



Ensayos de tratabilidad del agua, una herramienta concluyente para el diseño de plantas de potabilización

Estudio de caso Acueducto Regional de Occidente, Anserma (Caldas)

Nubia Janneth Galvis González

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias Contables Económicas y Administrativas
Maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente
Manizales, Colombia
2014

Ensayos de tratabilidad del agua, una herramienta concluyente para el diseño de plantas de potabilización

Estudio de caso Acueducto Regional de Occidente, Anserma (Caldas)

Nubia Janneth Galvis González

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente

Director:
Ph.D. Juan Carlos Montoya Salazar

Línea de Investigación:
Biosistemas Integrados

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias Contables Económicas y Administrativas
Maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente
Manizales, Colombia
2014

Agradecimientos

Especial agradecimiento a la Empresa de Obras Sanitarias de Caldas Empocaldas S.A. E.S.P., pues todos los recursos fueron dispuestos para llevar a cabo esta investigación, y en especial al jefe del Departamento de Planeación y Proyectos, Ingeniero Civil Sergio Humberto Lopera Proaños, por fomentar la investigación aplicada como praxis obligatoria y responsable para desarrollar proyectos de saneamiento básico que inciden en la calidad de vida de las comunidades del Departamento de Caldas.

Así mismo, es merecido el reconocimiento al Ingeniero Químico Iván Fernando Macías Quiroga, quién realizó los principales aportes conceptuales y metodológicos para el desarrollo y materialización de la presente investigación.

Por último reconozco en apoyo y el interés del Director de la investigación y del Ingeniero Químico especialista en Estadística, Diógenes de Jesús Ramírez, quienes me orientaron para realizar el informe final del estudio.

Resumen

Con el propósito de realizar un diseño confiable y eficaz de la nueva planta de tratamiento de agua potable del Acueducto Regional de Occidente para abastecer aproximadamente a 54.000 habitantes (Proyección al año 2023) de los municipios de Anserma, Risaralda, San José y Belalcázar, la Empresa de Obras Sanitarias de Caldas Empocaldas S.A. E.S.P., promovió la implementación de una metodología que complementara las técnicas documentadas para la determinación de las variables de diseño de sedimentadores.

Durante un periodo de tres meses comprendidos entre septiembre y diciembre de 2012 se realizaron 130 pruebas de tratabilidad del agua del Rio Oro en la planta de tratamiento del municipio de Anserma, Caldas, evaluando las condiciones óptimas de tratamiento como son pH, dosis de coagulante, tiempo y gradiente, necesarios para hallar la velocidad de sedimentación crítica. Los análisis arrojaron los siguientes resultados:

El amplio rango de gradientes y tiempos óptimos disponibles soportaron un adecuado diseño del floculador, de un lado se simplificó el análisis de alternativas para seleccionar el tipo de floculación, de tal forma que se optó por un floculador mecánico que dispone de un variador de velocidad para generar todo tipo de gradientes independientemente del caudal a tratar y adicionalmente se evitó el sobre dimensionamiento de la unidad, para asegurar que las partículas floculentas durante la mezcla lenta formen un floc más sedimentable y se disminuya la producción de lodos, lo que garantiza una mejor operación y menor cantidad de lavados.

Las pruebas de velocidad de sedimentación crítica, permitieron concluir que para cargas superficiales comprendidas en el rango 15 y 40 [$\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ d}$], tal y como lo sugiere el RAS 2000, se obtienen buenos porcentajes de remoción superiores al 85%. No obstante este rango debió ser ajustado a cargas entre 20 y 30 [$\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ d}$], para optimizar el área del sedimentador y disminuir costos constructivos, y en general propender por una buena sedimentación para mejorar las características del efluente de agua de ingreso a los

filtros y asegurar una carrera de filtración más prolongada, disminuyendo así el número de lavados y por lo tanto favoreciendo el ahorro de agua.

Palabras clave: Agua Potable, Calidad del agua, Pruebas de jarras, Sedimentación.

Abstract

In order to perform a reliable and effective design of the new treatment plant drinking water from the West Regional Aqueduct to supply approximately 54,000 inhabitants (Projection to 2023) in the municipalities of Anserma, Risaralda, San Jose and Belalcázar, the Sanitation Works Company de Caldas Empocaldas S.A. ESP, promoted the implementation of a methodology to complement documented techniques for the determination of design variables settlers.

During a period of three months between September and December 2012 130 water treatability tests were performed Oro River treatment plant in the municipality of Caldas Anserma evaluating optimal treatment conditions such as pH, coagulant dosage, time and gradient needed to find the critical settling velocity. The analysis yielded the following results:

The wide range of available gradients and optimal times endured proper design of flocculator, side analysis was simplified alternatives to select the type of flocculation, so we opted for a mechanical flocculator which has a variable speed generating all types of gradients regardless of flow to be treated and prevented additionally on sizing of the unit, to ensure that during the slow flocculent mixture particles form a settleable floc and sludge production is decreased, thereby ensuring a better operation and fewer loads

Evidence of critical sedimentation rate, allowed to conclude that surface charges included in the range 15 to 40 [$m^3/m^2 d$], as suggested by the RAS 2000, good removal rates higher than 85% are obtained. However this must be set to range between 20 and 30 loads [$m^3/m^2 d$], to optimize the area of the settler and reduce construction costs, and in

general a good sedimentation tending to improve the characteristics of the effluent water entering filters and ensure a career of more prolonged filtration, thus reducing their number, and thus promoting water conservation.

Keywords: Drinking Water, Water Quality, Testing jars, Sedimentation

Contenido

	Pág.
Agradecimientos	IV
Resumen	V
Lista de figuras.....	11
Lista de tablas	13
Lista de gráficos.....	14
Lista de Símbolos y abreviaturas.....	15
Introducción	17
Contexto del estudio	21
1.1 Formulación del problema	21
1.2 Justificación.....	23
1.3 Objetivos	25
1.3.1 Objetivo general	25
1.3.2 Objetivos específicos.....	25
1.4 Antecedentes investigativos	26
1.4.1 Antecedentes de campo.....	26
1.4.2 Antecedentes teóricos	27
Marco conceptual	31
2.1 Calidad del agua	31
2.2 Turbiedad.....	34
2.3 Distribución de partículas en el agua.....	35
2.4 Color	36
2.5 Sedimentación.....	37
2.5.1 Sedimentación según el tipo de partículas	39
2.5.2 Sedimentación de partículas floculentas.....	40
2.5.3 clasificación de partículas según su tamaño.....	41
2.5.4 Interferencias en el proceso de sedimentación.....	41
2.6 Diseño de unidades de sedimentación	43
2.6.1 Metodología propuesta por Pérez (2002)	44
2.6.2 Metodología propuesta por Arboleda (2008).....	46

2.7.1 Método desarrollado por Arboleda (2008)	48
Determinación de “Co”	48
2.7.2 Método propuesto	50
Metodología.....	53
3.2 Procedimiento de jarras para determinación de dosis, tiempo y gradiente óptimo. Basado en Casas (1992)	53
3.2.1 Determinación de la dosis óptima	53
3.2.2 Determinación del tiempo de floculación óptimo	54
3.2.3 Determinación de gradiente óptimo.....	57
3.2.4 Determinación de pH óptimo.....	59
3.3 Prueba de velocidad de sedimentación crítica	59
3.4 Cálculo Velocidad de sedimentación crítica (v_{sc}).....	59
3.4.1 Realización prueba de v_{sc}	59
3.4.2 Elaboración gráficas Velocidad de sedimentación V_s contra Concentración remanente C y Concentración remanente C contra Velocidad de sedimentación V_s 60	
3.4.3 Cálculo del porcentaje de remoción total RT	61
3.5 Recolección de muestras.....	64
3.6 Procedimiento para calcular Velocidad de sedimentación crítica.	64
3.8 Recolección de datos.....	65
4. Resultados.....	67
4.1 Pruebas de tratabilidad	67
4.2 Análisis estadístico de la información para la determinación del gradiente y tiempo óptimos.	70
4.2.1 Tiempo óptimo de floculación Mes 1	71
4.2.2 Gradiente óptimo de floculación mes 1	73
4.2.3 Tiempo óptimo de floculación Mes 2	74
4.2.4 Gradiente óptimo de floculación Mes 2	75
4.2.5 Tiempo óptimo de floculación Mes 3	76
4.2.6 Gradiente óptimo de floculación Mes 3	77
4.3 Pruebas de pH óptimo	79
4.3.1 Pruebas de pH óptimo con H_2SO_4 1 N (0.5 mol/l) y NaOH 0.1 N (0.1 mol/l).....	79
4.3.2 Pruebas de pH óptimo con Cal.....	81
4.3.3 Observaciones de las pruebas de pH con Cal.....	85
4.3 Evaluación eficiencia del proceso	94
4.4 Pruebas de Velocidad de sedimentación crítica	98
5. Conclusiones y recomendaciones	101
CONCLUSIONES.....	102
RECOMENDACIONES.....	104
A. Anexo: Tablas de recolección de datos	106
B. Anexo: Pruebas de velocidad de sedimentación crítica (Archivo digital)	109
Bibliografía	111

