniendo en cuenta los valores utilizados de dosificación para turbiedades similares en planta.

Una vez decidido el rango se alistan seis jeringas con la dosis a aplicar en cada vaso (ver tabla de ejemplo).

DOSIFICACIÓN coagulante mg/l	Volumen en ml a tomar en jeringas para vasos Hudson de 2L	Volumen en ml a tomar en jeringas para vasos de 1L
10	2.0	1.0
11	2.2	1.1
12	2.4	1.2
13	2.6	1.3
14	2.8	1.4
15	3.0	1.5
16	3.2	1.6
17	3.4	1.7
18	3.6	1.8
19	3.8	1.9
20	4.0	2.0

Se colocan los vasos en su posición en el equipo de jarras, cada uno con su agitador, y se prende el equipo regulando el tacómetro a 100 R.P.M. si el ensayo se realiza para las plantas El Dorado, Laguna o Vitelma; y 80 R.P.M. si el ensayo es para la planta Yomasa.

Una vez se ha regulado el tacómetro se procede a aplicar el coagulante en los vasos, se debe aplicar en el mismo instante en el centro de los vasos lo más cerca que sea posible de la superficie del líquido; con ayuda de un cronómetro se miden 60 segundos de agitación a 100 R.P.M. (Vitelma, El Dorado, Laguna), a 80 R.P.M. (Yomasa), (mezcla rápida).

Al cabo de un minuto de mezcla rápida se regula lentamente el tacómetro ajustándolo a 40 R.P.M. (Vitelma, El Dorado, Laguna y Yomasa), y se cronometran 19 min de agitación (Vitelma, Dorado, y Laguna) y 5 min (Yomasa) (mezcla lenta).

Una vez ha transcurrido el tiempo de agitación de mezcla lenta se regula lentamente el tacómetro hasta eliminar completamente la agitación, luego de lo cual se cronometran 20 min de

sedimentación (Vitelma, El Dorado, Laguna), y 15 min (Yomasa).

Después de la sedimentación se toma al mismo tiempo a los vasos una muestra de 100ml, utilizando las salidas frontales si son vasos Hudson, o se toma directamente de los vasos con ayuda de una pipeta si son vasos de 1L.

Cada muestra se enumera y se filtra utilizando papel Whatman No.40 y se le realiza los siguientes análisis de pH según instructivo FT0109-09, turbiedad según instructivo FT0109-01, color según instructivo FT0127-05 y alcalinidad según instructivo FT0127-01. Se registra en el formato MA0216F06-01 "Ensayo de floculación"

De acuerdo a los resultados obtenidos se escoge la dosificación optima buscando la muestra que presente la menor turbiedad, menor color y que el pH se ajuste al intervalo deseado.

Si las muestras analizadas presentan turbiedad y color muy altas, mayores a las condiciones normales de operación de la planta (turbiedad > 1 UNT y color >10 UC) es necesario realizar otro ensayo variando la dosificación de coagulante repitiendo los pasos anteriores.

Informe

No aplica

Expresión de Resultados

Una vez realizado el ensayo se registra en el formato MA0216F06-01 "Ensayo de floculación" la dosis óptima obtenida, que se expresará en mg/L de cada insumo utilizado, ejemplo 5mg/L de cal y 15 mg/L de $Al_2(SO_4)_3$ granulado.

ANEXO C. INSTRUCTIVO DE MANEJO DE PLANTA PILOTO EL DORADO*.

*Este instructivo fue elaborado por los autores del trabajo de grado descrito a lo largo de este documento. Para anexarlo, el formato fue ligeramente modificado.

Alcance

Aplicar el manejo adecuado de la Planta Piloto de El Dorado.

Terminología

•Planta Piloto: Sistema a escala que permite investigar y observar cada una de las etapas de tratamiento de la planta El Dorado, ajustando dosificaciones y parámetros generales de operación. La planta piloto tiene una capacidad de tratamiento de 1 L/seg, con los procesos de mezcla rápida hidráulica, unidad de floculación con agitadores de paletas en 5 etapas, sedimentador de alta tasa con placas inclinadas y sistema de filtros. Cada una de las unidades del proceso está construida de tal manera que representa las condiciones reales de tratamiento de la planta El Dorado.

•Canaleta Parshall: Es la unidad de proceso donde se realiza la aplicación y mezcla (rápida) de las sustancias químicas requeridas para el proceso de coagulación (coagulante).

•Unidades de floculación: Es el lugar donde ocurre la formación del floc por interacción química entre el insumo agregado (coagulante) y los diferentes elementos presentes en el agua que se desean eliminar como lo son las partículas en suspensión y disueltas productoras de color y turbiedad.

•Sedimentador de alta tasa: Unidad de proceso en la cual el floc con mayor densidad se deposita en el fondo de un tanque llamado *tanque de sedimentación*. Para favorecer el crecimiento del floc y su correcta aglomeración, este se hace chocar contra placas paralelas colocadas a un ángulo inclinado de 60°.

•Filtros: Unidad de proceso que separa los sólidos en suspensión del agua mediante la interposición de un medio permeable capaz de retener partículas sólidas permitiendo el paso únicamente del agua. En la planta piloto de El Dorado el material filtrante es un material granular de carbón mineral llamado *antracita*.

•Floc: Es el conjunto de partículas microscópicas aglutinadas en masas grandes y con una densidad relativa mayor, formadas a partir de la adición de un coagulante como el sulfato de aluminio.

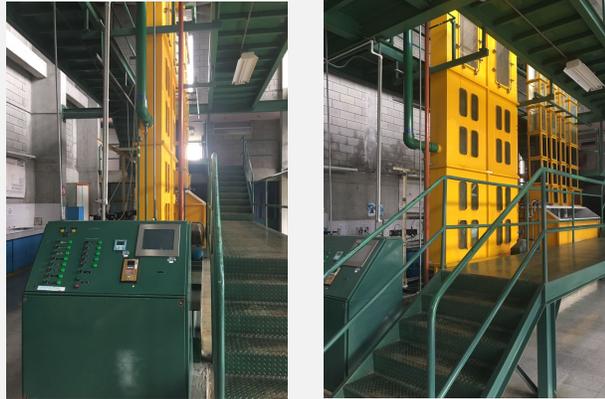
• Dosificación Óptima: Concentración de coagulante y alcalinizante necesaria para remover el mayor porcentaje de turbiedad y color en el proceso de tratamiento de agua necesario para que cumpla las normas establecidas por la planta. Para determinar la dosificación óptima se debe llevar a cabo un ensayo de jarras siguiendo el instructivo MA0216I06-01 de la planta El Dorado.

Aspectos de Seguridad Industrial y Medio Ambiente

No aplica.

Equipos, Instrumentos y Materiales

- Planta Piloto escala 1:1600 con respecto a la planta real de El Dorado.



- Beakers 1L, 500mL y 250mL.
- Garrafón de 20L.
- Balanza.
- Probetas graduadas de 100 mL y 1 L

REACTIVOS NECESARIOS

- Coagulante (Sulfato de aluminio granular, líquido o Hidroxicloruro de aluminio)
- Alcalinizante (Cal hidrata)
- Agua destilada

Preparación de soluciones:

PRE- ALCALINIZANTE

La bomba dosificadora de alcalinizante tiene un caudal fijo de 114.38mL/min que dosifica a un flujo de agua con caudal de 1 L/s. La bomba toma el alcalinizante de una solución concentrada de aproximadamente 60 L en un tanque llamado “Ca” con agitación constante preparada de la siguiente forma:

$$C_{\text{mezcla concentrada}} = (Q_{\text{agua}} * C_{\text{Optima alcalinizante}}) / Q_{\text{dosificador}}$$

$$m_{\text{alcalinizante}} = C_{\text{mezcla concentrada}} * V_{\text{agua de Solución}}$$

$$m_{\text{alcalinizante}} = ((Q_{\text{agua}} * C_{\text{Optima alcalinizante}}) / Q_{\text{dosificador}}) * V_{\text{agua de Solución}}$$

Donde; C: Concentración (mg/L); m: masa (Kg); Q: Caudal (L/s); V: Volumen (L)

- Solución de cal hidratada: Se pesa la masa de cal hidratada obtenida con la anterior expresión y se disuelve en el volumen de agua de solución requerido para el proceso.

COAGULANTE

La bomba dosificadora de coagulante tiene un caudal fijo de 58 mL/min que dosifica a un flujo de agua con caudal de 1 L/s. La bomba dosificadora toma el coagulante de un tanque denominado "Sulfato de Aluminio" (ver **Figura 1**), el cual debe contener una solución concentrada de aproximadamente 40 L y agitación constante. La solución debe ser preparada de la siguiente forma:

$$C_{\text{mezcla concentrada}} = (Q_{\text{agua}} * C_{\text{Optima alcalinizante}}) / Q_{\text{dosificador}}$$

$$m_{\text{alcalinizante}} = C_{\text{mezcla concentrada}} * V_{\text{agua de solución}}$$

$$m_{\text{alcalinizante}} = ((Q_{\text{agua}} * C_{\text{Optima alcalinizante}}) / Q_{\text{dosificador}}) * V_{\text{agua de solución}}$$

Donde; C: Concentración (mg/L)

m: masa (Kg)

Q: Caudal (L/s)

V: Volumen (L)

- Solución de sulfato de aluminio granulado: Se pesa la masa de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ obtenida con la anterior expresión y se disuelve en un volumen de agua de solución previamente determinado.
- Solución de sulfato de aluminio líquido: Se calcula el volumen necesario de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ de acuerdo con la densidad que tenga el producto para obtener la solución:

$$\text{Volumen } \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \text{ (L)} = (m_{\text{coagulante}}) / (\rho_{\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3})$$

Dónde; ρ : densidad (Kg/L); m: masa (Kg)

La densidad del coagulante se mide con ayuda de un densímetro y de acuerdo al valor registrado se evalúa la expresión anterior.

Se toma el volumen de sulfato de aluminio líquido y se disuelve en el volumen de agua de solución requerida.

Por ejemplo, si la densidad es de 1.304 Kg/L y se desea obtener una solución de 0.1 Kg/L:

$$\text{Volumen } \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 = 0.1 \text{ Kg} / 1.304 \text{ Kg/L} = 0.0767 \text{ L}$$

Entonces, se requerirá tomar 0.0767 L de sulfato de aluminio líquido por cada litro de agua que se prepare en el tanque de la solución (ver **Figura 1**).

- Solución de hidroxiclорuro de Aluminio: Se calcula el volumen necesario de hidroxiclорuro de aluminio de acuerdo con la densidad (en promedio su densidad se encuentra entre 1.30 y 1.40 Kg/L) para obtener una solución:

$$\text{Volumen hidroxidocloruro de aluminio (L)} = m_{\text{coagulante}} / (\rho_{\text{hidroxidocloruro de Aluminio}})$$

Dónde; ρ : densidad (Kg/L); m: masa (Kg)

Se toma el volumen de aluminio líquido y se disuelve en el volumen de agua de solución requerida.



Figura 1. Tanques de coagulante y pre-alcalinizante, respectivamente, de la planta piloto de El Dorado.

En la **tabla 1** se presentan los valores de la cantidad de cada una de las sustancias necesarias para distintas dosificaciones óptimas (en partes por millón).

Dosificación Optima (mg/L)	Masa de sulfato de aluminio granular en 40L* de agua (Kg)	Volumen de sulfato de aluminio líquido en 40L* de agua (L)	Volumen de Hidroxidocloruro de Aluminio en 40L* de agua (L)	Masa de Cal Hidrata en 60L* de agua (Kg)
10	0,414	0,317	0,309	0,312
12	0,497	0,381	0,371	0,374
14	0,579	0,444	0,432	0,437
16	0,662	0,508	0,494	0,499
18	0,745	0,571	0,556	0,562
20	0,828	0,635	0,618	0,624
22	0,910	0,698	0,679	0,686
24	0,993	0,762	0,741	0,749
26	1,076	0,825	0,803	0,811
28	1,159	0,889	0,865	0,874
30	1,241	0,952	0,926	0,936
32	1,324	1,015	0,988	0,998
34	1,407	1,079	1,050	1,061

36	1,490	1,142	1,112	1,123
38	1,572	1,206	1,173	1,186
40	1,655	1,269	1,235	1,248
45	1,862	1,428	1,390	1,404
50	2,069	1,587	1,544	1,560

Tabla 1. Cantidad de reactivo para determinada concentración de dosis optima

*Se recomienda esa cantidad de solución (40 L para coagulante y 60 L para alcalinizante) debido al caudal que suministra cada una de las bombas de estas sustancias.

Descripción

Las actividades descritas en este instructivo de trabajo deben ser realizadas por el analista químico y/o técnico de tratamiento niveles 31 y/o 32 de la planta El Dorado.

ENCENDIDO DE LA PLANTA PILOTO

*En la figura 2 se muestra el panel de control principal de la planta piloto de El Dorado.



Figura 2. Panel de control principal de la planta piloto.

*Antes de encender la planta se debe verificar el registro de entrada de agua cruda ESTÉ ABIERTO esta para evitar posibles daños en la tubería.

1. Para encender el sistema eléctrico se debe colocar el selector etiquetado con el nombre de "Tensión de control", ubicado en el panel de control de la planta, en la posición de "Manual" (Ver **figura 3**).

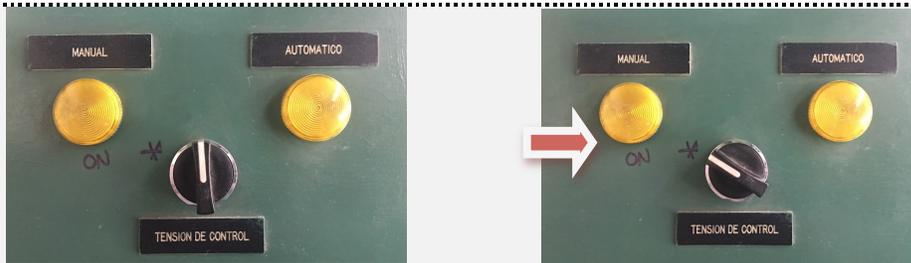


Figura 3. Selector de encendido en posición neutra y encendido manual, respectivamente.

* Aclaración: al activar el selector en modo “automático”, la planta piloto se opera desde el cuarto de supervisor, en estos momentos el sistema de control de modo automático no está completo por lo que este instructivo se hace en base a un manejo de forma “manual” únicamente.

2. Para energizar la bomba de agua cruda se debe colocar el selector etiquetado con el nombre “Bomba de Muestreo” en la posición de encendido (ver **figura 4**).



Figura 4. Selector de “Bomba de Muestreo” en posición de encendido.

3. Para encender la bomba se debe oprimir el pulsador de color VERDE del panel de control principal etiquetado con el nombre “LAB-TM-1” (ver **figura 5**).



Figura 4. Pulsadores de LAB-TM-1 B. Muestreo.

NOTA: Se debe abrir la válvula de **DRENAJE** de los sedimentadores mientras se inicia la dosificación de los productos.

4. En la entrada del proceso, en el piso superior de la planta piloto, ubicar la válvula de globo

en el tubo de agua cruda y cuando el caudal del agua sea estable, manipular el caudal hasta que oscile en un valor de 1L/s en la pantalla del medidor de flujo.



Figura 5. Pantalla de medidor de caudal ubicada en el piso superior de la planta piloto.

5. Preparar la mezcla de dosificación en los tanques de 200 Litros etiquetados con los compuestos en disolución respectivamente (Coagulante y Alcalinizante) (ver figura 1), además verificar que las válvulas en la línea de control estén abiertas con dirección a la ruta que sigue agua cruda seguirá.
6. Accionar la válvula de aire en caso de requerirse agitación en los tanques de las soluciones de alcalinizante y/o coagulante (ver figura 6 y 7). Se debe abrir la válvula de globo en la pared a un ángulo de más o menos 30°, y graduar el aire en la entrada de cada tanque de dosificación de tal forma que provea una agitación constante a la mezcla.