Lista de figuras

Figura 2- 1 Tamaño de partículas en el agua (Adaptación de Black, 1963; Ríos, 1998; Pérez, 2002).....	36
Figura 2- 2 Índices de Willcomb para determinar el tamaño del flóculo (Arboleda, 2008).	41
Figura 2- 3 Corrientes térmicas debidas al agua fría (Maldonado, 2004).....	42
Figura 2- 4 Corrientes Térmicas debidas al agua caliente (Maldonado, 2004)	42
Figura 2- 5 Corrientes Térmicas debidas a la densidad (Maldonado, 2004)	42
Figura 2- 6 Velocidad de asentamiento versus turbiedad remanente (Pérez, 2002)	44
Figura 2- 7 Porcentaje de remoción de turbiedad versus velocidad de sedimentación (Pérez, 2002)	45
Figura 2- 8 V_s = Velocidad de asentamiento (Arboleda, 2008).....	47
Figura 2- 9 Cálculo porcentaje de remoción (Arboleda, 2008)	49
Figura 2- 10 Cálculo Co	50
Figura 2- 11 Calculo Área “a”	51
Figura 4- 1 Montaje Jar Test pH óptimo con Cal No. 1	84
Figura 4- 2 Montaje Jar Test pH óptimo con Cal No. 2	86
Figura 4- 3 Montaje Jar Test pH óptimo con Cal No. 3	86
Figura 4- 4 Montaje Jar Test pH óptimo con Cal No. 4	87
Figura 4- 5 Montaje Jar Test pH óptimo con Cal No. 5	87
Figura 4- 6 Montaje Jar Test pH óptimo con Cal No. 6	88
Figura 4- 7 Montaje Jar Test pH óptimo con Cal No. 7	88
Figura 4- 8 Montaje Jar Test pH óptimo con Cal No. 8	89
Figura 4- 9 Montaje Jar Test pH óptimo con Cal No. 9	89
Figura 4- 10 Montaje Jar Test pH óptimo con Cal No. 10	90
Figura 4- 11 Montaje Jar Test pH óptimo con Cal No. 11	90
Figura 4- 12 Montaje Jar Test pH óptimo con Cal No. 12	91
Figura 4- 13 Montaje Jar Test pH óptimo con Cal No. 13	91
Figura 4- 14 Montaje Jar Test pH óptimo con Cal No. 14	92
Figura 4- 15 Montaje Jar Test pH óptimo con Cal No. 15	92

Figura 4- 16 Gráfico control turbiedad mes 2	95
Figura 4- 17 Gráfico control Aluminio residual mes 2	96
Figura 4- 18 Gráfico control Color mes 2.....	96
Figura 4- 19 Gráfico control turbiedad mes 3	96
Figura 4- 20 Gráfico control Color mes 3.....	97
Figura 4- 21 Gráfico control Aluminio residual mes 3	97

Lista de tablas

Tabla 3-1 Dosis de coagulante	54
Tabla 3-2 Tipo floculador vs. Intervalos tiempo y gradiente óptimos (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000)	56
Tabla 3-3 Índice de Wilcomb	56
Tabla 3- 4 Prueba de Velocidad de sedimentación crítica v_{sc}	60
Tabla 3- 5 Carga superficial de acuerdo al tipo de sedimentador (Minproteccion, 2000)	62
Tabla 4- 1 Resultados Pruebas de tratabilidad	68
Tabla 4- 2 Distribución de frecuencia Tiempo óptimo de floculación mes 1	72
Tabla 4- 3 Distribución de frecuencia Gradiente óptimo mes 1	73
Tabla 4- 4 Distribución de frecuencia Tiempo óptimo de floculación mes 2	74
Tabla 4- 5 Distribución de frecuencia Gradiente óptimo mes 2	75
Tabla 4- 6 Distribución de frecuencia tiempo óptimo de floculación mes 3	76
Tabla 4- 7 Distribución de frecuencia Gradiente óptimo mes 3	77
Tabla 4- 8 Resultados pH óptimo con H_2SO_4 1 N y NaOH 0.1 N	79
Tabla 4- 9 Comparación resultados promedio frente a la Resolución 2115/2007	81
Tabla 4- 10 Especificaciones técnicas Cal	82
Tabla 4- 11 Pruebas pH óptimo con Cal	82
Tabla 4- 27 Compilación resultados observaciones de la prueba de pH óptimo con CAL93	82
Tabla 4- 28 Eficiencia color, turbiedad y pH	94
Tabla A- 1 Pruebas de tratabilidad	107
Tabla A- 2 pH óptimo	108

Lista de gráficos

Gráfico 4- 1 Histograma de frecuencia Tiempo óptimo de floculación mes 1	72
Gráfico 4- 2 Histograma de frecuencia gradiente óptimo mes 1	73
Gráfico 4- 3 Histograma de frecuencia Tiempo óptimo de floculación mes 2	74
Gráfico 4- 4 Histograma de frecuencia gradiente óptimo mes 2	75
Gráfico 4- 5 Histograma de frecuencia T óptimo mes 3.....	76
Gráfico 4- 6 Histograma de frecuencia gradiente óptimo mes 3	77

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
A	Área	m^2	
C	Fracción remanente de turbiedad		N_t/N_0
N	Turbiedad		
N_0	Turbiedad inicial del Agua Cruda		
Q	Caudal	$m^3/día$	
R_T	Eficiencia remocional		Ecuación 3
t	Tiempo	s	DF
V	Volumen	m^3	
V_{sc}	Velocidad de sedimentación crítica	$m^3/m^2 día$	Ecuación 5
V_s	Velocidad de asentamiento	cm/s	

Subíndices

Subíndice	Término
t	Tiempo n
o	Condición inicial

Superíndices

Superíndice Término

N	Exponente, potencia
---	---------------------

Abreviaturas

Abreviatura Término

<i>PTAP</i>	Planta de tratamiento de agua potable
-------------	---------------------------------------

<i>pH</i>	Potencial de hidrógeno
-----------	------------------------

Nomenclatura estadística

LI: Limite inferior

LS: Limite Superior

x: Marca de Clase

f: Frecuencia Absoluta

fr: Frecuencia Relativa

fa: Frecuencia Absoluta Acumulada

far: Frecuencia Relativa Acumulada.

Introducción

“Un agua potable segura y un saneamiento adecuado son cruciales para la reducción de la pobreza, para un desarrollo sostenible y para lograr todos y cada uno de los Objetivos de Desarrollo del Milenio”.¹

Indiscutiblemente la calidad del agua es un indicador de calidad de vida, pues influye directamente sobre la salud, la diversidad biológica, la realización de actividades económicas, la disponibilidad del alimento, en fin influye sobre el desarrollo del ser humano.

Desde julio del año 2010, la Asamblea General de las Naciones Unidas mediante la Resolución 64/292, reconoció claramente el derecho humano al agua y al saneamiento, reafirmando que un agua potable y el saneamiento son esenciales para la realización de todos los derechos humanos.