*La mezcla de cal tiende a precipitar con la agitación de flujo de aire, por lo que requiere agitación manual.



Figura 7. Tubería de aire comprimido.



Figura 8. Válvulas de aire para distribución en planta piloto.

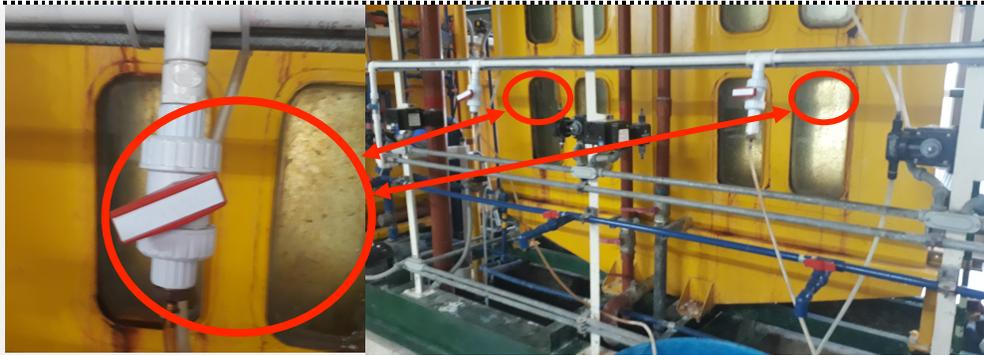


Figura 9. Válvulas de aire para agitación en cada tanque de solución.

NOTA: verificar el nivel del agua en el floculador cuando; este se encuentre a la mitad se continúa con el procedimiento.

7. Para encender el floculador, se debe ubicar el selector con el nombre “Floculador” en el indicador “ON”.



Figura 10. Selector de floculador en modo “ON”.

8. Verificar en el PLC de la parte derecha del panel de control que se encuentre a 18 HZ; lo cual indica la velocidad angular a la cual están girando las paletas de floculación, y corresponde a una velocidad de 1 RPM. Este valor puede variar dependiendo de las características del agua cruda que entra a la planta (ver **figura 11**).



Figura 11. PLC en 18.0 HZ

*La planta piloto cuenta en con un total de 6 bombas dosificadoras en caso de ser necesario

agregar otras sustancias a lo largo del proceso.



Figura 12. Interruptores para accionar las diferentes bombas con las que cuenta la planta piloto.

9. Verificar que las paletas de floculación giren correctamente y que los tanques estén en perfecto funcionamiento (ver **figura 13**).



Figura 13. Floculadores de la planta piloto de El Dorado.

10. Habilitar el(los) filtro(s) que se usa(n) en el proceso de tratamiento abriendo la válvula de globo a la entrada de cada filtro según como se presenta en la **figura 14**.

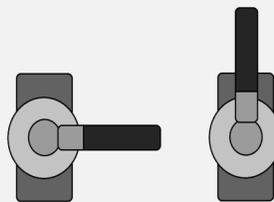


Figura 14. Posiciones de las válvulas de globo abierta y cerrada.

11. Para energizar la bomba de dosificación de coagulante y alcalinizante, se busca en el panel de control principal de la planta piloto los selectores etiquetados con los nombres “Dosificación de coagulante” y “Dosificador de polímero”, respectivamente y se ubican en la posición “ * ” (asterisco). Una vez las bombas dosificadoras estén encendidas es necesario purgarlas y eliminar las burbujas de aire, lo cual se realiza colocando una pequeña parte de la solución y la entrada de la manguera de aspiración por encima de la altura de la bomba.



Figura 14. Selectores para dosificación de coagulante y alcalinizante en posición de encendido.



Figura 15. Dosificación de coagulante y alcalinizante en la planta piloto.

*Se debe esperar aproximadamente 4 horas para la estabilización completa de la planta piloto, de esta manera se garantiza que el agua que sale del proceso ha sido tratada con las dosificaciones realizadas.

12. Una vez transcurra el tiempo de estabilización, se puede habilitar el sistema de filtración y de almacenamiento habilitando la ruta del agua. El nivel en el tanque de filtración debe permanecer constante en la altura media entre la entrada del tanque y la superficie del lecho filtrante, manipulando la válvula de salida de los filtros.

*Se debe verificar la descarga de los productos mediante muestreo (análisis de pH en el laboratorio).

*El agua que sale del proceso se almacena en el “Tanque de almacenamiento”.

*Es necesario llevar a cabo la verificación del floc durante el proceso debido a que este debe ser pesado y sedimentar fácil y rápidamente.

13. Llevar a cabo los análisis requeridos del agua a lo largo y salida del proceso.

APAGADO DE LA PLANTA PILOTO

Se realizan los pasos anteriores, empezando por el último hasta llegar al primero, posicionando los interruptores en su lugar inicial y accionando los pulsadores en etiqueta “off” ó “pulsador rojo”, y se debe realizar la misma acción con cada una de las válvulas que se abrieron o cerraron.

*ADVERTENCIA conservar en la misma posición la válvula de bola del agua cruda a la entrada del proceso para evitar sobrepresión entre la bomba de absorción del agua cruda.

LAVADO DE FILTROS DE LA PLANTA PILOTO

1. Abrir la válvula de drenaje
2. Abrir la válvula “Lavado de aire local” (del filtro).
NOTA: Verifique que la válvula de aire general se encuentre abierta antes de continuar con el instructivo.
3. Nivelar el agua de los filtros de manera que se encuentre aproximadamente a 10 cm por encima de la superficie de antracita (medio filtrante).
4. Abrir la válvula de aire de salida del compresor y ajustar el tiempo a 3 minutos.
*El aire es necesario para lograr economizar un 20 % del agua de lavado.
5. Suspender el aire del compresor.
6. Cerrar la válvula de aire general.
7. Cerrar la válvula de aire local.
8. Abrir la válvula de lavado con agua local.
9. Abrir la válvula de lavado general (descarga de la bomba).
10. Energizar la bomba de lavado mediante la activación del selector “Bomba de Lavado” ubicado en el panel de control de la planta piloto.
11. Esperar entre 10 y 15 minutos hasta que el agua se clarifique.
NOTA: Para realizar el lavado de filtros el tanque debe encontrarse lleno, para lograr una adecuada succión del agua y evitar un daño eléctrico debido a un bajo nivel de agua.

Informe

No aplica

Expresión de Resultados

Una vez realizado el ensayo se registra en el formato MA0216F06-01 “Ensayo de floculación” la dosis óptima obtenida, que se expresará en mg/L de cada insumo utilizado, ejemplo 5mg/L de cal y 15 mg/L de $Al_2(SO_4)_3$ granulado.

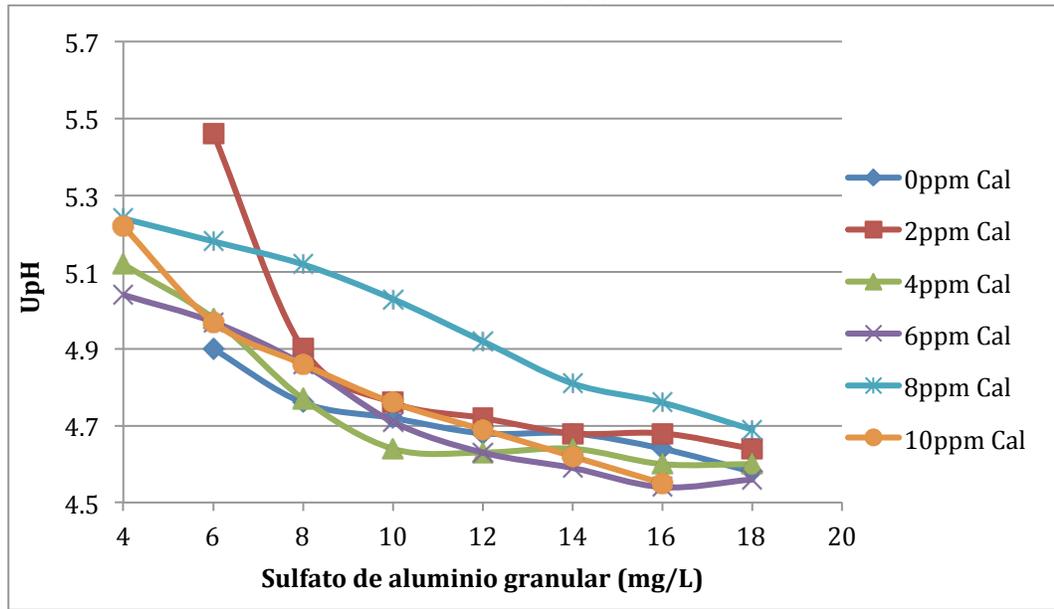
**ANEXO D.
RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN NIVEL LABORATORIO*.**

Tabla de parámetros iniciales y resultados con sulfato de aluminio granular en turbiedades de 3.6 a 4.89 UNT.

Parámetros iniciales							Parámetros agua clarificada				
Turb.	pH	Color	Alcalinidad	Temp. (°C)	S.A.g	Pre-cal	Turb.	pH	Color	Alcalinidad	Temp. (°C)
3.6	6.8	30	8.7	14.8	6	0	3.25	4.9	15.7	2.1	14.4
3.6	6.8	30	8.7	14.8	8	0	3.53	4.76	17.0	3.3	14.4
3.6	6.8	30	8.7	14.8	10	0	3.37	4.72	16.2	3	14.2
3.6	6.8	30	8.7	14.8	12	0	3.86	4.68	18.6	3.7	14.4
3.6	6.8	30	8.7	14.8	14	0	3.61	4.68	17.4	3.5	14.5
3.6	6.8	30	8.7	14.8	16	0	2.69	4.64	13.0	1.7	14.4
3.6	6.8	30	8.7	14.8	18	0	2.35	4.58	11.3	2.3	14.3
4.89	7.49	32.6	8.7	14.2	6	2	2.16	5.46	10.1	3.1	14.2
4.89	7.49	32.6	8.7	14.2	8	2	1.28	4.9	6.7	2	14.4
4.89	7.49	32.6	8.7	14.2	10	2	1.25	4.76	6.6	3	14.4
4.89	7.49	32.6	8.7	14.2	12	2	1.19	4.72	6.3	3	14.2
4.89	7.49	32.6	8.7	14.2	14	2	1.22	4.68	6.4	3.3	14.4
4.89	7.49	32.6	8.7	14.2	16	2	1.31	4.68	6.8	2.5	14.5
4.89	7.49	32.6	8.7	14.2	18	2	1.47	4.64	7.6	3.4	14.4
4.89	7.49	32.6	8.7	14.2	4	4	1.92	5.12	7.2	3.9	15
4.89	7.49	32.6	8.7	14.2	6	4	1.34	4.98	6.3	3.1	14.8
4.89	7.49	32.6	8.7	14.2	8	4	1.12	4.77	6.0	2.6	14.9
4.89	7.49	32.6	8.7	14.2	10	4	1.27	4.64	6.7	2.2	14.7
4.89	7.49	32.6	8.7	14.2	12	4	1.3	4.63	6.8	3	14.9
4.89	7.49	32.6	8.7	14.2	14	4	1.31	4.64	6.8	2	14.9
4.89	7.49	32.6	8.7	14.2	16	4	1.42	4.6	7.3	4	14.9
4.89	7.49	32.6	8.7	14.2	18	4	1.37	4.6	7.1	3.3	15.1
4.83	6.31	32.8	8.8	14.4	4	6	1.82	5.04	9.4	3.5	14.6
4.83	6.31	32.8	8.8	14.4	6	6	1.63	4.97	8.2	3.7	14.4
4.83	6.31	32.8	8.8	14.4	8	6	1.4	4.86	7.2	2	14.6
4.83	6.31	32.8	8.8	14.4	10	6	1.81	4.71	9.4	3	14.4
4.83	6.31	32.8	8.8	14.4	12	6	1.57	4.63	8.1	2.5	14.7
4.83	6.31	32.8	8.8	14.4	14	6	1.2	4.59	6.4	3	14.6
4.83	6.31	32.8	8.8	14.4	16	6	1.48	4.54	7.6	4.2	14.6
4.83	6.31	32.8	8.8	14.4	18	6	1.09	4.56	5.9	2.7	14.5
4.83	6.31	32.8	8.8	14.4	4	8	1.48	5.24	7.6	3.9	14.9
4.83	6.31	32.8	8.8	14.4	6	8	1.62	5.18	8.1	4	14.9
4.83	6.31	32.8	8.8	14.4	8	8	1.41	5.12	7.3	3.7	14.9
4.83	6.31	32.8	8.8	14.4	10	8	1.72	5.03	8.9	3.2	14.5
4.83	6.31	32.8	8.8	14.4	12	8	1.6	4.92	8.2	3	14.9
4.83	6.31	32.8	8.8	14.4	14	8	1.1	4.81	6.0	2.1	14.7
4.83	6.31	32.8	8.8	14.4	16	8	1.32	4.76	6.9	2.9	14.8
4.83	6.31	32.8	8.8	14.4	18	8	1.21	4.69	6.4	3.6	14.6
3.6	6.8	30	8.7	14.8	4	10	1.66	5.22	8.5	2	14.9
3.6	6.8	30	8.7	14.8	6	10	1.5	4.97	7.7	2.4	14.9
3.6	6.8	30	8.7	14.8	8	10	1.52	4.86	7.8	2.8	15.1
3.6	6.8	30	8.7	14.8	10	10	1.37	4.76	7.1	3.2	15
3.6	6.8	30	8.7	14.8	12	10	1.49	4.69	7.7	3.5	14.8
3.6	6.8	30	8.7	14.8	14	10	1.78	4.62	9.2	3.8	14.9
3.6	6.8	30	8.7	14.8	16	10	1.69	4.55	8.7	1.7	15.1

*Turb.: turbiedad (UNT). Color (UC). Alcalinidad (mg CaCO₃/L). Cantidad de coagulante y cal hidrata (mg/L).

Gráfica del comportamiento de pH en el agua clarificada, con diferentes dosificaciones de sulfato de aluminio granular y cal hidrata en turbiedades de 3.6 a 4.89 UNT.



Gráfica del comportamiento de las unidades de color en el agua clarificada, con diferentes dosificaciones de sulfato de aluminio granular y cal hidrata en turbiedades de 3.6 a 4.89 UNT.