En Colombia el gobierno nacional, ha buscado dar cumplimiento a la meta del Objetivo de Desarrollo del Milenio 7 que insta a **“reducir a la mitad para 2015, la proporción de personas sin acceso sostenible al agua potable y a servicios básicos de saneamiento”**, a través de los Planes Departamentales de Agua PDA y del Sistema General de Regalías SGR principalmente, pues mediante los recursos dispuestos se

¹ BAN ki-moon. Secretario General de las Naciones Unidas. El derecho humano al agua y al saneamiento. Nota para los medios. s.f. Programa de ONU-Agua para la Promoción y la Comunicación en el marco del Decenio (UNW-DPAC). <http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/>

busca acelerar el crecimiento de las coberturas y mejorar la calidad de los servicios de acueducto y alcantarillado.

A través del SGR, se financia el diseño y la construcción del nuevo Acueducto Regional de Occidente, el cual abastecerá los municipios de Anserma, Belalcázar, San José y Risaralda.

El diseño de sistemas de acueducto está orientado por el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico Ras – 2000 (2000), tal como lo indica el Capítulo C.2... *“para la selección de los procesos de tratamiento previos o paralelos al diseño de una planta, deben realizarse ensayos en el laboratorio siendo obligatorio entre estos, el Ensayo de Jarras; y posteriormente, si se justifica, realizar ensayos en planta piloto para determinar el tratamiento al que debe ser sometida el agua. Para los niveles bajo y medio de complejidad no se recomienda la realización de los ensayos de planta piloto, a menos que se estudie un nuevo proceso o variables desconocidas que no pueden ser analizadas en el laboratorio. La prueba de jarras es obligatoria para cualquier nivel de complejidad, no solamente para los estudios de tratabilidad en el proceso de diseño, sino también diariamente, durante la operación de la planta, y cada vez que se presenten cambios en la calidad del agua”* (Ministerio Desarrollo, 2002).

Siguiendo esta directriz, y bajo los antecedentes de diseños no tan exitosos realizados solamente bajo un enfoque teórico, Empocaldas promovió la realización de una investigación para determinar las condiciones óptimas de tratabilidad del Río Oro necesarias para el diseño de las unidades de tratamiento del Acueducto Regional de Occidente, incluido el sedimentador, y validar la velocidad de sedimentación crítica experimental frente a la teórica. Todo este desarrollo se aprovecha para implementar una guía metodológica para determinar la velocidad de sedimentación crítica para el diseño de un sedimentador de agua potable.

Las pruebas de tratabilidad presentan algunas limitantes, como el tiempo que se invierte en cada prueba. Una sesión de prueba de jarras que incluya la determinación de óptimos

de pH, tiempo, gradiente, dosis de coagulante, dosis de alcalinizante u otro aditivo y velocidad de sedimentación crítica, puede tardar 8 horas.

De otro lado, el RAS también recomienda hacer estudios de tratabilidad durante un periodo de un año, de tal forma que se cubran diferentes estadios climáticos, lo cual resulta insostenible económicamente en el contexto de una empresa de servicios públicos, por lo cual el presente estudio se desarrolló en un periodo de tres meses; así mismo la idealidad de las pruebas de tratabilidad conllevan errores en cuanto al volumen de agua tratada, la dosificación de coagulantes, la agitación. No obstante lo mencionado, la prueba de jarras sigue siendo el método más usado para determinar y evaluar los procesos de coagulación y de floculación.

La importancia de la presente investigación tiene dos orientaciones, una práctica y otra metodológica.

En primer lugar, el aporte práctico, se trata de realizar el diseño de una unidad de sedimentación para el Acueducto Regional de Occidente de Caldas según las recomendaciones técnicas, de tal forma que se optimicen los recursos del proyecto para garantizar la eficiencia del proceso de potabilización y por consiguiente suministrar un agua tratada de excelente calidad.

La otra orientación, la metodológica, busca plantear una guía que amplíe los procedimientos establecidos y documentados tanto en el trabajo de laboratorio para realizar las pruebas de tratabilidad como en el manejo y gestión matemática de la información para determinar la velocidad de sedimentación crítica, necesaria para el diseño de sedimentadores.

Contexto del estudio

1.1 Formulación del problema

Las metodologías documentadas para determinar los parámetros de diseño de sedimentadores de planta de agua potable indican un procedimiento general que requiere mayor profundidad y detalle para garantizar un adecuado análisis de información y por consiguiente lograr diseños de mayor confiabilidad.

El agua potable es una necesidad básica para garantizar la salud y el bienestar de las poblaciones. La prestación de este servicio público en el Departamento de Caldas lo realiza la Empresa de Obras Sanitarias de Caldas Empocaldas S.A E.S.P.

La Ley 142 de 1994 por la cual se establece el Régimen de los Servicios Públicos Domiciliarios y se dictan otras disposiciones, establece que el funcionamiento y operación de los sistemas de tratamiento deben ser financiados vía tarifa, es decir, que los usuarios a través de la tarifa o factura, asumen todos los gastos de la Empresa.

En este último aspecto, se fundamenta el problema de la presente investigación. En la historia de Empocaldas, ha sido frecuente el rediseño, el mejoramiento, y/o la optimización de unidades, que en algunos de los casos obedecen a la búsqueda de correcciones de los diseños iniciales, es decir estos nuevos costos adicionales son trasladados a la tarifa, generando un impacto negativo sobre la población.

Buscar la eficiencia de los procesos es deber de todo profesional y es obligación de las entidades del Estado, por lo cual el Departamento de Planeación y Proyectos de Empocaldas, ha promovido las pruebas de tratabilidad, como una herramienta básica y

critica para definir el diseño de unidades de una planta de agua potable y para brindar información que permita una adecuada operación del sistema de tratamiento.

Empocaldas proyecta la construcción de la planta del Acueducto Regional de Occidente con capacidad de 120 l/s abastecida por el Río Oro para prestar el servicio de agua potable a los municipios de Anserma, Risaralda, San José y Belalcázar, para atender una población de 54.000 habitantes (proyección al año 2023).

En las plantas de potabilización de Empocaldas es común que se presenten dificultades en el tratamiento asociadas o no a las características de la fuente y que pueden incidir en la calidad del agua o en la continuidad de la prestación del servicio.

Tales dificultades en el tratamiento obedecen a dos principales causas: una relacionada con la incorrecta operación del sistema que incluye la dosificación de insumos químicos, medición de caudales de operación, elección del coagulante, debilidades técnico operativas del personal, etc.; y la otra que corresponde a problemas de tipo técnico estructural derivados de un inadecuado diseño de las unidades de tratamiento.

Frente a la primera causa, es necesario verificar la efectividad del coagulante policloruro de aluminio PAC y del mejoramiento de su desempeño con la adición de Cal, pues actualmente en las plantas de Anserma y Risaralda que también se abastecen del Río Oro, se han presentado incumplimientos en la calidad del agua debido al pH y al aluminio residual, ambos parámetros asociados al uso del coagulante; de otro lado resulta arbitrario el excesivo consumo de Cal en Risaralda comparado con el poco uso de este insumo en la planta de Anserma.

Respecto a la segunda causa, surge la necesidad de evaluar y/u optimizar los sistemas ya implementados para obtener mejores eficiencias técnicas y económicas, y disponer de información acertada para el diseño de nuevos sistemas.

Empocaldas busca construir la nueva planta de tratamiento para el occidente caldense, partiendo de un estudio profundo aplicado a la fuente Rio Oro que soporte los diseños y de esta forma minimizar los problemas técnicos en el tratamiento del agua y por consiguiente asegurar un producto de excelente calidad.

1.2 Justificación

La investigación planteada tiene dos dimensiones bien definidas, una dimensión práctica y una dimensión metodológica.

La dimensión práctica, se enfoca en la importancia de la sedimentación del agua en un proceso de potabilización y por consiguiente de la calidad del agua para consumo humano.

La responsabilidad de una empresa prestadora de servicios públicos como Empocaldas abarca diversos tópicos: sociales, económicos, técnicos, jurídicos y éticos, y la calidad del agua es un indicador que se relaciona con todos ellos y que sin duda alguna representa un mayor impacto sobre la población.

Con relación al impacto de la calidad del agua potable sobre la población, cabe señalar lo indicado en la agenda 21 de las Naciones Unidas: "...El suministro de agua potable y el saneamiento ambiental son vitales para la protección del medio ambiente, el mejoramiento de la salud y la mitigación de la pobreza. El agua potable también es fundamental para muchas actividades tradicionales y culturales. Se estima que el 80% de todas las enfermedades y más de un tercio de los fallecimientos en los países en desarrollo se deben al consumo de agua contaminada y que, en promedio, hasta la décima parte del tiempo productivo de cada persona se pierde a causa de enfermedades relacionadas con el agua..." (ONU, 1992).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) establece las directrices para la calidad del agua potable y es el punto de referencia para las legislaciones nacionales. En Colombia la

Resolución 2115 de 2007 establece características, instrumentos básicos y frecuencias para la vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.

El Rio Oro, es una fuente superficial que cumple con los requisitos de calidad, de acuerdo al uso exigidos por la autoridad sanitaria y definidos en el Decreto 3930 de 2010. Los análisis de laboratorio demuestran la ausencia o no detectable presencia de los elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos, que tienen implicaciones sobre la salud humana (Min Protección, 2007); no obstante, lo anterior, existen otros parámetros o características físicas y químicas que deben ser removidas del agua cruda y que son materia de control periódico.

El color y la turbiedad son características físicas que tienen gran ponderación en la calificación del Índice de Riesgo de Calidad del Agua IRCA dada su significación para la salud y otros aspectos como estéticos, sabor y demanda de cloro, por lo cual su remoción se constituye en uno de los principales objetivos de una planta de tratamiento.

Si se parte de la consideración que los procesos de coagulación y floculación corresponden a un acondicionamiento previo del agua, la sedimentación es el principal proceso encargado de la remoción de estos parámetros en las plantas de tratamiento convencionales; por lo cual el nuevo Acueducto Regional de Occidente, debe construirse bajo el soporte sólido de un trabajo investigativo que determine los parámetros de diseño de los floculadores y sedimentadores.

La calidad del agua suministrada a la población es vigilada por la Dirección Territorial de Salud de Caldas que toma 15 muestras mensuales en el municipio de Anserma y reporta a la Superintendencia de Servicios Públicos los resultados obtenidos.

En la medida que el proceso de tratamiento de potabilización sea eficiente, se garantiza la calidad del agua prestada y se minimiza el riesgo de contaminaciones que pudieran afectar la salud de los usuarios y de sanciones o multas por incumplimientos de la misma.

El otro enfoque o dimensión de la presente investigación, es metodológico, pues se trata de plantear una guía práctica que amplíe los procedimientos establecidos y disponibles tanto en el trabajo de laboratorio para realizar las pruebas de tratabilidad como en el manejo y gestión matemática de la información para determinar la velocidad de sedimentación crítica.

La correcta elección de los parámetros de diseño de un sedimentador – y de cualquier unidad de una planta de tratamiento - tiene implicaciones tanto económicas como técnicas, éstas últimas reflejadas en la eficiencia del proceso y que su corrección u optimización se convierten en un factor económico. Cabe resaltar que todos los costos y gastos en una empresa de servicios públicos se trasladan a los usuarios mediante el cobro de la tarifa.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Realizar una guía metodológica para determinar la velocidad de sedimentación crítica para el diseño de un sedimentador de agua potable.

1.3.2 Objetivos específicos

- Estimar las condiciones óptimas de tratabilidad del Rio Oro (dosis, tiempo, pH y gradiente óptimo) para la planta de potabilización del acueducto regional de Occidente.

- Determinar los parámetros de diseño de la unidad de sedimentación del Acueducto Regional de Occidente.

- Verificar la incidencia del coagulante policloruro de aluminio PAC en el aluminio residual y pH del agua tratada.
- Verificar la incidencia de la Cal en el tratamiento del agua del Rio Oro usando el PAC como coagulante.

1.4 Antecedentes investigativos

1.4.1 Antecedentes de campo

Existe un antecedente básico que ha definido la realización de la presente investigación y se relaciona con un estudio de campo realizado en el año 2012 por Macías (2012) para el Acueducto de Manizales con el propósito de validar los parámetros de diseño de un sedimentador a construir.

Para verificar los parámetros de diseño del sedimentador, fue necesario realizar una prueba de sedimentación crítica para cada una de las fuentes de abastecimiento de la planta de agua potable - cabe resaltar que una prueba por fuente no se ajusta a las recomendaciones del RAS-2000, pero si representa una base para la verificación de la velocidad de sedimentación crítica. El resultado de esta validación arrojó diferencias significativas que permitieron ajustar el diseño del sedimentador y optimizar los recursos económicos a invertir.

Resultó concluyente que para la realización de esta validación se afrontaron dificultades relacionadas con los vacíos o falta de información técnica para desarrollar la práctica de laboratorio y en especial para el posterior análisis de información, por lo cual fue necesario ajustar una metodología propia mediante complementación de métodos y búsqueda de alternativas para el análisis de información.

De otro lado, la revisión de los antecedentes investigativos y de la literatura técnica aplicada o referente a la determinación práctica de parámetros de diseño de un

sedimentador indica que este campo ha sido abordado por pocos autores y/o investigadores o por lo menos no ha sido documentado de manera formal.

Los referentes académicos en América Latina son Pérez (2002), Arboleda (2008) y Casas (1992).

1.4.2 Antecedentes teóricos

En el trabajo realizado por López et ál. (2006), se ejecutaron pruebas de tratabilidad para encontrar relaciones entre la calidad del agua cruda y la dosis óptima de coagulante y la turbiedad del agua sedimentada, mediante la aplicación de distintos gradientes y tiempos de floculación. Entre los resultados y conclusiones de la investigación se resaltan dos que representan un importante antecedente para soportar la metodología de la investigación propuesta: a.) Determinar una dosis óptima mediante una única prueba de jarras conlleva un error del orden de hasta 20 mg/L, de tal forma que de 10 pruebas de tratabilidad entre 6 y 8 dan resultados confiables. b.) Luego de aplicar la dosis óptima de coagulante los parámetros que determinan la calidad del agua sedimentada son el gradiente y el tiempo de floculación, es decir que las características del agua cruda pierden relevancia para el tratamiento.

También se estudió la relación entre la turbiedad del agua sedimentada y la calidad del agua bruta mediante análisis multivariado que relacionaron tiempo y gradientes óptimos con alcalinidad, turbiedad del agua cruda y sedimentada concluyendo que el resultado del proceso de floculación depende fuertemente del tiempo y gradiente de velocidad aplicados, y en menor medida de la calidad del agua bruta. En consecuencia las características del agua cruda intervienen en menor medida en el proceso de floculación, siendo que el parámetro dosis óptima enmascara los parámetros de turbiedad y alcalinidad.

La investigación realizada por Granados (2007), busca mejorar la calidad del agua, en cuanto al parámetro color mediante el uso simultáneo de dos insumos químicos: carbón activado y sulfato de aluminio líquido, y reducir costos de operación. Este trabajo no da detalles de la metodología en las pruebas de jarras y se enfoca básicamente en el análisis

de información mediante curvas de control, pero si argumenta la importancia de la prueba de jarras como herramienta básica para el diseño y control de sistemas de potabilización.

Wisniewski y NEWAH² (2011) en su investigación sobre el diseño de sedimentadores, adapta el diseño de estos tanques para sistemas con una capacidad de tratamiento inferior a 4 l/s de agua, como se presenta en algunas regiones de Nepal. Esta nación, a pesar de encontrarse entre las 10 primeras potencias del mundo en cuanto al recurso hídrico, presentaba muchas dificultades de carácter financiero y de espacio para el tratamiento de agua.

El estudio tuvo como objetivo diseñar un sedimentador de alta tasa para el tratamiento de agua con alta turbiedad que cumpliera con seis condiciones:

1. Tener el potencial para producir agua de igual o mayor calidad que la actualmente producida por la tecnología existente.
2. De bajo costo con respecto a la construcción y operación.
3. Fácil implementación para terrenos inclinados.
4. Suficientemente estable como para soportar condiciones climáticas extremas, debido a las lluvias y deslizamientos de tierra.
5. Debe ser lo suficientemente pequeño para adaptarse al sistema de abastecimiento de agua de Nepal, de tal forma que el nuevo diseño requirió 10 m² mientras que la unidad presente requería 42 m² para manejar el mismo caudal.
6. Requerir mínimamente maquinaria para la construcción y cero electricidad para su funcionamiento.

En conclusión dicho trabajo muestra la necesidad de desarrollar investigaciones aplicadas acordes a las tecnologías y recursos disponibles, con el único fin de conseguir el suministro de agua segura para el consumo humano.