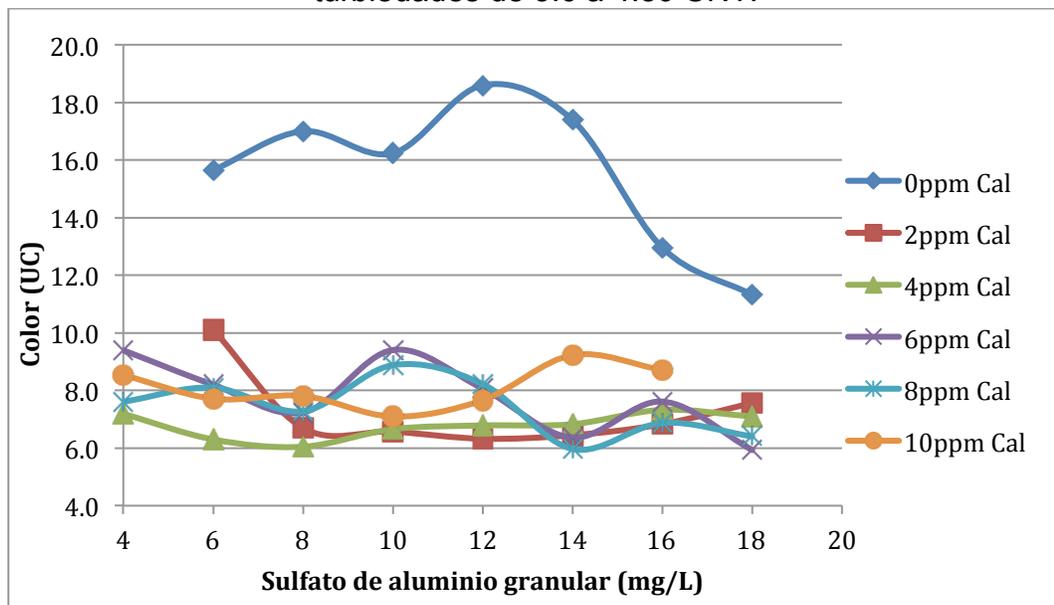
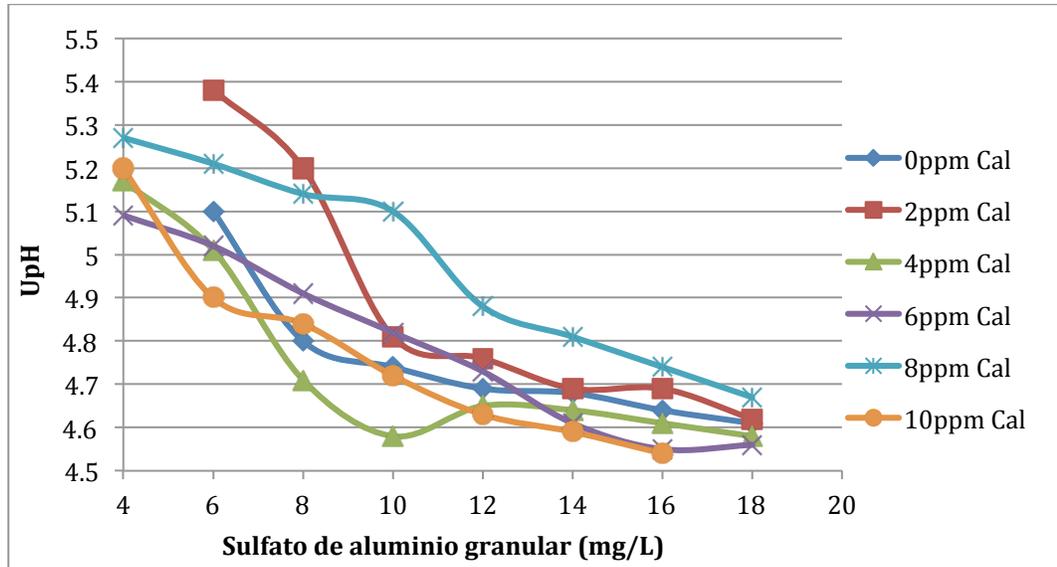


Tabla de parámetros iniciales y resultados (réplica) con sulfato de aluminio granular en turbiedades de 3.6 a 4.89 UNT.

Parámetros iniciales							Parámetros agua clarificada				
Turb.	pH	Color	Alcalinidad	Temp. (°C)	S.A.g	Pre-cal	Turb.	pH	Color	Alcalinidad	Temp. (°C)
3.6	6.8	30	8.7	14.8	6	0	3.58	5.1	17.2	2.9	14
3.6	6.8	30	8.7	14.8	8	0	3.51	4.8	17.0	2.8	14.2
3.6	6.8	30	8.7	14.8	10	0	3.39	4.74	16.3	3.6	14.2
3.6	6.8	30	8.7	14.8	12	0	3.89	4.69	18.7	3.7	14.5
3.6	6.8	30	8.7	14.8	14	0	3.6	4.68	17.3	3	14.6
3.6	6.8	30	8.7	14.8	16	0	2.71	4.64	13.1	2.4	14.3
3.6	6.8	30	8.7	14.8	18	0	2.41	4.61	11.6	1.9	14.5
4.89	7.49	32.6	8.7	14.2	6	2	2.32	5.38	10.3	2.6	14.5
4.89	7.49	32.6	8.7	14.2	8	2	1.41	5.2	7.3	3	14
4.89	7.49	32.6	8.7	14.2	10	2	1.24	4.81	6.5	2	14.4
4.89	7.49	32.6	8.7	14.2	12	2	1.2	4.76	6.4	3.4	14.2
4.89	7.49	32.6	8.7	14.2	14	2	1.23	4.69	6.5	3	14.4
4.89	7.49	32.6	8.7	14.2	16	2	1.3	4.69	6.8	2.7	14.2
4.89	7.49	32.6	8.7	14.2	18	2	1.52	4.62	7.8	3.7	14
4.89	7.49	32.6	8.7	14.2	4	4	2.04	5.17	7.5	3.8	14.6
4.89	7.49	32.6	8.7	14.2	6	4	1.29	5.01	6.1	3.5	14.6
4.89	7.49	32.6	8.7	14.2	8	4	1.11	4.71	6.0	3	14.4
4.89	7.49	32.6	8.7	14.2	10	4	1.27	4.58	6.7	2.6	14.5
4.89	7.49	32.6	8.7	14.2	12	4	1.28	4.65	6.7	3.1	14.8
4.89	7.49	32.6	8.7	14.2	14	4	1.3	4.64	6.8	2.6	15
4.89	7.49	32.6	8.7	14.2	16	4	1.4	4.61	7.2	3.5	14.9
4.89	7.49	32.6	8.7	14.2	18	4	1.36	4.58	7.1	3	15.1
4.83	6.31	32.8	8.8	14.4	4	6	1.77	5.09	9.1	4	14.8
4.83	6.31	32.8	8.8	14.4	6	6	1.52	5.02	7.9	3.5	14.6
4.83	6.31	32.8	8.8	14.4	8	6	1.48	4.91	7.6	3	14.8
4.83	6.31	32.8	8.8	14.4	10	6	1.79	4.82	9.3	3.2	14.8
4.83	6.31	32.8	8.8	14.4	12	6	1.56	4.73	8.0	2.9	14.5
4.83	6.31	32.8	8.8	14.4	14	6	1.2	4.61	6.4	2.5	14.7
4.83	6.31	32.8	8.8	14.4	16	6	1.49	4.55	7.7	3.8	14.8
4.83	6.31	32.8	8.8	14.4	18	6	0.978	4.56	5.5	3.6	14.9
4.83	6.31	32.8	8.8	14.4	4	8	1.41	5.27	7.3	4	14.7
4.83	6.31	32.8	8.8	14.4	6	8	1.57	5.21	7.9	3.2	14.9
4.83	6.31	32.8	8.8	14.4	8	8	1.4	5.14	7.2	4.1	15.1
4.83	6.31	32.8	8.8	14.4	10	8	1.71	5.1	8.8	2.9	14.7
4.83	6.31	32.8	8.8	14.4	12	8	1.58	4.88	8.1	3.8	14.8
4.83	6.31	32.8	8.8	14.4	14	8	1.1	4.81	6.0	3	14.5
4.83	6.31	32.8	8.8	14.4	16	8	1.31	4.74	6.8	2.4	14.9
4.83	6.31	32.8	8.8	14.4	18	8	1.22	4.67	6.4	4	15
3.6	6.8	30	8.7	14.8	4	10	1.64	5.2	8.4	2.5	15
3.6	6.8	30	8.7	14.8	6	10	1.66	4.9	8.5	2.2	15.1
3.6	6.8	30	8.7	14.8	8	10	1.49	4.84	7.7	3.2	15.2
3.6	6.8	30	8.7	14.8	10	10	1.53	4.72	7.9	3	15
3.6	6.8	30	8.7	14.8	12	10	1.49	4.63	7.7	3.8	14.9
3.6	6.8	30	8.7	14.8	14	10	1.76	4.59	9.1	4.1	15.3
3.6	6.8	30	8.7	14.8	16	10	1.7	4.54	8.8	2.3	15.2

Gráfica del comportamiento (réplica) de pH en el agua clarificada, con diferentes dosificaciones de sulfato de aluminio granular y cal hidratada en turbiedades de 3.6 a 4.89 UNT.



Gráfica del comportamiento de las unidades de color (réplica) el agua clarificada, con diferentes dosificaciones de sulfato de aluminio granular y cal hidratada en turbiedades de 3.6 a 4.89 UNT.

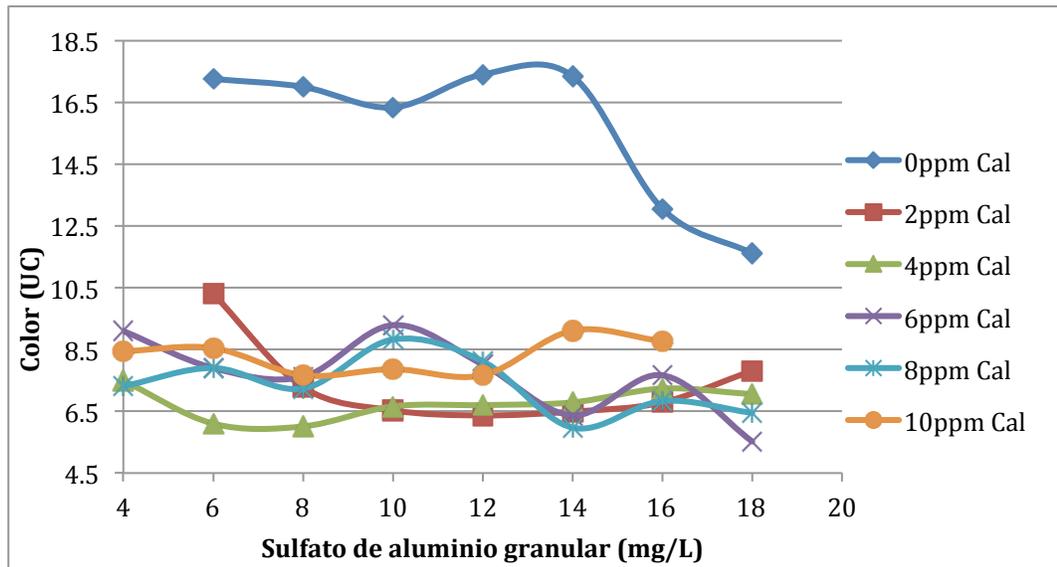
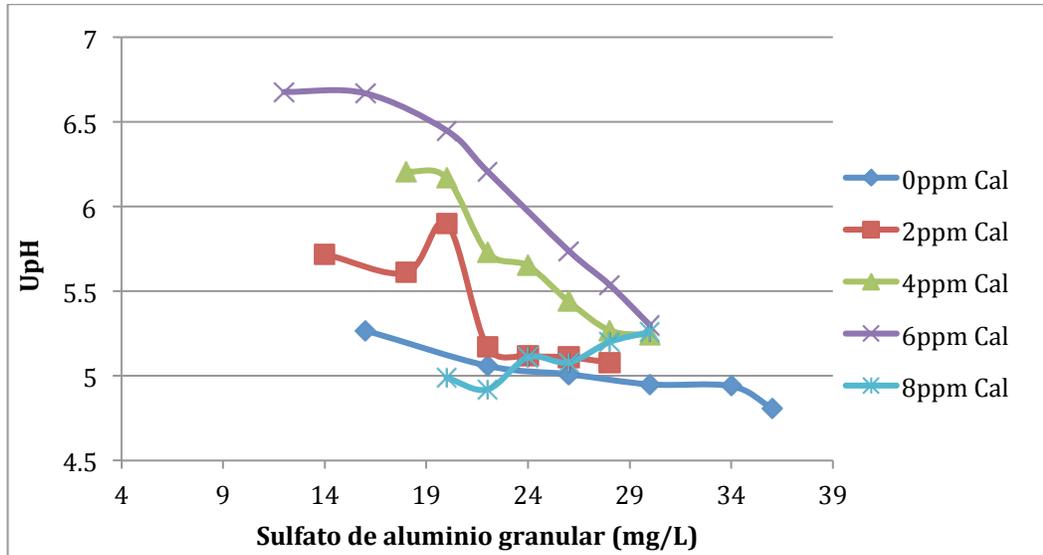


Tabla de parámetros iniciales y resultados con sulfato de aluminio granular en turbiedades de 23.5 a 25 UNT.

Parámetros iniciales							Parámetros agua clarificada				
Turb.	pH	Color	Alcalinidad	Temp. (°C)	S.A.g	Pre-cal	Turb.	pH	Color	Alcalinidad	Temp. (°C)
23.5	6.83	57.4	7.2	15.1	16	0	3.58	5.27	17.2	4.2	15.5
23.5	6.83	57.4	7.2	15.1	22	0	2.66	5.06	12.8	4	15.4
23.5	6.83	57.4	7.2	15.1	26	0	2.45	5.01	11.8	3.1	15.5
23.5	6.83	57.4	7.2	15.1	30	0	2.65	4.95	12.8	3	15.6
23.5	6.83	57.4	7.2	15.1	34	0	2.3	4.94	11.2	2.6	15.3
23.5	6.83	57.4	7.2	15.1	36	0	2.3	4.81	10.5	2	15.6
25	6.74	58.1	7.1	14.1	14	2	12.5	5.72	27.6	5.7	15.4
25	6.74	58.1	7.1	14.1	18	2	2.23	5.61	11.4	4.6	15.5
25	6.74	58.1	7.1	14.1	20	2	1.88	5.9	9.8	5	15.4
25	6.74	58.1	7.1	14.1	22	2	1.78	5.17	9.2	3.8	15.4
25	6.74	58.1	7.1	14.1	24	2	1.63	5.12	8.4	3.3	15.6
25	6.74	58.1	7.1	14.1	26	2	1.61	5.11	8.3	2.9	15.6
25	6.74	58.1	7.1	14.1	28	2	1.61	5.08	8.3	2.7	15.8
25	6.74	58.1	7.1	14.1	18	4	1.92	6.21	9.1	5	15.6
25	6.74	58.1	7.1	14.1	20	4	1.34	6.17	6.5	4.4	15.7
25	6.74	58.1	7.1	14.1	22	4	1.23	5.73	5.9	5.5	15.7
25	6.74	58.1	7.1	14.1	24	4	1.2	5.65	5.8	5.4	15.4
25	6.74	58.1	7.1	14.1	26	4	1.03	5.44	5.0	4.4	15.7
25	6.74	58.1	7.1	14.1	28	4	1.07	5.27	5.2	5.4	15.6
25	6.74	58.1	7.1	14.1	30	4	1.06	5.24	5.1	3.7	15.8
25	6.74	58.1	7.1	14.1	12	6	25.2	6.68	58.6	10.8	15.7
25	6.74	58.1	7.1	14.1	16	6	25.5	6.67	59.3	9.9	15.7
25	6.74	58.1	7.1	14.1	20	6	4.82	6.45	11.2	5.8	15.5
25	6.74	58.1	7.1	14.1	22	6	1.65	6.21	8.5	4.9	16.6
25	6.74	58.1	7.1	14.1	26	6	1.2	5.74	6.4	4.2	16
25	6.74	58.1	7.1	14.1	28	6	1.33	5.54	6.8	5	15.7
25	6.74	58.1	7.1	14.1	30	6	1.4	5.3	7.2	3.8	16.2
23.5	6.83	57.4	7.2	15.1	20	8	3.51	4.99	8.2	4.1	15.1
23.5	6.83	57.4	7.2	15.1	22	8	3.02	4.92	7.0	4.9	15.1
23.5	6.83	57.4	7.2	15.1	24	8	2.64	5.11	6.1	5.3	15.1
23.5	6.83	57.4	7.2	15.1	26	8	2.12	5.08	9.4	3.6	15.5
23.5	6.83	57.4	7.2	15.1	28	8	1.99	5.2	8.5	5.9	15
23.5	6.83	57.4	7.2	15.1	30	8	1.96	5.26	8.3	7.8	15.3

Gráfica del comportamiento de pH en el agua clarificada, con diferentes dosificaciones de sulfato de aluminio granular y cal hidratada en turbiedades de 23.5 a 25 UNT.



Gráfica del comportamiento de las unidades de color en el agua clarificada, con diferentes dosificaciones de sulfato de aluminio granular y cal hidratada en turbiedades de 23.5 a 25 UNT.

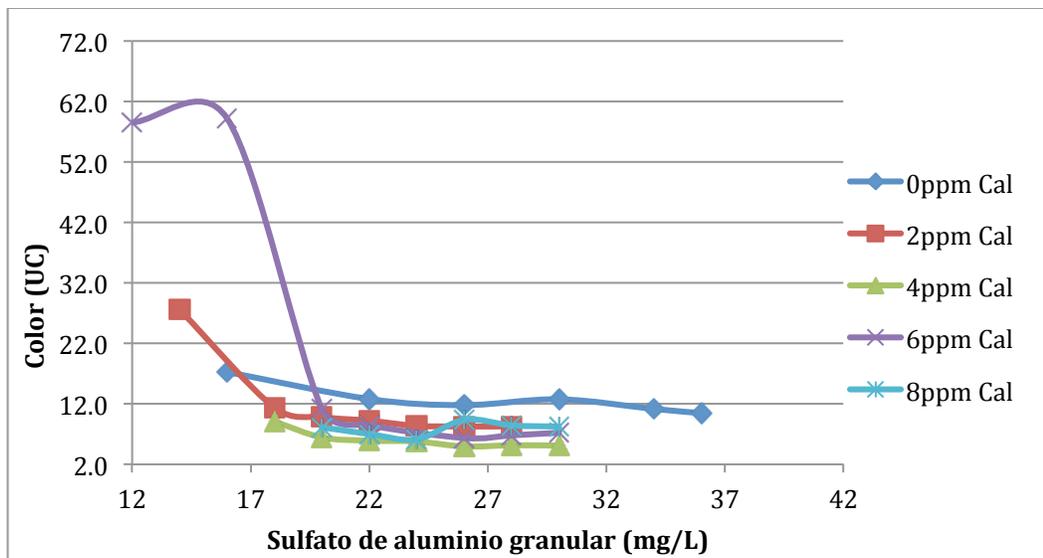
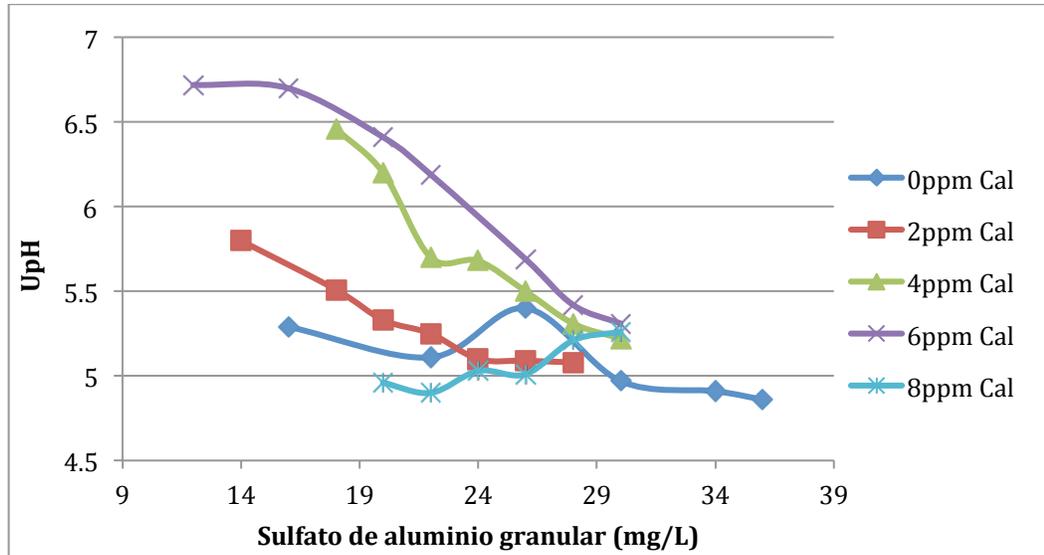


Tabla de parámetros iniciales y resultados (réplica) con sulfato de aluminio granular en turbiedades de 23.5 a 25 UNT.

Parámetros iniciales							Parámetros agua clarificada				
Turb.	pH	Color	Alcalinidad	Temp. (°C)	S.A.g	Pre-cal	Turb.	pH	Color	Alcalinidad	Temp. (°C)
23.5	6.83	57.4	7.2	15.1	16	0	3.57	5.29	17.2	4.7	15.3
23.5	6.83	57.4	7.2	15.1	22	0	2.67	5.11	12.9	4.3	15.5
23.5	6.83	57.4	7.2	15.1	26	0	2.43	5.4	11.7	3.9	15.5
23.5	6.83	57.4	7.2	15.1	30	0	2.66	4.97	12.8	2.7	15.7
23.5	6.83	57.4	7.2	15.1	34	0	2.2	4.91	10.4	3.1	15.5
23.5	6.83	57.4	7.2	15.1	36	0	2.4	4.86	11.3	2.8	15.5
25	6.74	58.1	7.1	14.1	14	2	12.7	5.8	28.1	6.1	15.7
25	6.74	58.1	7.1	14.1	18	2	2.31	5.51	11.7	6.9	15.7
25	6.74	58.1	7.1	14.1	20	2	1.85	5.33	9.7	5.3	15.5
25	6.74	58.1	7.1	14.1	22	2	1.8	5.25	9.3	4	15.4
25	6.74	58.1	7.1	14.1	24	2	1.64	5.1	8.4	3.9	15.8
25	6.74	58.1	7.1	14.1	26	2	1.6	5.09	8.2	3.3	15.8
25	6.74	58.1	7.1	14.1	28	2	1.61	5.08	8.3	2.5	15.7
25	6.74	58.1	7.1	14.1	18	4	1.87	6.46	7.6	6.3	15.5
25	6.74	58.1	7.1	14.1	20	4	1.36	6.2	6.6	5	15.5
25	6.74	58.1	7.1	14.1	22	4	1.24	5.7	6.0	6.1	15.7
25	6.74	58.1	7.1	14.1	24	4	1.19	5.68	5.7	6.2	15.5
25	6.74	58.1	7.1	14.1	26	4	0.987	5.5	4.8	5.2	15.4
25	6.74	58.1	7.1	14.1	28	4	1.08	5.31	5.2	5.8	15.8
25	6.74	58.1	7.1	14.1	30	4	1.05	5.22	5.1	4.2	15.9
25	6.74	58.1	7.1	14.1	12	6	25.6	6.72	59.5	11	15.8
25	6.74	58.1	7.1	14.1	16	6	25.5	6.7	59.3	10.1	15.7
25	6.74	58.1	7.1	14.1	20	6	4.43	6.41	10.3	5.6	15.7
25	6.74	58.1	7.1	14.1	22	6	1.64	6.19	8.4	5	16
25	6.74	58.1	7.1	14.1	26	6	1.15	5.69	6.2	4.3	16.2
25	6.74	58.1	7.1	14.1	28	6	1.28	5.42	6.5	4.3	15.8
25	6.74	58.1	7.1	14.1	30	6	1.5	5.31	7.7	4	16
23.5	6.83	57.4	7.2	15.1	20	8	3.5	4.96	8.1	5.5	15
23.5	6.83	57.4	7.2	15.1	22	8	3.01	4.9	7.0	5	15.1
23.5	6.83	57.4	7.2	15.1	24	8	3.4	5.03	7.9	6	15.3
23.5	6.83	57.4	7.2	15.1	26	8	3	5.01	18.1	4.2	15.7
23.5	6.83	57.4	7.2	15.1	28	8	2	5.21	8.5	6.3	15.3
23.5	6.83	57.4	7.2	15.1	30	8	1.96	5.26	8.3	8.1	15.5

Gráfica del comportamiento (réplica) de pH en el agua clarificada, con diferentes dosificaciones de sulfato de aluminio granular y cal hidratada en turbiedades de 23.5 a 25 UNT.



Gráfica del comportamiento de las unidades de color (réplica) en el agua clarificada, con diferentes dosificaciones de sulfato de aluminio granular y cal hidratada en turbiedades de 23.5 a 25 UNT.

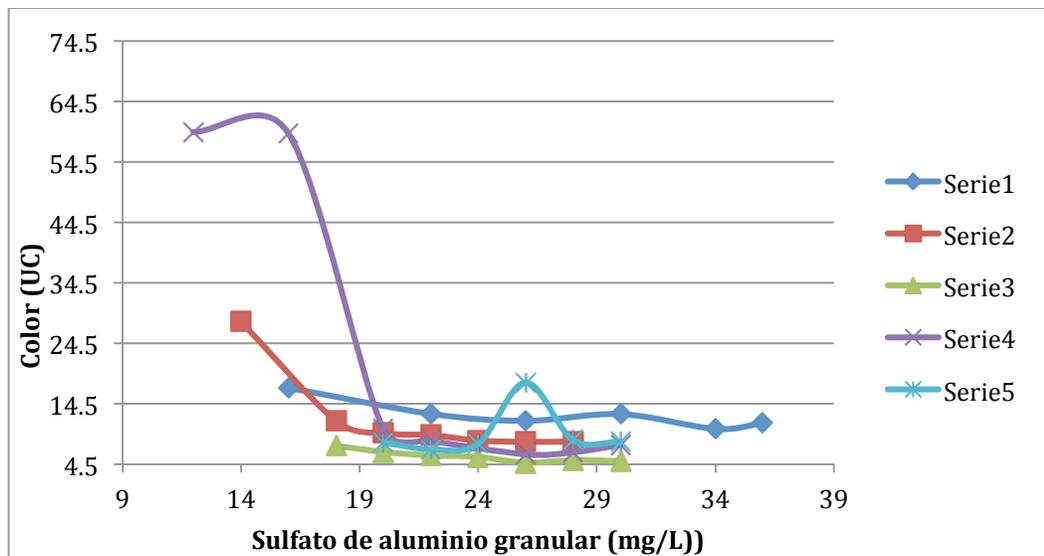
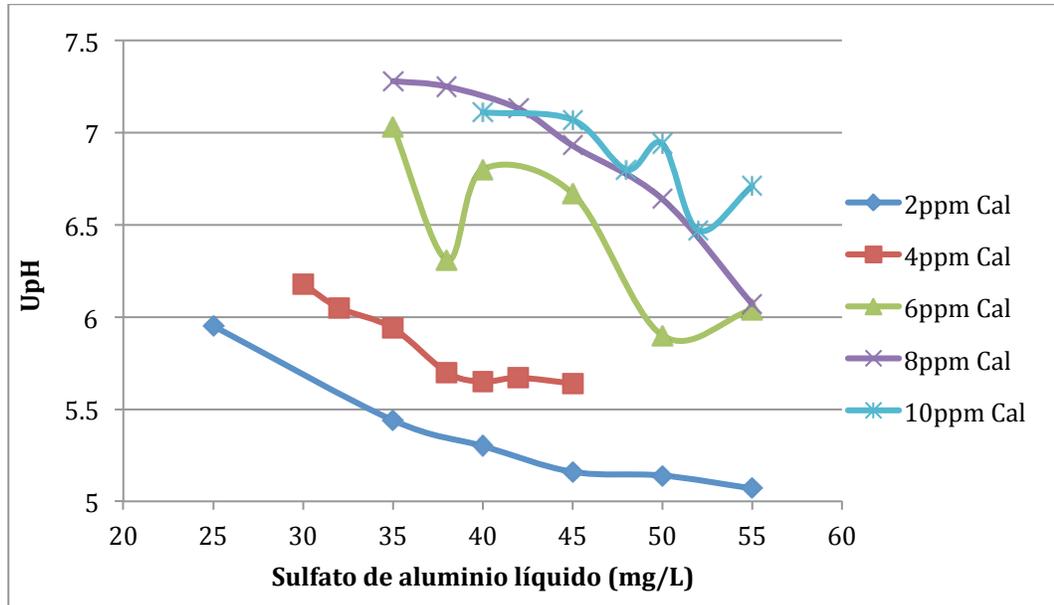


Tabla de parámetros iniciales y resultados con sulfato de aluminio líquido en turbiedades de 13.8 a 19.5 UNT.

Parámetros iniciales							Parámetros agua clarificada				
Turb.	pH	Color	Alcalinidad	Temp. (°C)	S.A.l	Pre-cal	Turb.	pH	Color	Alcalinidad	Temp. (°C)
16.5	6.5	49.3	8.7	15.1	25	2	13.8	5.95	43.1	7.8	15.5
16.5	6.5	49.3	8.7	15.1	35	2	1.74	5.44	9.0	4.1	15.8
16.5	6.5	49.3	8.7	15.1	40	2	1.71	5.3	8.8	6.5	15.6
16.5	6.5	49.3	8.7	15.1	45	2	1.69	5.16	8.7	5.5	15.6
16.5	6.5	49.3	8.7	15.1	50	2	1.58	5.14	8.1	4.5	15.4
16.5	6.5	49.3	8.7	15.1	55	2	1.87	5.07	9.8	3.1	15.4
19.5	6.8	57.2	8	15.2	30	4	19.9	6.18	49.9	6.5	15
19.5	6.8	57.2	8	15.2	32	4	18.8	6.05	48.7	6.3	15.8
19.5	6.8	57.2	8	15.2	35	4	3.64	5.94	22.5	6.2	15.2
19.5	6.8	57.2	8	15.2	38	4	2.6	5.7	15.6	5.3	15.3
19.5	6.8	57.2	8	15.2	40	4	1.57	5.65	8.1	4.5	15.4
19.5	6.8	57.2	8	15.2	42	4	2.01	5.67	9.2	4	15.3
19.5	6.8	57.2	8	15.2	45	4	3.21	5.64	19.8	4.2	15.4
13.8	6.14	47.6	8.5	14.7	35	6	6.03	7.03	37.3	7.3	15.4
13.8	6.14	47.6	8.5	14.7	38	6	5.08	6.31	31.4	5.8	15.2
13.8	6.14	47.6	8.5	14.7	40	6	1.65	6.8	8.5	6.1	15.2
13.8	6.14	47.6	8.5	14.7	45	6	1.15	6.67	6.2	4.5	15
13.8	6.14	47.6	8.5	14.7	50	6	0.942	5.9	5.4	4.6	15
13.8	6.14	47.6	8.5	14.7	55	6	1.03	6.04	5.7	4.2	14.9
13.8	6.14	47.6	8.5	14.7	35	8	17.9	7.28	52.7	7.5	14.4
13.8	6.14	47.6	8.5	14.7	38	8	18.9	7.25	51.8	8.7	14.3
13.8	6.14	47.6	8.5	14.7	42	8	4.1	7.13	25.4	7.2	14.4
13.8	6.14	47.6	8.5	14.7	45	8	2.15	6.93	11.7	6.3	14.4
13.8	6.14	47.6	8.5	14.7	50	8	1.1	6.64	6.0	4.8	14.6
13.8	6.14	47.6	8.5	14.7	55	8	1.15	6.07	6.2	8.9	14.7
16.5	6.5	49.3	8.7	15.1	40	10	17.9	7.11	52.7	8.6	15.2
16.5	6.5	49.3	8.7	15.1	45	10	18.4	7.07	53.2	10.2	15.2
16.5	6.5	49.3	8.7	15.1	48	10	18.7	6.8	51.5	10.3	15.4
16.5	6.5	49.3	8.7	15.1	50	10	2.7	6.94	16.6	9.9	15.2
16.5	6.5	49.3	8.7	15.1	52	10	3.52	6.47	24.8	6	15.1
16.5	6.5	49.3	8.7	15.1	55	10	1.01	6.71	5.6	10.7	15.3

Gráfica del comportamiento de pH en el agua clarificada, con diferentes dosificaciones de sulfato de aluminio líquido y cal hidratada en turbiedades de 13.8 a 19.5 UNT.



Gráfica del comportamiento de las unidades de color en el agua clarificada, con diferentes dosificaciones de sulfato de aluminio líquido y cal hidratada en turbiedades de 13.8 a 19.5 UNT.