² NEWAH. Nepal Water for Health, es una organización no gubernamental que implementa iniciativas en todo Nepal para ayudar a promover la higiene y el saneamiento

Ríos (1998) establece una discusión frente a la medición de la eficiencia de los sedimentadores, dado que en una planta de tratamiento de agua potable convencional, el proceso de sedimentación es en general el principal responsable en remoción de partículas causantes de turbiedad y color.

El trabajo determinó un criterio para evaluar el funcionamiento de un sedimentador, en forma independiente de las características físico-químicas del agua cruda.

Una manera habitual de medir la eficiencia de un sedimentador consiste en determinar su capacidad de eliminar turbiedad, comparando los resultados residuales frente a los valores iniciales del agua cruda. Este criterio de eficiencia entendido como porcentaje de remoción de turbiedad, es posible que implique conclusiones erróneas con relación al desempeño del mismo, pues para valores altos de turbiedad del agua cruda la eficiencia o remoción será mayor, lo cual no indica que el sedimentador esté funcionando mejor.

La información disponible del estudio es limitada y no detalla el concepto de eficiencia aplicado.

Valentín (2007) muestra como las técnicas de Redes Neuronales Artificiales (Artificial Neural Network, ANN) son aplicadas para el control de la dosificación de coagulante, considerando que la dosis óptima de coagulante está correlacionada de forma no lineal con los parámetros del agua de la fuente, tales como turbidez, conductividad, pH, temperatura, etc. En la planta de tratamiento de agua potable de Viry-Chatillon, Francia, se implementó un sistema robusto que prevé medidas erróneas del sensor o características inusuales del agua, para demostrar la eficiencia y solidez de este enfoque.

Álvarez (s,f) desarrolla una investigación para tratar de explicar las relaciones de naturaleza físico-química existentes entre las diferentes variables que intervienen e interactúan en el proceso de potabilización de aguas superficiales, en la planta de Lardero, que suministra el agua potable para las poblaciones de Logroño, Lardero y Villamediana de Iregua (España). Los parámetros analizados fueron turbiedad, temperatura, conductividad, oxígeno, pH, cloro, coagulante-floculante, y carbón activo; las

variables de proceso fueron caudal, volumen de agua decantada, filtros lavados, balances de volúmenes de agua; y variables de tipo climatológico como radiación solar, pluviometría, temperatura ambiente, velocidad y dirección del viento. A su vez, todas estas variables fueron evaluadas en diferentes puntos de la planta: entrada, decantación, filtración y salida. El periodo de obtención de la información de 24 horas días durante 5 años.

El autor, expone las dificultades para el análisis multivariante debido a que existen programas comerciales diseñados de manera específica y que no permiten variaciones, por lo cual se hace necesario el desarrollo de programas libres que se adecuen a cada caso particular de estudio. También hace relación a los entornos de S y S-Plus durante mucho tiempo han representado la mejor posibilidad para el análisis, visualización y representación gráfica de datos; y del “entorno R” que es un software libre para la estadística computacional y que, además, presenta las ventajas de ser multiplataforma y escalable.

Otros trabajos realizados bajo una metodología diferente al método de Prueba de Jarras, como es el método de columnas de sedimentación, aportan a la contextualización del problema, como lo muestran Vega y Vilacreses (2006), en su trabajo sobre el fenómeno de sedimentación en el tratamiento de aguas. Los autores hacen referencia a la ausencia de estudios detallados sobre la sedimentación, y la necesidad de realizar pruebas de sedimentación como actividad previa al diseño de plantas de tratamiento y su incidencia en los costos del tratamiento. Así mismo su realización se justifica en la necesidad de establecer una metodología de trabajo de ensayos de laboratorio para determinar la dosis de floculante para una óptima sedimentación, esto dentro del marco de la carrera de ingeniería civil de la Escuela Politécnica del Litoral de Guayaquil Ecuador.

Marco conceptual

2.1 Calidad del agua

... *“El agua es el constituyente más importante del organismo humano y del mundo en el que vivimos”* (World Water Day, 2011).

La calidad del agua incide en diferentes aspectos de los ecosistemas y del ser humano, como la salud, la diversidad biológica, la disponibilidad del alimento, el desarrollo de actividades económicas. Es por esto que la calidad del agua es un indicador de calidad de vida pues influye sobre la riqueza, la pobreza y los niveles de educación (Torres, 2009).

En Colombia la calidad del agua está reglamentada mediante el Decreto 1575 de 2007 y su Resolución complementaria 2115 de 2007 (Min Protección, 2007), por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo.

La calidad del agua está determinada por gran cantidad de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos que cobran relevancia de acuerdo al origen del agua captada y de factores socioeconómicos asociados a la cuenca (De Vargas, 2004).

El riesgo para la salud humana asociado a los compuestos químicos del agua se debe fundamentalmente a la capacidad de las sustancias para generar efectos adversos sobre la salud tras periodos prolongados de exposición, excepto que se trate de una exposición única debida a una contaminación masiva accidental (OMS, 2005).

La contaminación de tipo microbiológico produce efectos agudos de gran impacto a la población, pues el aumento repentino de patógenos como bacterias, virus, protozoos y helmintos pueden desencadenar brotes de enfermedades transmitidas por el agua (OMS, 2005).

La Resolución 2115 de 2007 ha clasificado los parámetros físicos, químicos y microbiológicos de acuerdo al tipo de impacto sobre la salud humana como se muestra en las tablas 2-1, 2-2, 2-3 y 2.4.

Tabla 2- 1 Características Físicas

Características físicas	Expresadas como	Valor máximo aceptable
Color aparente	Unidades de Platino Cobalto (UPC)	15
Olor y Sabor	Aceptable ó no aceptable	Aceptable
Turbiedad	Unidades Nefelométricas de turbiedad (UNT)	2

Tabla 2- 2 Características Químicas que tienen reconocido efecto adverso en la salud humana

Elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos diferentes a los plaguicidas y otras sustancias	Expresados como	Valor máximo aceptable (mg/L)
Antimonio	Sb	0,02
Arsénico	As	0,01
Bario	Ba	0,7
Cadmio	Cd	0,003
Cianuro libre y disociable	CN ⁻	0,05
Cobre	Cu	1,0
Cromo total	Cr	0,05
Mercurio	Hg	0,001
Níquel	Ni	0,02
Plomo	Pb	0,01
Selenio	Se	0,01
Trihalometanos Totales	THMs	0,2
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)	HAP	0,01

Tabla 2- 3 Características Químicas que tienen implicaciones sobre la salud humana

Elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos que tienen implicaciones sobre la salud humana	Expresados como	Valor máximo aceptable (mg/L)
Carbono Orgánico Total	COT	5,0
Nitritos	NO ₂ ⁻	0,1
Nitratos	NO ₃ ⁻	10
Fluoruros	F ⁻	1,0

Tabla 2- 4 Características Químicas que tienen mayores consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana

Elementos y compuestos químicos que tienen implicaciones de tipo económico	Expresadas como	Valor máximo aceptable (mg/L)
Calcio	Ca	60
Alcalinidad Total	CaCO ₃	200
Cloruros	Cl ⁻	250
Aluminio	Al ³⁺	0,2
Dureza Total	CaCO ₃	300
Hierro Total	Fe	0,3
Magnesio	Mg	36
Manganeso	Mn	0,1
Molibdeno	Mo	0,07
Sulfatos	SO ₄ ²⁻	250
Zinc	Zn	3
Fosfatos	PO ₄ ³⁻	0,5

La principal oferta hídrica en el Departamento de Caldas, con destino al abastecimiento de los sistemas de potabilización, proviene de las fuentes superficiales que están contaminadas básicamente por el arrastre de material particulado y disuelto, y materia orgánica natural, y en menor grado por sustancias de origen antrópico (vertimientos de aguas domésticas), lo anterior según caracterizaciones anuales de agua realizadas por la Universidad Tecnológica de Pereira desde el año 2007 para Empocaldas.

Los registros históricos de calidad del agua cruda del Rio Oro y de calidad de agua tratada suministrada a la población de Anserma muestran que los parámetros de mayor relevancia para la calificación de la calidad del agua IRCA son la turbiedad y el color, los cuales hacen parte de las características físicas del agua.