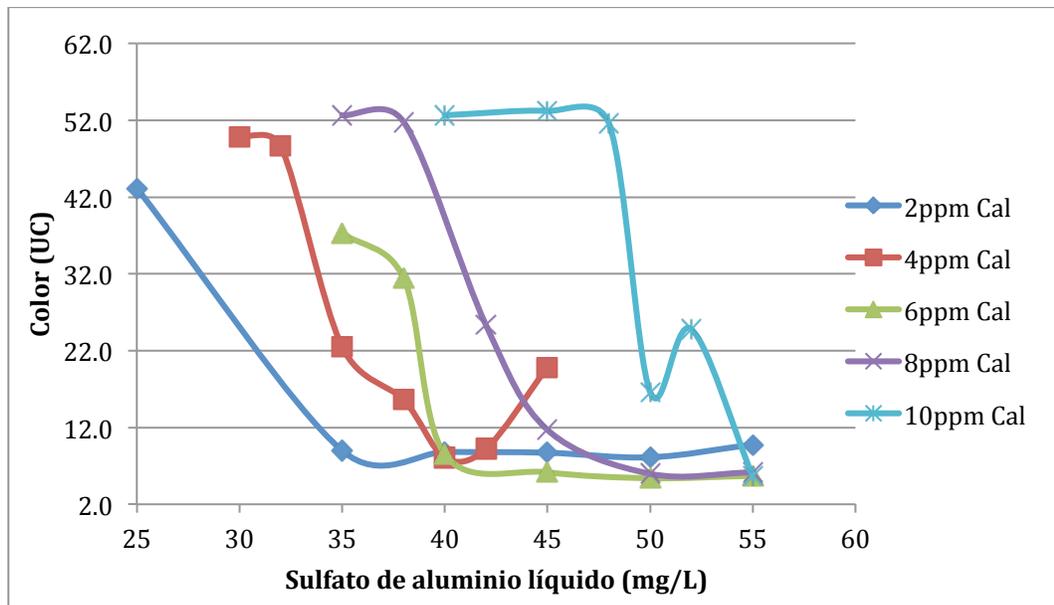
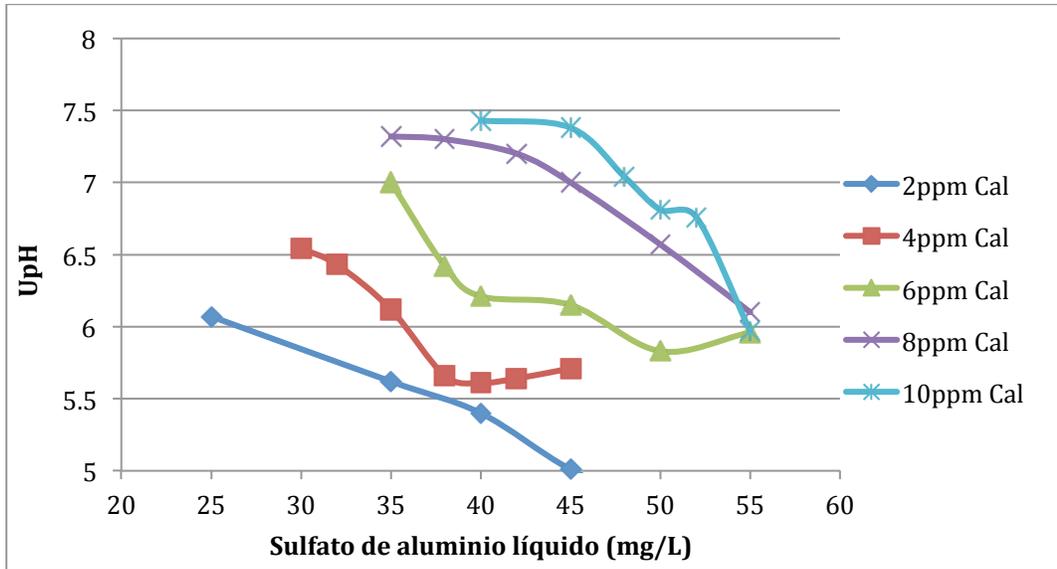


Tabla de parámetros iniciales y resultados (réplica) con sulfato de aluminio líquido en turbiedades de 13.8 a 19.5 UNT.

Parámetros iniciales							Parámetros agua clarificada				
Turb.	pH	Color	Alcalinidad	Temp. (°C)	S.A.l	Pre-cal	Turb.	pH	Color	Alcalinidad	Temp. (°C)
16.5	6.5	49.3	8.7	15.1	25	2	14.3	6.07	43.7	8.6	15.4
16.5	6.5	49.3	8.7	15.1	35	2	1.8	5.62	9.3	5.3	15.6
16.5	6.5	49.3	8.7	15.1	40	2	1.73	5.4	8.9	4.6	15.6
16.5	6.5	49.3	8.7	15.1	45	2	1.62	5.01	8.3	7.1	15.5
16.5	6.5	49.3	8.7	15.1	50	2	1.42	4.75	7.3	4.1	15.6
16.5	6.5	49.3	8.7	15.1	55	2	1.69	4.92	8.7	2.7	15.3
19.5	6.8	57.2	8	15.2	30	4	18.4	6.54	48.2	7.2	15.4
19.5	6.8	57.2	8	15.2	32	4	17.2	6.43	46.9	6.1	15.4
19.5	6.8	57.2	8	15.2	35	4	3.73	6.12	23.1	6	15.8
19.5	6.8	57.2	8	15.2	38	4	2.76	5.66	17.3	5.7	15.8
19.5	6.8	57.2	8	15.2	40	4	1.31	5.61	6.8	5.1	15.6
19.5	6.8	57.2	8	15.2	42	4	1.92	5.64	8.2	4.6	15.6
19.5	6.8	57.2	8	15.2	45	4	2.86	5.71	17.7	5.5	15.5
13.8	6.14	47.6	8.5	14.7	35	6	5.99	7	37.0	8.5	15
13.8	6.14	47.6	8.5	14.7	38	6	4.01	6.42	24.8	7.1	15.1
13.8	6.14	47.6	8.5	14.7	40	6	1.54	6.21	7.9	5.5	15.1
13.8	6.14	47.6	8.5	14.7	45	6	1.23	6.15	6.5	6	15.3
13.8	6.14	47.6	8.5	14.7	50	6	1.02	5.83	5.7	5.1	15.5
13.8	6.14	47.6	8.5	14.7	55	6	1.09	5.96	5.9	4	15.3
13.8	6.14	47.6	8.5	14.7	35	8	18.2	7.32	53.0	8.1	15.2
13.8	6.14	47.6	8.5	14.7	38	8	16.7	7.3	49.3	7.7	15.1
13.8	6.14	47.6	8.5	14.7	42	8	4.7	7.2	29.1	7	15
13.8	6.14	47.6	8.5	14.7	45	8	2.24	7	12.4	7	15.1
13.8	6.14	47.6	8.5	14.7	50	8	1.26	6.57	6.6	5.2	15.3
13.8	6.14	47.6	8.5	14.7	55	8	1.32	6.1	6.9	7.3	14.9
16.5	6.5	49.3	8.7	15.1	40	10	19.2	7.43	54.1	10	15
16.5	6.5	49.3	8.7	15.1	45	10	18.6	7.38	53.4	10	15.3
16.5	6.5	49.3	8.7	15.1	48	10	16.5	7.04	49.1	9.2	15.5
16.5	6.5	49.3	8.7	15.1	50	10	3.31	6.81	24.6	6.3	15.1
16.5	6.5	49.3	8.7	15.1	52	10	3.26	6.76	23.2	6.8	15
16.5	6.5	49.3	8.7	15.1	55	10	0.974	5.97	5.5	8.9	15.3

Gráfica del comportamiento (réplica) de pH en el agua clarificada, con diferentes dosificaciones de sulfato de aluminio líquido y cal hidratada en turbiedades de 13.8 a 19.5 UNT.



Gráfica del comportamiento de las unidades de color (réplica) en el agua clarificada, con diferentes dosificaciones de sulfato de aluminio líquido y cal hidratada en turbiedades de 13.8 a 19.5 UNT.

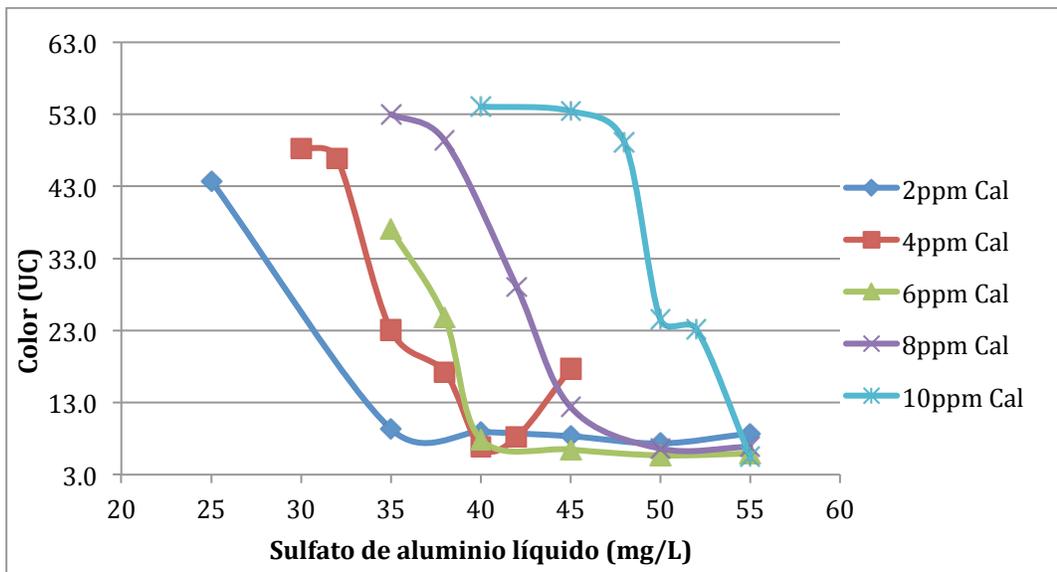
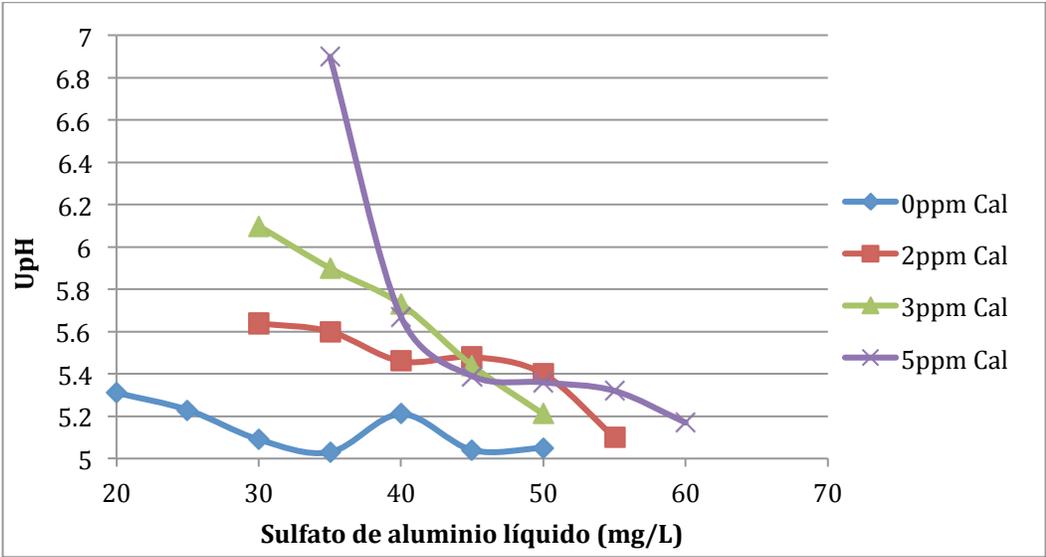


Tabla de parámetros iniciales y resultados con sulfato de aluminio líquido en turbiedades de 29.1 a 29.5 UNT.

Parámetros iniciales							Parámetros agua clarificada				
Turb.	pH	Color	Alcalinidad	Temp. (°C)	S.A.l	Pre-cal	Turb.	pH	Color	Alcalinidad	Temp. (°C)
29.1	7.01	68.2	7.7	14.5	20	0	34.2	5.31	80.2	3.4	15
29.1	7.01	68.2	7.7	14.5	25	0	31.1	5.23	72.9	2.1	15
29.1	7.01	68.2	7.7	14.5	30	0	11.8	5.09	27.7	2	15
29.1	7.01	68.2	7.7	14.5	35	0	8.03	5.03	18.8	3	15
29.1	7.01	68.2	7.7	14.5	40	0	6.05	5.21	14.2	2	14.6
29.1	7.01	68.2	7.7	14.5	45	0	5.51	5.04	12.9	3.5	14.6
29.1	7.01	68.2	7.7	14.5	50	0	4.98	5.05	11.7	2.5	14.6
29.5	6.31	67.8	8	14.5	30	2	35.5	5.64	78.2	4.1	15
29.5	6.31	67.8	8	14.5	35	2	6.87	5.6	16.1	4	15.3
29.5	6.31	67.8	8	14.5	40	2	3.56	5.46	10.3	3	15.3
29.5	6.31	67.8	8	14.5	45	2	2.12	5.48	7.0	1.9	15.4
29.5	6.31	67.8	8	14.5	50	2	1.73	5.4	6.1	1.6	15.3
29.5	6.31	67.8	8	14.5	55	2	1.55	5.1	5.8	2	15.3
29.5	6.31	67.8	8	14.5	30	3	34.5	6.1	75.9	4	15.3
29.5	6.31	67.8	8	14.5	35	3	11.9	5.9	27.9	4.4	15.1
29.5	6.31	67.8	8	14.5	40	3	3.86	5.73	11.0	4.9	15.3
29.5	6.31	67.8	8	14.5	45	3	1.69	5.44	6.0	3.5	15.5
29.5	6.31	67.8	8	14.5	50	3	1.52	5.21	5.6	3	15.5
29.5	6.31	67.8	8	14.5	35	5	11.1	6.9	22.5	3.9	15.1
29.5	6.31	67.8	8	14.5	40	5	3.17	5.67	10.8	3.5	15.2
29.5	6.31	67.8	8	14.5	45	5	1.93	5.39	8.4	3.6	15.1
29.5	6.31	67.8	8	14.5	50	5	1.72	5.36	7.6	3.2	14.9
29.5	6.31	67.8	8	14.5	55	5	1.66	5.32	5.9	2.3	14.8
29.5	6.31	67.8	8	14.5	60	5	1.51	5.17	5.4	3	14.9

Gráfica del comportamiento de pH en el agua clarificada, con diferentes dosificaciones de sulfato de aluminio líquido y cal hidratada en turbiedades de 29.1 a 29.5 UNT.



Gráfica del comportamiento de las unidades de color en el agua clarificada, con diferentes dosificaciones de sulfato de aluminio líquido y cal hidratada en turbiedades de 29.1 a 29.5 UNT.

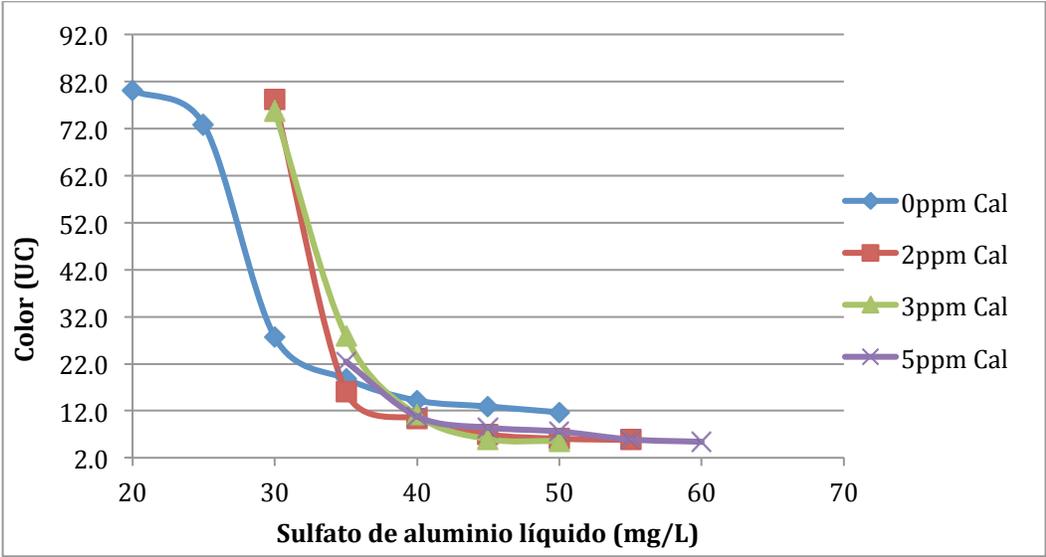
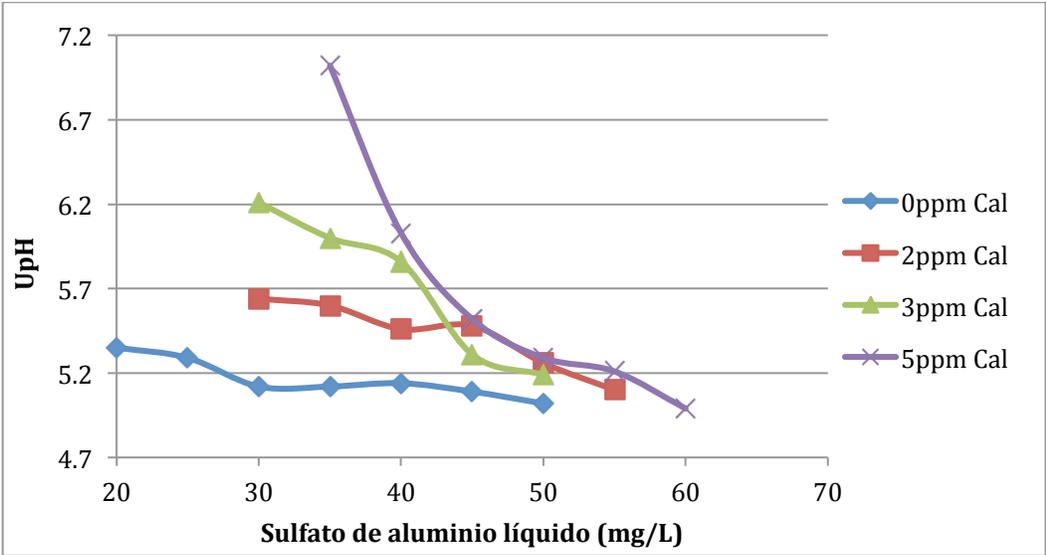


Tabla de parámetros iniciales y resultados (réplica) con sulfato de aluminio líquido en turbiedades de 29.1 a 29.5 UNT.

Parámetros iniciales							Parámetros agua clarificada				
Turb.	pH	Color	Alcalinidad	Temp. (°C)	S.A.l	Pre-cal	Turb.	pH	Color	Alcalinidad	Temp. (°C)
29.1	7.01	68.2	7.7	14.5	20	0	33.9	5.35	79.4	3	15.3
29.1	7.01	68.2	7.7	14.5	25	0	31.4	5.29	73.6	2.8	15.3
29.1	7.01	68.2	7.7	14.5	30	0	12	5.12	28.1	3	15.4
29.1	7.01	68.2	7.7	14.5	35	0	8.2	5.12	19.2	3	15.6
29.1	7.01	68.2	7.7	14.5	40	0	7.3	5.14	17.1	2.5	15.2
29.1	7.01	68.2	7.7	14.5	45	0	5.12	5.09	12.0	3	15.3
29.1	7.01	68.2	7.7	14.5	50	0	5.01	5.02	11.7	2.7	15.1
29.5	6.31	67.8	8	14.5	30	2	32.1	5.64	70.2	4.1	15.1
29.5	6.31	67.8	8	14.5	35	2	6.43	5.6	15.1	4	15.4
29.5	6.31	67.8	8	14.5	40	2	4.23	5.46	11.9	3	15.3
29.5	6.31	67.8	8	14.5	45	2	2.11	5.48	6.9	1.9	15.2
29.5	6.31	67.8	8	14.5	50	2	1.52	5.26	5.6	2	15.4
29.5	6.31	67.8	8	14.5	55	2	1.49	5.1	5.0	2.4	15.5
29.5	6.31	67.8	8	14.5	30	3	33.7	6.21	74.0	5	15.5
29.5	6.31	67.8	8	14.5	35	3	10.8	6	25.3	4.7	15.3
29.5	6.31	67.8	8	14.5	40	3	4.1	5.86	11.6	5.3	15.5
29.5	6.31	67.8	8	14.5	45	3	1.56	5.31	5.7	3	15.5
29.5	6.31	67.8	8	14.5	50	3	1.35	5.19	5.2	4	15.7
29.5	6.31	67.8	8	14.5	35	5	13.4	7.02	26.1	4.7	14.9
29.5	6.31	67.8	8	14.5	40	5	3.63	6.03	11.1	3	14.9
29.5	6.31	67.8	8	14.5	45	5	1.95	5.52	8.7	3.2	15
29.5	6.31	67.8	8	14.5	50	5	1.62	5.29	7.2	2.9	14.8
29.5	6.31	67.8	8	14.5	55	5	1.6	5.21	5.6	2.7	14.6
29.5	6.31	67.8	8	14.5	60	5	1.58	4.99	5.4	3.8	15

Gráfica del comportamiento (réplica) de pH en el agua clarificada, con diferentes dosificaciones de sulfato de aluminio líquido y cal hidratada en turbiedades de 29.1 a 29.5 UNT.



Gráfica del comportamiento de las unidades de color (réplica) en el agua clarificada, con diferentes dosificaciones de sulfato de aluminio líquido y cal hidratada en turbiedades de 29.1 a 29.5 UNT.

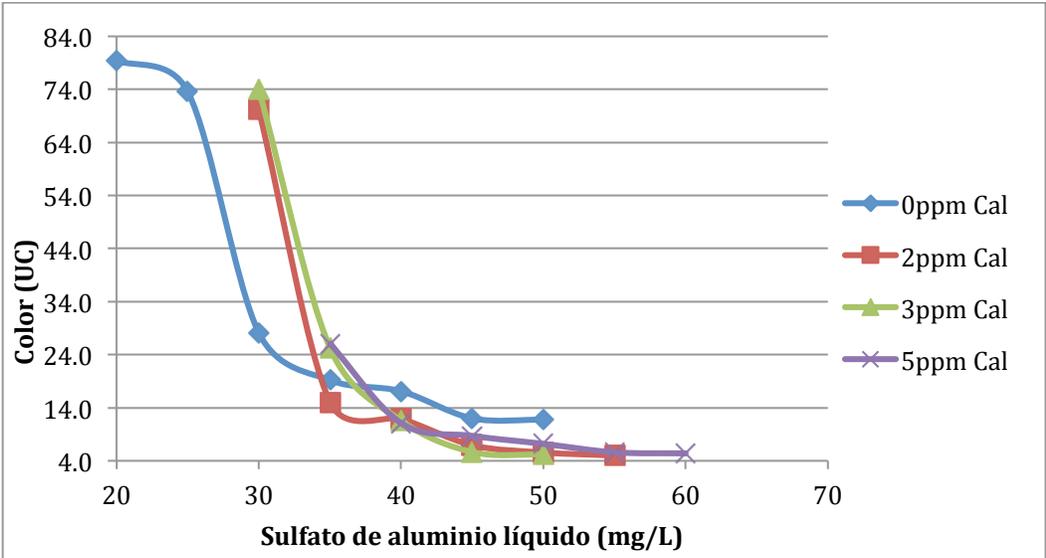
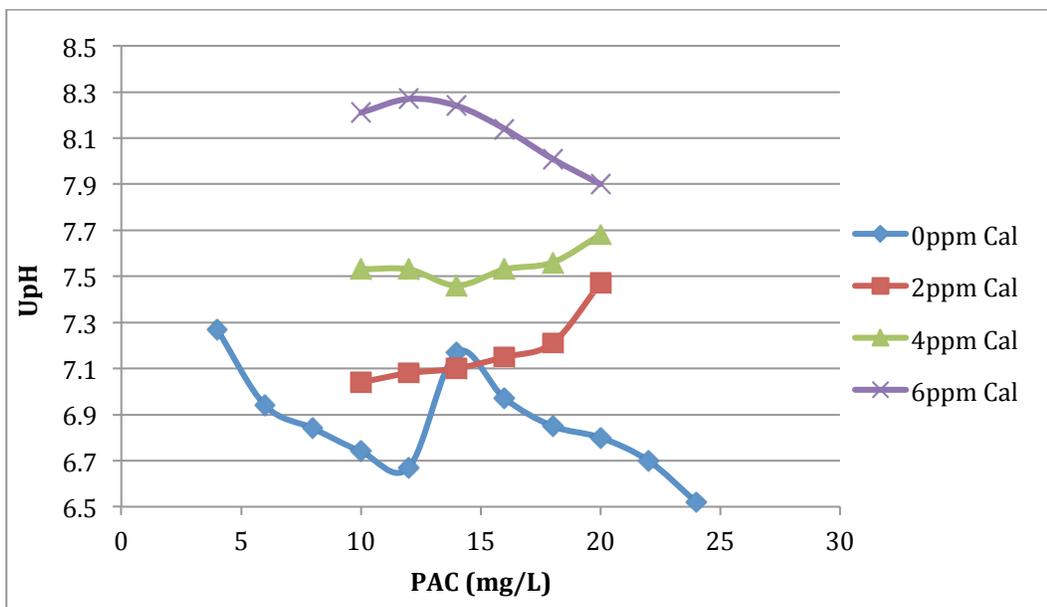


Tabla de parámetros iniciales y resultados con hidroxiclورو de aluminio (PAC) en turbiedades de 4.65 a 4.9 UNT.

Parámetros iniciales							Parámetros agua clarificada				
Turb.	pH	Color	Alcalinidad	Temp. (°C)	PAC	Pre-cal	Turb.	pH	Color	Alcalinidad	Temp. (°C)
4.9	7.02	30.3	9.3	13.7	4	0	5.64	7.27	34.9	10.1	13.5
4.9	7.02	30.3	9.3	13.7	6	0	5.79	6.94	35.8	10.3	14
4.9	7.02	30.3	9.3	13.7	8	0	5.84	6.84	36.1	9	14
4.9	7.02	30.3	9.3	13.7	10	0	3.94	6.74	24.4	7.7	14
4.9	7.02	30.3	9.3	13.7	12	0	2.36	6.67	10.6	7.5	13.8
4.9	7.02	30.3	9.3	13.7	14	0	1.84	7.17	8.1	8.1	13.8
4.9	7.02	30.3	9.3	13.7	16	0	0.806	6.97	3.0	7.8	14.2
4.9	7.02	30.3	9.3	13.7	18	0	0.941	6.85	3.7	7.1	14.2
4.9	7.02	30.3	9.3	13.7	20	0	0.995	6.8	4.0	6.6	14.3
4.9	7.02	30.3	9.3	13.7	22	0	0.929	6.7	3.7	6.2	14.5
4.9	7.02	30.3	9.3	13.7	24	0	1.5	6.52	6.4	6.2	14.2
4.65	6.75	31.5	9.5	14	10	2	5	7.04	30.9	9.7	14
4.65	6.75	31.5	9.5	14	12	2	2.27	7.08	10.1	10.1	14
4.65	6.75	31.5	9.5	14	14	2	1.91	7.1	8.4	9.3	14.5
4.65	6.75	31.5	9.5	14	16	2	1.55	7.15	6.7	9.2	14.6
4.65	6.75	31.5	9.5	14	18	2	1.15	7.21	4.7	8.9	14.5
4.65	6.75	31.5	9.5	14	20	2	1.63	7.47	7.1	8.2	14.7
4.65	6.75	31.5	9.5	14	10	4	5.35	7.53	33.1	12.6	14
4.65	6.75	31.5	9.5	14	12	4	5.18	7.53	32.0	11.8	13.8
4.65	6.75	31.5	9.5	14	14	4	3.51	7.46	21.7	12.8	14.2
4.65	6.75	31.5	9.5	14	16	4	2.17	7.53	9.7	11.7	14.3
4.65	6.75	31.5	9.5	14	18	4	1.75	7.56	7.6	11.5	14.2
4.65	6.75	31.5	9.5	14	20	4	1.34	7.68	5.7	12.2	14.2
4.77	7.33	31.7	9.4	14.7	10	6	4.8	8.21	29.7	15.6	14.6
4.77	7.33	31.7	9.4	14.7	12	6	5.28	8.27	32.6	14.1	14.5
4.77	7.33	31.7	9.4	14.7	14	6	5.17	8.24	32.0	15.5	14.8
4.77	7.33	31.7	9.4	14.7	16	6	4.4	8.14	27.2	14.5	14.8
4.77	7.33	31.7	9.4	14.7	18	6	3.88	8.01	24.0	14.9	14.7
4.77	7.33	31.7	9.4	14.7	20	6	3.06	7.9	18.9	14	14.9

Gráfica del comportamiento de pH en el agua clarificada, con diferentes dosificaciones de PAC y cal hidrata en turbiedades de 4.65 a 4.9 UNT.



Gráfica del comportamiento de las unidades de color en el agua clarificada, con diferentes dosificaciones de PAC y cal hidrata en turbiedades de 4.65 a 4.9 UNT.