2.2 Turbiedad

La turbiedad en el agua se asocia a la presencia de partículas en suspensión o coloidales.

Las partículas en suspensión se conforman básicamente de arcilla, minerales, sedimentos, materia orgánica e inorgánica finamente dividida, plancton, bacterias y otros microorganismos. Las arcillas forman en mayor parte la turbiedad del agua, que constituyen un material natural, terroso, de gránulos muy finos, compuestos de sílice, aluminio y agua, frecuentemente con cantidades apreciables de hierro, álcalis y tierra alcalina (Barrenechea, 2004).

La turbiedad es un parámetro físico crítico para definir la calidad de agua, tanto para aguas crudas de abastecimiento, como para las aguas tratadas. Su medición es rápida, económica y de fácil interpretación para los operadores de planta (Montoya, 2011) y se realiza mediante un turbidímetro o nefelómetro.

El valor de aceptación de la turbiedad es diferente a nivel mundial como se muestra en la tabla 2-5.

Tabla 2- 5 Valores aceptables de turbiedad (Barrenechea, 2004)

ENTIDAD	PAIS	CRITERIO ACEPTACION TURBIEDAD	
USEPA (1998)	US	≤2 UNT	Agua clarificada
AWWA (2001)	Canadá, Estados Unidos, México y Puerto Rico.	1 UNT objetivo 5 UNT máximo	Agua clarificada

Ministerio de la Protección Social y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007	Colombia	2 UNT	Agua tratada
Unión Europea (1998)	Unión Europea	1 UNT	Agua tratada
OMS		1 UNT	Agua filtrada Antes de desinfección

La Organización Mundial de la Salud no fija un valor de aceptación para turbiedad basado en criterios de salud, pero si sugiere que la mediana de la turbiedad del agua tratada sea idealmente menor de 0,1 UNT para una desinfección efectiva (Word Water Day, 2011); de igual forma lo señala Castro de Esparza (1987) que la presencia de turbiedad disminuye la eficiencia del proceso de desinfección y se convierte en un mecanismo físico de protección de los microorganismos frente al contacto con el desinfectante.

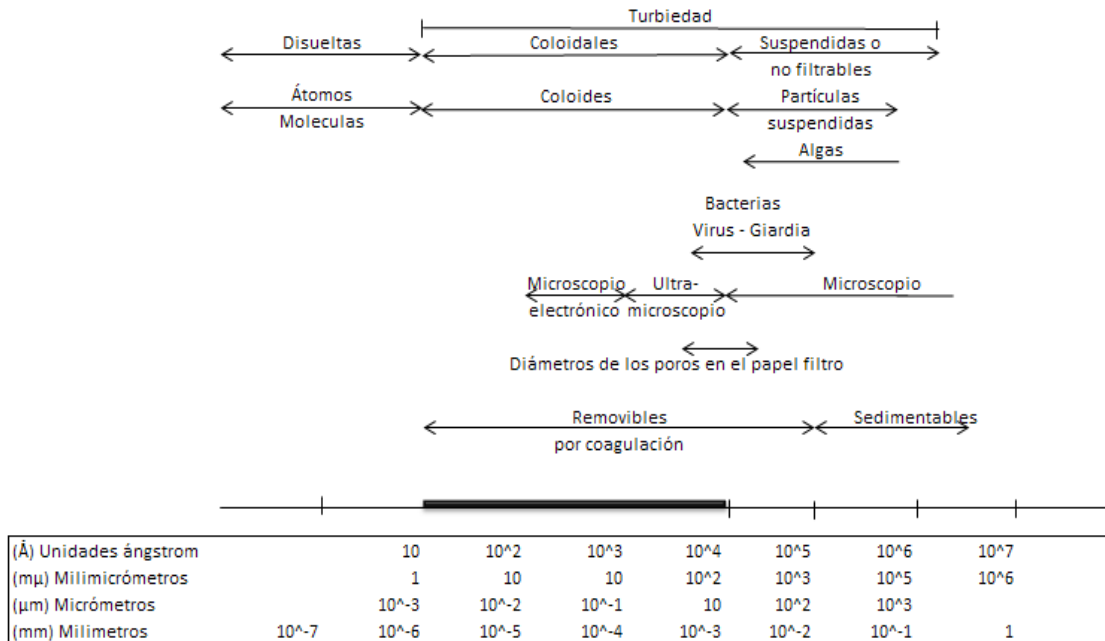
2.3 Distribución de partículas en el agua

De acuerdo al tipo de asociación con el agua, los sólidos pueden encontrarse suspendidos o disueltos.

Según la figura 2-1, las partículas en el agua pueden estar:

- Disueltas (tamaño menor a 1 milimicrómetro). Físicamente estas partículas no influyen en la turbiedad, pero sí podrían definir su color u olor.
- Formando sistemas coloidales (tamaño entre 1 y 1.000 milimicrómetros), que son las causantes de la turbiedad neta del agua.
- En forma de partículas suspendidas (tamaño por encima de 1.000 milimicrómetros). Estas partículas sedimentan fácilmente con el agua en reposo.

Figura 2- 1 Tamaño de partículas en el agua (Adaptación de Black, 1963; Ríos, 1998; Pérez, 2002)



2.4 Color

El color en el agua generalmente se debe a la presencia de materia orgánica coloreada. La mayoría de los investigadores estiman que el color orgánico en el agua es de naturaleza coloidal. Sin embargo, algunos autores sugieren que se encuentra en solución verdadera. Black y Christman (1963) demostraron que el tamaño de las partículas de color puede variar entre 3,5 y 10 mμ, lo que se acerca bastante al límite entre dispersión coloidal y solución verdadera. La discrepancia de los investigadores puede deberse a que el color es causado por coloides hidrofóbicos; es decir, por aquellos que tienen poca afinidad con el agua y causan turbiedad en la misma.

Las principales especies responsables del color orgánico natural en el agua, de acuerdo con la naturaleza del suelo, son los ácidos fúlvicos, himatomelánicos y húmicos, conocidos en su conjunto como sustancias húmicas. De igual forma estos autores analizaron varias

aguas y encontraron entre 15-50 mg/L de materia orgánica en ellas, de la cual un promedio de 87% era ácido fúlvico, 11% ácido himatomelánico y 2% ácido húmico.

Se considera que el color natural del agua, excepto el resultante de descargas industriales, puede originarse por las siguientes causas:

- La extracción acuosa de sustancias de origen vegetal;
- La descomposición de la materia;
- La materia orgánica del suelo;
- La presencia de hierro, manganeso y otros compuestos metálicos; y
- Una combinación de los procesos descritos (Barrenechea, 2004)

En la formación del color en el agua intervienen, entre otros factores, el pH, la temperatura, el tiempo de contacto, la materia disponible y la solubilidad de los compuestos coloreados.

El color se denomina como color aparente y como color verdadero. El color aparente es el que presenta el agua cruda o natural y color verdadero es el que queda luego de que el agua ha sido filtrada.

Para remover el color se pueden implementar diferentes métodos. Los principales son la coagulación por compuestos químicos como sales de aluminio y de hierro a pH bajos y las unidades de contacto o filtración ascendente (Barrenechea, 2004).

El valor aceptable de color en el agua de consumo humano es menor o igual a 15 UPC; aunque la OMS no propone el valor de referencia basado en efectos sobre la salud si alerta de su incidencia en la generación de subproductos en el proceso de desinfección, debido a la presencia de compuestos de naturaleza orgánica (OMS, 2006).

2.5 Sedimentación

El agua de las fuentes superficiales presenta partículas o sedimentos sólidos los cuales provienen en su mayoría de la erosión superficial y están compuestos por residuos

minerales derivados de las rocas y residuos orgánicos resultantes de los procesos de formación del suelo (incluidos los aspectos biológicos y microbiológicos, producción y descomposición), también puede presentarse un componente orgánico adicional aportado por la actividad biológica dentro del cuerpo de agua.

Para el análisis del agua los sedimentos se pueden clasificar como depositados o suspendidos.

Un sedimento depositado es el que se encuentra en el lecho de un río o un lago, y un sedimento suspendido es el que se encuentra transportado en el cuerpo de agua.