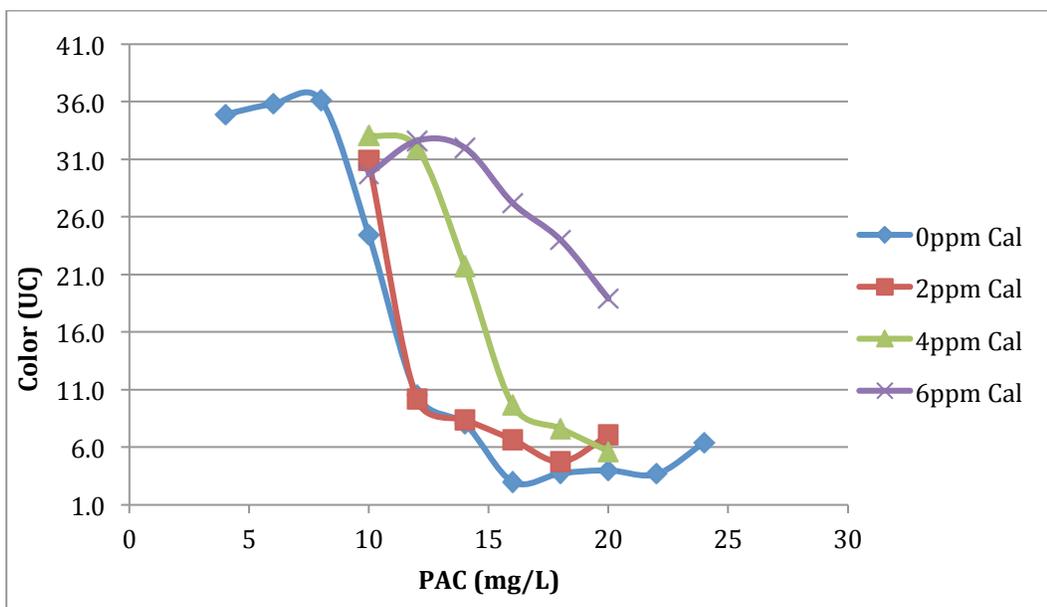
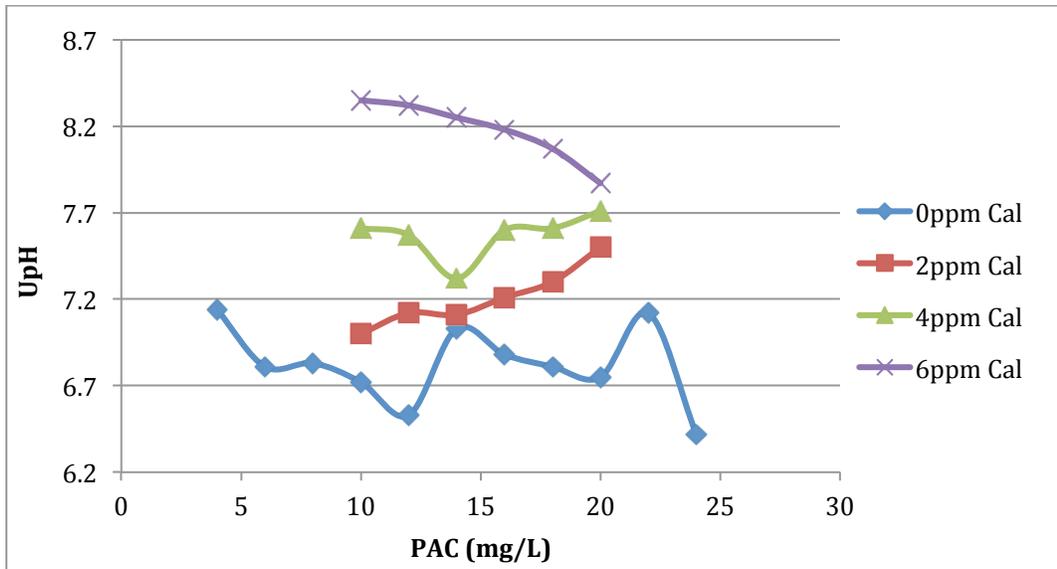


Tabla de parámetros iniciales y resultados (réplica) con hidroxiclورو de aluminio (PAC) en turbiedades de 4.65 a 4.9 UNT.

Parámetros iniciales							Parámetros agua clarificada				
Turb.	pH	Color	Alcalinidad	Temp. (°C)	PAC	Pre-cal	Turb.	pH	Color	Alcalinidad	Temp. (°C)
4.9	7.02	30.3	9.3	13.7	4	0	5.51	7.14	35.1	9.3	14
4.9	7.02	30.3	9.3	13.7	6	0	5.75	6.81	35.6	10	14.1
4.9	7.02	30.3	9.3	13.7	8	0	5.81	6.83	35.9	9.4	13.9
4.9	7.02	30.3	9.3	13.7	10	0	3.85	6.72	23.8	8.1	13.9
4.9	7.02	30.3	9.3	13.7	12	0	2.41	6.53	10.8	7	13.8
4.9	7.02	30.3	9.3	13.7	14	0	1.72	7.03	7.5	8.8	13.9
4.9	7.02	30.3	9.3	13.7	16	0	0.787	6.88	3.0	7.4	14
4.9	7.02	30.3	9.3	13.7	18	0	0.981	6.81	3.9	6.3	14.3
4.9	7.02	30.3	9.3	13.7	20	0	1.01	6.75	4.1	6	14.2
4.9	7.02	30.3	9.3	13.7	22	0	0.916	7.12	3.6	7.9	14.2
4.9	7.02	30.3	9.3	13.7	24	0	1.58	6.42	6.8	6.8	14
4.65	6.75	31.5	9.5	14	10	2	5.2	7	32.2	10	15
4.65	6.75	31.5	9.5	14	12	2	2.18	7.12	13.8	11	15.2
4.65	6.75	31.5	9.5	14	14	2	1.9	7.11	8.4	9	14.9
4.65	6.75	31.5	9.5	14	16	2	1.52	7.21	6.5	10	14.9
4.65	6.75	31.5	9.5	14	18	2	1.21	7.3	5.0	8.6	15
4.65	6.75	31.5	9.5	14	20	2	1.57	7.5	6.8	8	15
4.65	6.75	31.5	9.5	14	10	4	5.41	7.61	33.5	14	14.1
4.65	6.75	31.5	9.5	14	12	4	5.09	7.57	31.5	12	13.9
4.65	6.75	31.5	9.5	14	14	4	3.48	7.32	21.5	11.9	14.2
4.65	6.75	31.5	9.5	14	16	4	2.2	7.6	9.8	11	14
4.65	6.75	31.5	9.5	14	18	4	1.82	7.61	8.0	10.3	14.1
4.65	6.75	31.5	9.5	14	20	4	1.41	7.71	6.0	11.8	14
4.77	7.33	31.7	9.4	14.7	10	6	5	8.35	30.9	16	14.7
4.77	7.33	31.7	9.4	14.7	12	6	5.01	8.32	31.0	15.3	14.2
4.77	7.33	31.7	9.4	14.7	14	6	5.2	8.25	32.2	14.2	14.5
4.77	7.33	31.7	9.4	14.7	16	6	4.8	8.18	29.7	13	14.5
4.77	7.33	31.7	9.4	14.7	18	6	4	8.07	24.7	12.5	14.5
4.77	7.33	31.7	9.4	14.7	20	6	3.02	7.87	18.7	12.6	14.8

Gráfica del comportamiento (réplica) de pH en el agua clarificada, con diferentes dosificaciones de PAC y cal hidratada en turbiedades de 4.65 a 4.9 UNT.



Gráfica del comportamiento de las unidades de color (réplica) en el agua clarificada, con diferentes dosificaciones de PAC y cal hidratada en turbiedades de 4.65 a 4.9 UNT.

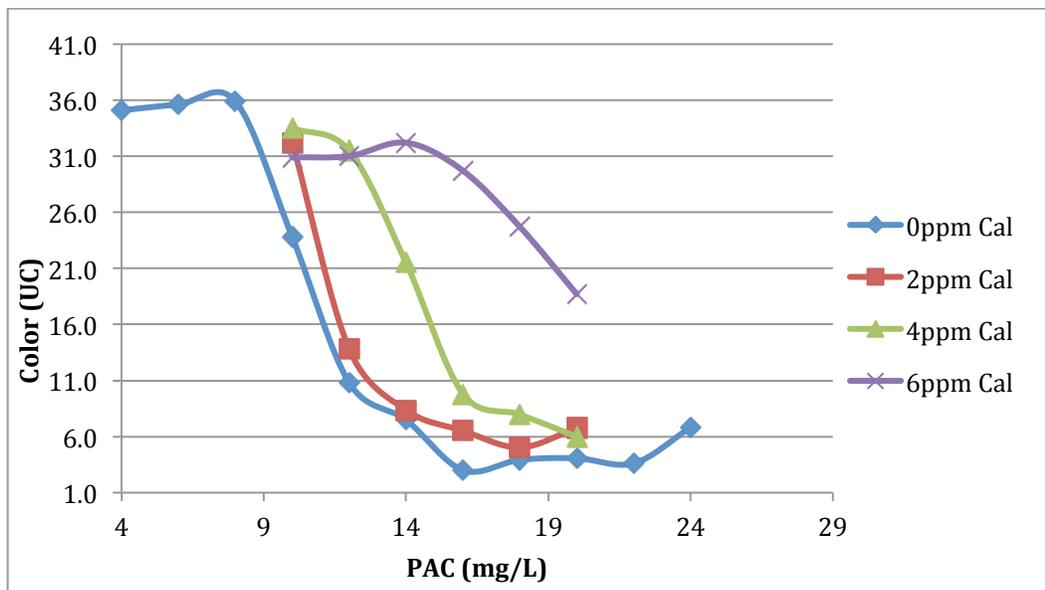
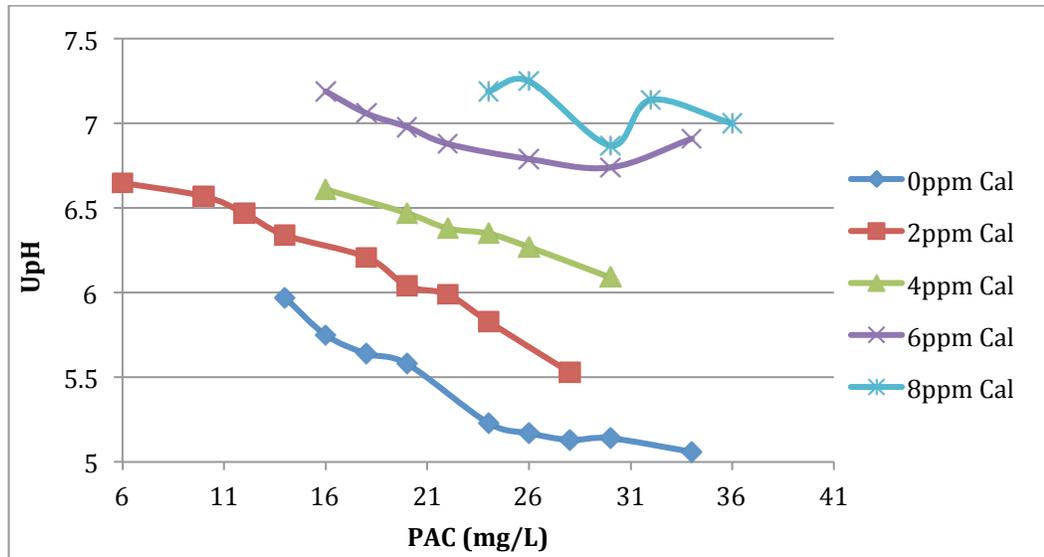


Tabla de parámetros iniciales y resultados con hidroxiclorigenato de aluminio (PAC) en turbiedades de 18.6 a 20.1 UNT.

Parámetros iniciales							Parámetros agua clarificada				
Turb.	pH	Color	Alcalinidad	Temp. (°C)	PAC	Pre-cal	Turb.	pH	Color	Alcalinidad	Temp. (°C)
20.1	7.35	55.2	7.4	13.8	14	0	7.34	5.97	24.4	4.2	13.8
20.1	7.35	55.2	7.4	13.8	16	0	3.24	5.75	10.2	3.6	13.6
20.1	7.35	55.2	7.4	13.8	18	0	2.31	5.64	8.3	3.9	13.7
20.1	7.35	55.2	7.4	13.8	20	0	1.23	5.58	5.4	3.5	14
20.1	7.35	55.2	7.4	13.8	24	0	1.08	5.23	4.5	3	14
20.1	7.35	55.2	7.4	13.8	26	0	1.57	5.17	5.3	3.5	14.2
20.1	7.35	55.2	7.4	13.8	28	0	0.93	5.13	3.1	3.4	14
20.1	7.35	55.2	7.4	13.8	30	0	1.03	5.14	3.4	3.9	13.9
20.1	7.35	55.2	7.4	13.8	34	0	0.991	5.06	3.0	3.9	14.1
20.1	7.35	55.2	7.4	13.8	6	2	19.4	6.65	55.8	8.3	13.7
20.1	7.35	55.2	7.4	13.8	10	2	20.1	6.57	62.8	7.6	13.7
20.1	7.35	55.2	7.4	13.8	12	2	20.9	6.47	64.3	7	13.8
20.1	7.35	55.2	7.4	13.8	14	2	20.5	6.34	59.0	5.6	13.8
20.1	7.35	55.2	7.4	13.8	18	2	4.62	6.21	13.3	5.9	13.8
20.1	7.35	55.2	7.4	13.8	20	2	1.95	6.04	6.6	4.5	13.7
20.1	7.35	55.2	7.4	13.8	22	2	1.17	5.99	3.4	5.1	14
20.1	7.35	55.2	7.4	13.8	24	2	1.18	5.83	3.4	4.2	13.8
20.1	7.35	55.2	7.4	13.8	28	2	1.15	5.53	3.7	4.4	13.6
18.8	6.46	54.1	8.1	14	16	4	20.2	6.61	63.1	8	13.7
18.8	6.46	54.1	8.1	14	20	4	3.71	6.47	10.7	6.1	13.8
18.8	6.46	54.1	8.1	14	22	4	1.57	6.38	3.5	7.2	14
18.8	6.46	54.1	8.1	14	24	4	1.3	6.35	3.4	6.9	13.9
18.8	6.46	54.1	8.1	14	26	4	1.68	6.27	3.8	5.7	13.7
18.8	6.46	54.1	8.1	14	30	4	1.42	6.09	3.1	4.3	14
18.8	6.46	54.1	8.1	14	16	6	19.7	7.19	60.7	10.3	13.9
18.8	6.46	54.1	8.1	14	18	6	20.3	7.06	63.4	9.1	13.9
18.8	6.46	54.1	8.1	14	20	6	20.3	6.98	63.2	8.6	14
18.8	6.46	54.1	8.1	14	22	6	8.26	6.88	22.8	7.1	14.1
18.8	6.46	54.1	8.1	14	26	6	1.43	6.79	3.1	7	14
18.8	6.46	54.1	8.1	14	30	6	0.959	6.74	2.8	6.2	14.2
18.8	6.46	54.1	8.1	14	34	6	1.43	6.91	3.1	5.3	14
18.6	6.84	52.8	7.6	14	24	8	20.3	7.19	61.4	10.7	14.4
18.6	6.84	52.8	7.6	14	26	8	18.7	7.25	56.8	9.5	14.3
18.6	6.84	52.8	7.6	14	30	8	1.64	6.87	4.7	7.8	14.3
18.6	6.84	52.8	7.6	14	32	8	1.21	7.14	3.5	7.5	14.4
18.6	6.84	52.8	7.6	14	36	8	1.19	7	3.4	6.8	14.3

Gráfica del comportamiento de pH en el agua clarificada, con diferentes dosificaciones de PAC y cal hidrata en turbiedades de 18.6 a 20.1 UNT.



Gráfica del comportamiento de las unidades de color en el agua clarificada, con diferentes dosificaciones de PAC y cal hidrata en turbiedades de 18.6 a 20.1 UNT.