Las partículas suspendidas son de gran relevancia dentro del proceso de potabilización, pues aportan características fisicoquímicas que dan cuenta de la calidad del agua y que requieren ser removidas.

Dentro de las operaciones unitarias de un proceso convencional de tratamiento de agua potable, la sedimentación es el principal responsable de la remoción de las partículas causantes de turbiedad y color (Ríos, 1998).

La sedimentación es un proceso físico que consiste en la remoción de sólidos suspendidos en un fluido por acción de la gravedad. Los sólidos presentes en el agua, en una planta de tratamiento, pueden tener dos orígenes: de forma natural por sustancias presentes en el agua como arcilla, limo o arena, y de forma modificada resultante del proceso de coagulación – floculación (Pérez, 2002).

El resultado del proceso de sedimentación es un agua clarificada que continúa su tratamiento en los filtros y una suspensión concentrada de lodos como producto residual.

Las partículas en suspensión sedimentan de diferente manera de acuerdo a su forma y a su concentración, de tal forma que la sedimentación se puede clasificar según se trate de sedimentación de partículas discretas, de partículas floculentas y de partículas por caída libre e interferida

2.5.1 Sedimentación según el tipo de partículas

- Sedimentación de partículas discretas.

Las partículas discretas son aquellas que no cambian de características (forma, tamaño, densidad) durante la caída.

Se denomina sedimentación o sedimentación simple al proceso de depósito de partículas discretas. Este tipo de partículas y esta forma de sedimentación se presentan en los desarenadores, en los sedimentadores y en los pre sedimentadores como paso previo a la coagulación en las plantas de filtración rápida y también en sedimentadores como paso previo a la filtración lenta.

- Sedimentación de partículas floculentas.

Las partículas floculentas son aquellas producidas por la aglomeración de partículas coloides desestabilizadas a consecuencia de la aplicación de agentes químicos como coagulantes.

A diferencia de las partículas discretas, las características de este tipo de partículas sí cambian durante la caída.

Se denomina sedimentación floculenta al proceso de depósito de partículas floculentas. Este tipo de sedimentación se presenta en la clarificación de aguas, como proceso intermedio entre la coagulación-floculación y la filtración rápida.

- Sedimentación por caída libre e interferida

Cuando existe una baja concentración de partículas en el agua, éstas se depositan sin interferir. Se denomina a este fenómeno caída libre. En cambio, cuando hay altas concentraciones de partículas, se producen colisiones que las mantienen en una posición fija y ocurre un depósito masivo en lugar de individual, denominándose esta sedimentación depósito o caída interferida o sedimentación zonal.

Cuando las partículas ya en contacto forman una masa compacta que inhibe una mayor consolidación, se produce una compresión o zona de compresión. Este tipo de sedimentación se presenta en los concentradores de lodos de las unidades de decantación con manto de lodos.

2.5.2 Sedimentación de partículas floculentas

Las partículas que se remueven en una planta de tratamiento de agua son sólidos inorgánicos y orgánicos, y su tamaño, forma y densidad influyen en la velocidad de sedimentación.

Como se ha mencionado, las partículas suspendidas provienen del color y de la turbiedad. La turbiedad proviene principalmente de partículas de sílice, arcilla y limo y su densidad original es cercana a 2,60. El color, es producido principalmente por ácidos orgánicos (fúlvicos, húmicos, etc.) de origen vegetal con densidades entre 1 y 1,5.

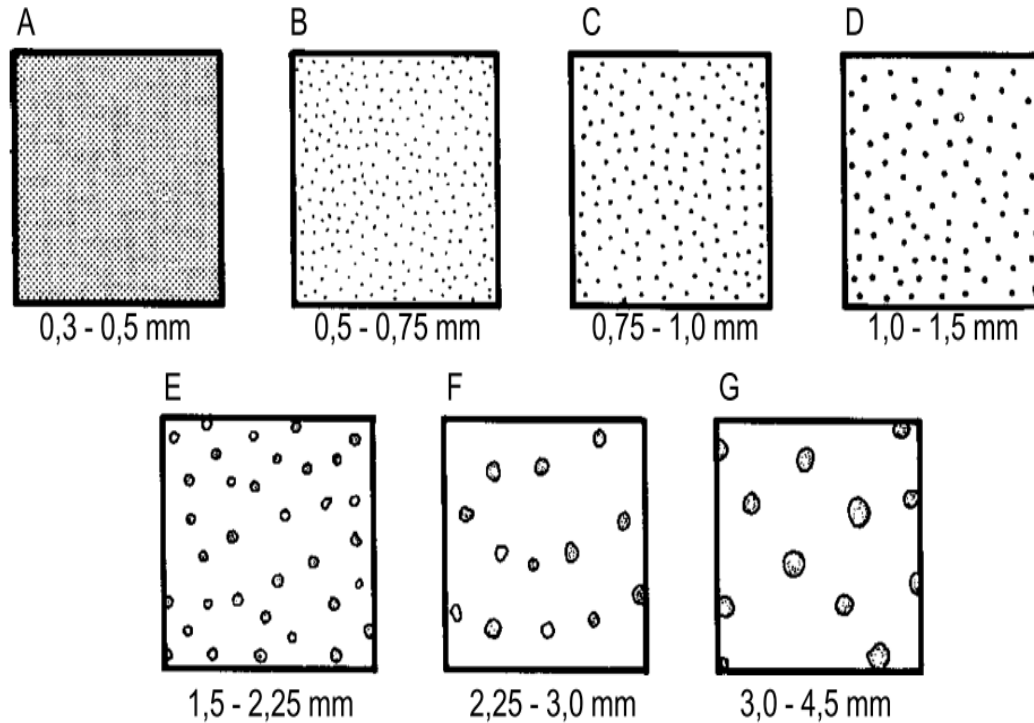
Estas partículas se presentan básicamente en estado coloidal y mediante la adición de coagulantes químicos y de su paso por procesos de coagulación y floculación, se incrementa su tamaño o densidad para someterse al proceso de sedimentación.

Las partículas en suspensión de aguas tratadas con coagulantes metálicos consisten en flóculos formados por óxidos metálicos (Al_2O_3 o Fe_2O_3), agua en 85 a 95% y turbiedad y/o color con densidades variables entre 1,002 cuando predomina el color y 1,03 cuando predomina la turbiedad. En procesos de ablandamiento los flóculos tienen densidades cercanas a 1,20.

El diámetro de los flóculos es variable desde menos de 0,001 mm hasta más de 5 mm, dependiendo de las condiciones de mezcla y floculación (gradientes de velocidad y tiempo de retención) (Maldonado, 2004).

2.5.3 clasificación de partículas según su tamaño

Figura 2- 2 Índices de Willcomb para determinar el tamaño del flóculo (Arboleda, 2008).



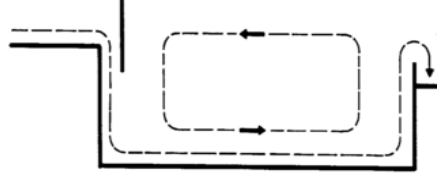
2.5.4 Interferencias en el proceso de sedimentación

Durante el proceso de sedimentación se presentan interferencias que disminuyen la eficiencia en la remoción de partículas sedimentables, como son:

- **Corrientes de densidad:** son las corrientes que se producen dentro del tanque por efecto de las diferencias de densidad en la masa de agua y son ocasionadas por un cambio de temperatura y/o por diferencias en la concentración de las partículas suspendidas en las distintas masas de agua.

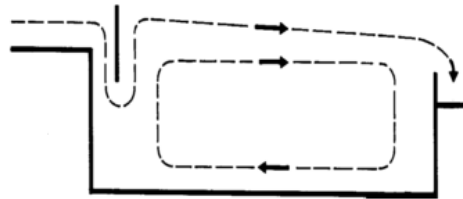
Al entrar agua más fría al sedimentador, la masa de agua se desplaza por el fondo de este y produce el tipo de corriente indicada en la figura 3

Figura 2- 3 Corrientes térmicas debidas al agua fría (Maldonado, 2004).