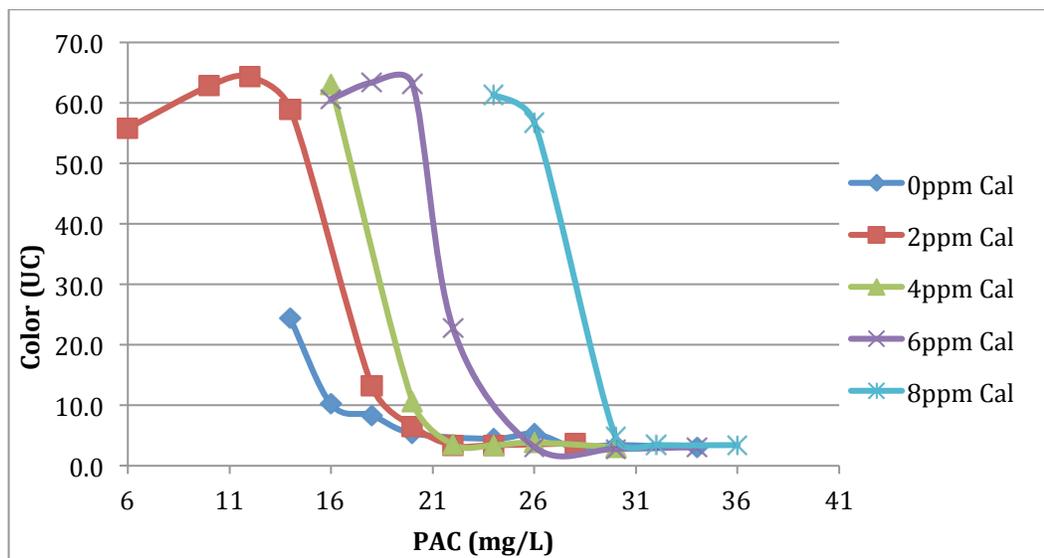
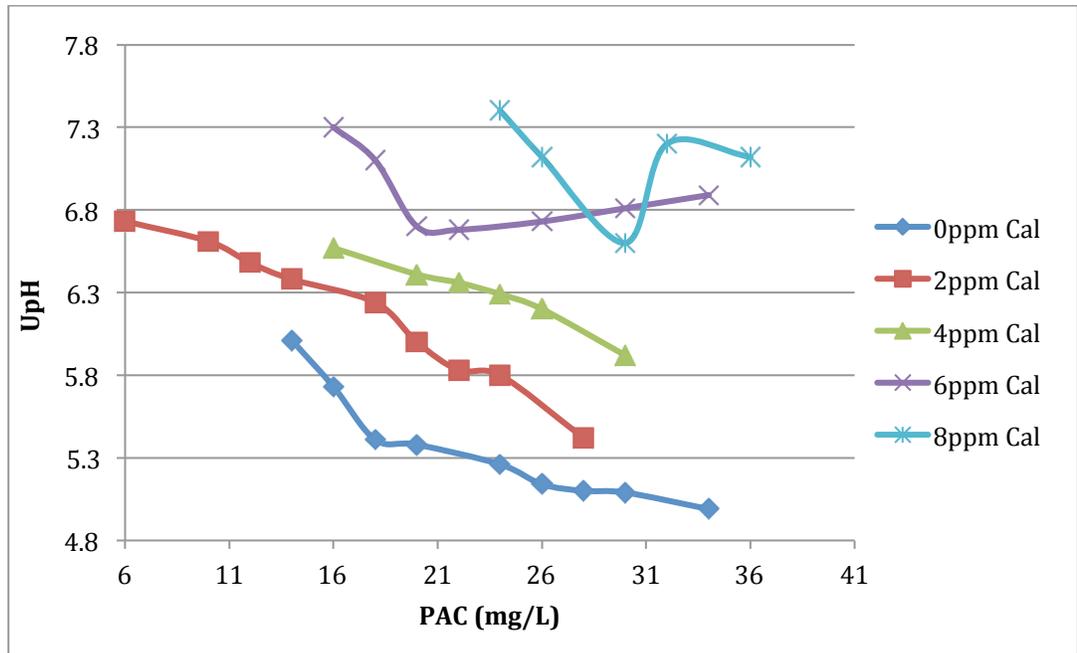


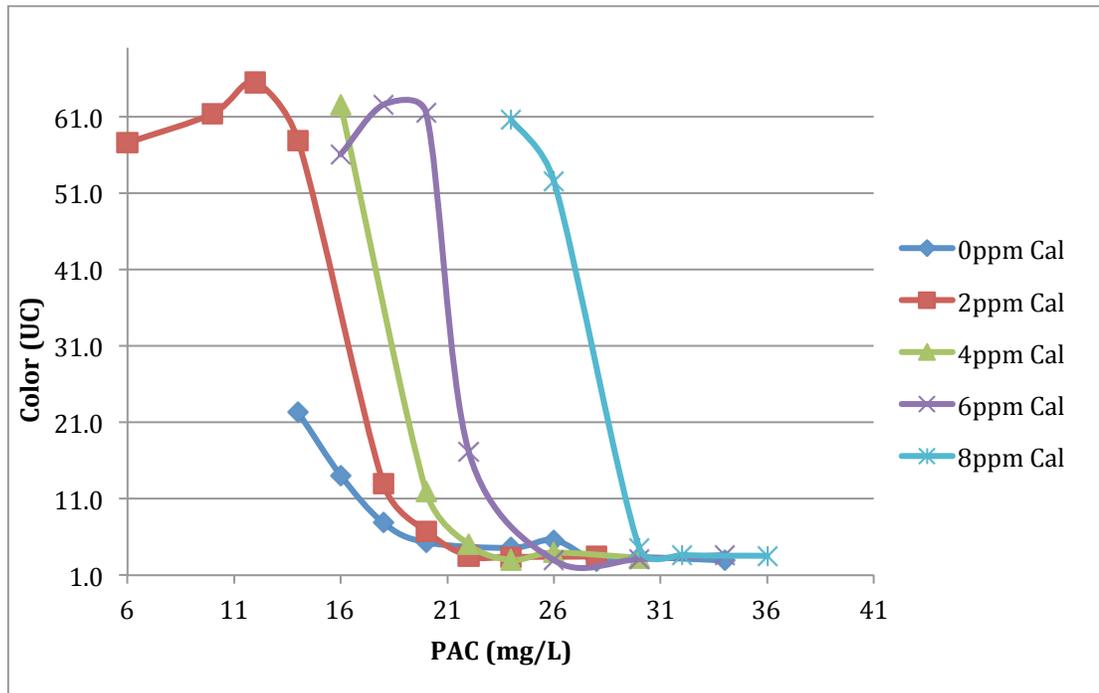
Tabla de parámetros iniciales y resultados (réplica) con hidroxiclورو de aluminio (PAC) en turbiedades de 18.6 a 20.1 UNT.

Parámetros iniciales							Parámetros agua clarificada				
Turb.	pH	Color	Alcalinidad	Temp. (°C)	PAC	Pre-cal	Turb.	pH	Color	Alcalinidad	Temp. (°C)
20.1	7.35	55.2	7.4	13.8	14	0	6.62	6.01	22.4	5.1	14
20.1	7.35	55.2	7.4	13.8	16	0	4.64	5.73	14.0	4.2	14.1
20.1	7.35	55.2	7.4	13.8	18	0	2.13	5.41	7.8	3.5	13.8
20.1	7.35	55.2	7.4	13.8	20	0	1.2	5.38	5.3	3	14.1
20.1	7.35	55.2	7.4	13.8	24	0	1.12	5.26	4.6	3.4	14.2
20.1	7.35	55.2	7.4	13.8	26	0	1.68	5.14	5.6	4	14.4
20.1	7.35	55.2	7.4	13.8	28	0	0.864	5.1	2.9	4.3	14
20.1	7.35	55.2	7.4	13.8	30	0	1	5.09	3.3	4.7	13.7
20.1	7.35	55.2	7.4	13.8	34	0	0.962	4.99	2.9	4.5	14.4
20.1	7.35	55.2	7.4	13.8	6	2	20	6.73	57.6	9.4	14
20.1	7.35	55.2	7.4	13.8	10	2	19.6	6.61	61.4	8.1	14
20.1	7.35	55.2	7.4	13.8	12	2	21.3	6.48	65.5	7.3	13.8
20.1	7.35	55.2	7.4	13.8	14	2	20.1	6.38	57.8	6.2	13.9
20.1	7.35	55.2	7.4	13.8	18	2	4.5	6.24	12.9	5.2	13.8
20.1	7.35	55.2	7.4	13.8	20	2	2.01	6	6.8	4.8	13.8
20.1	7.35	55.2	7.4	13.8	22	2	1.22	5.83	3.5	4.6	14.1
20.1	7.35	55.2	7.4	13.8	24	2	1.18	5.8	3.4	4.1	14.1
20.1	7.35	55.2	7.4	13.8	28	2	1.06	5.42	3.5	4.9	14
18.8	6.46	54.1	8.1	14	16	4	20	6.57	62.6	6.4	14
18.8	6.46	54.1	8.1	14	20	4	4.16	6.41	12.0	7.3	13.9
18.8	6.46	54.1	8.1	14	22	4	2.1	6.36	5.0	7	14.2
18.8	6.46	54.1	8.1	14	24	4	1.15	6.29	3.0	6.6	13.8
18.8	6.46	54.1	8.1	14	26	4	1.72	6.2	3.9	5.1	13.7
18.8	6.46	54.1	8.1	14	30	4	1.49	5.92	3.3	5	14.3
18.8	6.46	54.1	8.1	14	16	6	18.1	7.3	56.1	11.6	13.9
18.8	6.46	54.1	8.1	14	18	6	20	7.1	62.6	10.2	14.1
18.8	6.46	54.1	8.1	14	20	6	19.7	6.7	61.5	9.3	14.1
18.8	6.46	54.1	8.1	14	22	6	6.32	6.68	17.2	8	13.8
18.8	6.46	54.1	8.1	14	26	6	1.38	6.73	3.0	7.7	13.8
18.8	6.46	54.1	8.1	14	30	6	0.989	6.81	3.1	5.1	14
18.8	6.46	54.1	8.1	14	34	6	1.61	6.89	3.6	4.8	14
18.6	6.84	52.8	7.6	14	24	8	20	7.4	60.6	11.9	14
18.6	6.84	52.8	7.6	14	26	8	17.2	7.12	52.5	10.1	14.2
18.6	6.84	52.8	7.6	14	30	8	1.58	6.6	4.5	7.3	14
18.6	6.84	52.8	7.6	14	32	8	1.27	7.2	3.7	7	14.6
18.6	6.84	52.8	7.6	14	36	8	1.23	7.12	3.5	6.2	14.4

Gráfica del comportamiento (réplica) de pH en el agua clarificada, con diferentes dosificaciones de PAC y cal hidrata en turbiedades de 18.6 a 20.1 UNT.



Gráfica del comportamiento de las unidades de color (réplica) en el agua clarificada, con diferentes dosificaciones de PAC y cal hidrata en turbiedades de 18.6 a 20.1 UNT



**ANEXO E.
DATOS HISTORICOS EN PTAP EL DORADO, AÑO 2017.**

Tabla de dosificaciones (por mes) de productos químicos utilizados en el proceso de potabilización en la PTAP El Dorado, año 2017.

MES	DOSIFICACIONES			
	Dosificacion sulfato Dorado mg/Lt	Dosificacion Cloro Dorado mg/Lt	Dosificacion Cal Hidratada Dorado mg/Lt	Dosificacion Sal de Mina mg/Lt
Enero	527	67	203	78
Febrero	475	69	173	0
Marzo	571	85	231	0
Abril	583	82	267	0
Mayo	697	88	277	62
Junio	764	57	264	271
Julio	582	45	201	326
Agosto	628	0	182	490
Septiembre	581	74	245	52
Octubre	490	54	191	287
Noviembre	565	52	204	364
Diciembre	546	53	191	295

Tabla de consumo (por mes) de los productos químicos utilizados en el proceso de potabilización en la PTAP El Dorado, año 2017.

MES	CONSUMO PRODUCTOS QUIMICOS (Kg)			
	Sulfato de Aluminio granular	Cloro	Cal Hidratada	Sal de Mina
Enero	19075	2423	7325	2825
Febrero	17875	2598	6525	0
Marzo	20875	3098	8450	0
Abril	21325	2989	9800	0
Mayo	25450	3206	10135	2375
Junio	28150	2095	9725	10000
Julio	21150	1646	7300	11750
Agosto	22925	0	6650	17875
Septiembre	21575	2752	9100	1875
Octubre	18125	1977	7050	10575
Noviembre	20670	1920	7475	13325
Diciembre	19650	1945	6875	10375

Tabla del costo de los productos químicos utilizados en el proceso de potabilización en la PTAP El Dorado, año 2017.

COSTO (por Kg) PRODUCTOS QUIMICOS IVA INCLUIDO					
Período	Sulfato de Aluminio granular	Cloro	Hidroxiclورو de Aluminio	Cal Hidratada	Sal de mina
Enero a Diciembre 2017	\$ 918.00	\$ 3,074.00	\$ 984.84	\$ 571.00	\$ 250.00

Tabla de costos totales (con el consumo actual) de los productos químicos utilizados en el proceso de potabilización en la PTAP El Dorado, año 2017.

COSTO PRODUCTOS QUIMICOS				
MES	Costos Sulfato de Aluminio granular	Costos Cloro	Costos Cal Hidratada	Costos Sal de Mina
Enero	\$ 17,510,850	\$ 7,448,302	\$ 4,182,575	\$ 706,250
Febrero	\$ 16,409,250	\$ 7,986,252	\$ 3,725,775	\$ -
Marzo	\$ 19,163,250	\$ 9,523,252	\$ 4,824,950	\$ -
Abril	\$ 19,576,350	\$ 9,188,186	\$ 5,595,800	\$ -
Mayo	\$ 23,363,100	\$ 9,855,244	\$ 5,787,085	\$ 593,750
Junio	\$ 25,841,700	\$ 6,440,030	\$ 5,552,975	\$ 2,500,000
Julio	\$ 19,415,700	\$ 5,059,804	\$ 4,168,300	\$ 2,937,500
Agosto	\$ 21,045,150	\$ -	\$ 3,797,150	\$ 4,468,750
Septiembre	\$ 19,805,850	\$ 8,459,648	\$ 5,196,100	\$ 468,750
Octubre	\$ 16,638,750	\$ 6,077,298	\$ 4,025,550	\$ 2,643,750
Noviembre	\$ 18,975,060	\$ 5,902,080	\$ 4,268,225	\$ 3,331,250
Diciembre	\$ 18,038,700	\$ 5,978,930	\$ 3,925,625	\$ 2,593,750

Tabla de costos totales (con el consumo actual) de los productos químicos y energía utilizados en el proceso actual de potabilización en la PTAP El Dorado, año 2017.

MES	Costos Totales	Costo Insumos	Costo de Energia
Enero	\$ 51,759,142	\$ 29,847,977	\$ 21,911,165
Febrero	\$ 46,461,702	\$ 28,121,277	\$ 18,340,425
Marzo	\$ 53,303,938	\$ 33,511,452	\$ 19,792,486
Abril	\$ 54,671,004	\$ 34,360,336	\$ 20,310,668
Mayo	\$ 59,294,682	\$ 39,599,179	\$ 19,695,503
Junio	\$ 65,220,311	\$ 40,334,705	\$ 24,885,606
Julio	\$ 56,406,006	\$ 31,581,304	\$ 24,824,702
Agosto	\$ 46,453,424	\$ 29,311,050	\$ 17,142,374
Septiembre	\$ 54,567,468	\$ 33,930,348	\$ 20,637,120
Octubre	\$ 54,164,165	\$ 29,385,348	\$ 24,778,817
Noviembre	\$ 57,379,272	\$ 32,476,615	\$ 24,902,657
Diciembre	\$ 57,049,517	\$ 30,537,005	\$ 26,512,512

*Los costos por kilogramo de los insumos, de energías, y totales fueron proporcionados por la planta El Dorado, determinados con los datos históricos del proceso. Estos costos se encuentran en pesos colombianos (COP).

**ANEXO F.
COTIZACIÓN DE BOMBA DOSIFICADORA**

Correo electrónico de *JCP Supplies*:

De: comercial3@jcpsupplies.com <comercial3@jcpsupplies.com>
Enviado: miércoles, 30 de mayo de 2018 02:42:41 p. m.
Para: 'manuel antonio ortiz enciso'
CC: 'Juan Carlos Porras'
Asunto: RE: Cotizacion dosificadores

Buenas tardes Manuel.

Dado lo que me comentas, es una bomba que me toca hacer por pedido a Alemania, que puede demorar aproximadamente 45 días en llegar, asimismo te comento que dadas las especificaciones que me diste he seleccionado una bomba a que cumple los requisitos de caudal de 40 lph y es resistente al Policloruro de Aluminio con resistencias a viscosidades de 40 cps. Adjunto envié el manual y la hoja técnica de la bomba (sugiero mirar la ficha técnica).

El precio unitario de la Bomba es de \$7'527.000 COP con IVA incluido aproximado, en este precio calcule el kit de mantenimiento, las válvulas de inyección y de descarga, el display digital, y adicionalmente un sensor de strokes.

Quedo atento a cualquier duda o inquietud al respecto.

Atentamente,

www.jcpsupplies.com
Julián D Gómez
Ingeniero Comercial
División de Dosificación de Químicos
Carrera 46 No. 143 – 70 Ofic. 201
Bogotá, Colombia
Tel: 6159464 Ext: 106/Cel: 314-4118339