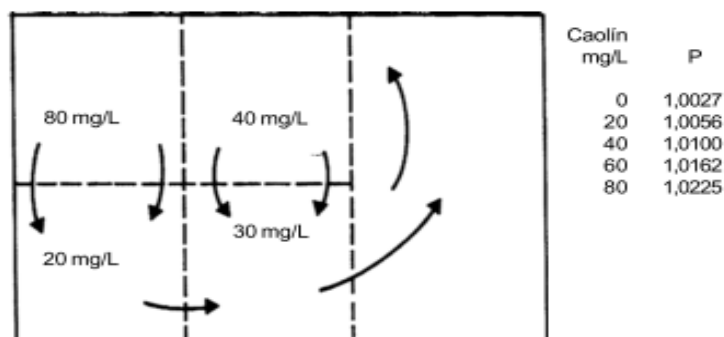
En cambio, con agua más caliente, se produce el fenómeno inverso, que se muestra en la figura 2-4.

Figura 2- 4 Corrientes Térmicas debidas al agua caliente (Maldonado, 2004)



En el caso de variar la concentración, se producen corrientes de densidad por diferencias en las distintas masas de agua, que suelen crear fuerzas más importantes que las térmicas. En la figura 5 se indican las densidades del floculo producido con distintas concentraciones de suspensión de caolín.

Figura 2- 5 Corrientes Térmicas debidas a la densidad (Maldonado, 2004)



Afortunadamente, la mayor concentración de partículas suele estar en el fondo, pero cualquier perturbación en el flujo, ya sea por temperatura, obstrucciones, alta velocidad de

las paletas del floculador, etcétera, puede alterar el equilibrio y producir un flujo sinuoso o envolvente sobre sí mismo, muy diferente del teórico calculado, que es el que con frecuencia aparece en los sedimentadores horizontales, incluso en los bien diseñados.

- Corrientes debidas al viento: el viento puede producir corrientes de suficiente intensidad como para inducir cambios en la dirección del flujo.
- Corrientes cinéticas: pueden ser debido al diseño impropio de la zona de entrada o de salida (velocidad de flujo excesiva, zonas muertas, turbulencias) o por obstrucciones en la zona de sedimentación.

2.6 Diseño de unidades de sedimentación

La sedimentación es un proceso físico que a nivel de plantas de tratamiento no es tan simple debido a que las partículas no son discretas y los sedimentadores no trabajan en condiciones de idealidad por la incidencia de los factores internos y externos enunciados.

Tal como lo exponen Pérez (2002) y Maldonado (2004) las partículas suspendidas presentan características muy diversas de tamaño, forma y densidad, por lo cual el diseño de las unidades de sedimentación no puede generalizarse mediante un modelo matemático, por lo que es necesario adelantar procedimientos teórico experimentales en el laboratorio o mediante plantas piloto para predecir la eficiencia del sedimentador en función de la carga superficial para determinar un porcentaje de remoción de partículas ya sea en función del color o de la turbiedad.

En la literatura técnica se describe la metodología para desarrollar el método experimental que busca predecir la eficiencia de remoción de partículas del sedimentador y por consiguiente determinar los parámetros de diseño de la unidad (Pérez, 2002; Arboleda, 2008).

Los autores mencionados proponen una metodología general, con algunas variaciones entre ellos como se muestra a continuación:

2.6.1 Metodología propuesta por Pérez (2002)

La prueba se puede realizar mediante un ensayo de sedimentación en columna o mediante el ensayo modificado de jarras. Para el presente estudio se optó por el ensayo modificado de jarras.

Ensayo modificado de jarras:

- a. Después de la coagulación y la floculación, retirar las paletas agitadoras y tomar muestras a la misma profundidad cada determinado intervalo de tiempo.
- b. Calcular la velocidad de sedimentación v_{sc} dividiendo la profundidad de toma de la muestra por el tiempo transcurrido.
- c. Determinar a cada muestra turbiedad y color remanente.
- d. Calcular:

$$\frac{C_0 - C}{C_0} \quad \text{ó} \quad \frac{C_0 - C}{C_0} \quad \text{--- (2-1)} \quad \text{ó} \quad \frac{C_0 - C}{C_0} \quad \text{--- (2-2)}$$
- e. Graficar C contra v_s y obtener de la curva los valores de C_f y a . Ver figura 2-6.
- f. De la figura 2-6, obtener los valores de C_f y a .
- g. Seleccionar cargas superficiales que varíen de 10 en 10 ó de 20 en 20 $m^3/m^2.d$, y convertir en unidades cm/s para cada carga. En la figura 1 determinar los respectivos valores de C.
- h. Calcular la eficiencia remocional usando la fórmula:

$$\frac{R_T}{C_0} \quad \text{--- (2-3)}$$

- i. Graficar R_T versus v_{sc} y obtener una curva como se muestra en la figura 2-7.

Figura 2- 6 Velocidad de asentamiento versus turbiedad remanente (Pérez, 2002)

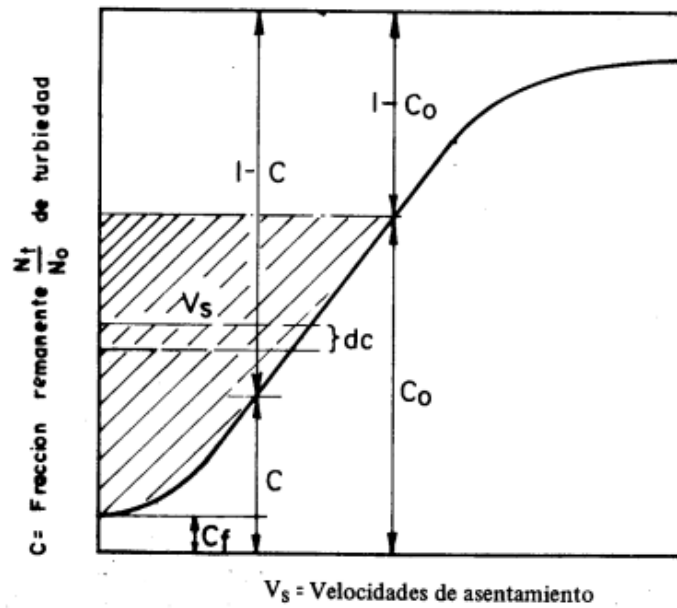
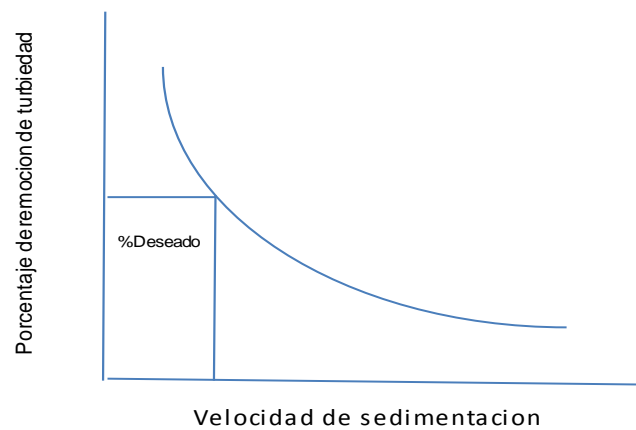


Figura 2- 7 Porcentaje de remoción de turbiedad versus velocidad de sedimentación (Pérez, 2002)



De acuerdo a la figura 2-6 elegir la carga superficial de acuerdo a uno de dos criterios: la velocidad de sedimentación que de la máxima eficiencia remocional o la velocidad de sedimentación que de la máxima turbiedad tolerable por el filtro.

- j. Calcular la velocidad de sedimentación crítica de diseño aplicando el factor de seguridad de 1.3

————— (2-4)

2.6.2 Metodología propuesta por Arboleda (2008)

- a. Extraer de la última cámara del floculador una muestra de igual volumen para 6 beakers o jarras cuidando no romper el floc.
- b. Agitar simultáneamente las 6 jarras hasta mantener una concentración constante de partículas. Esta operación debe hacerse rápidamente para no aumentar el tiempo de floculación.
- c. Tomar una muestra de agua de cada jarra con una pipeta o con el sifón, a intervalos regulares de tiempo. Por ejemplo: luego de suspendida la agitación a 1 minuto en la primera jarra, a 3 minutos la segunda jarra, 5 en la tercera jarra, 10 minutos en la cuarta jarra, 60 minutos en la quinta jarra y 180 minutos en la sexta jarra.

La altura y velocidad de extracción debe ser la misma en todas las jarras.

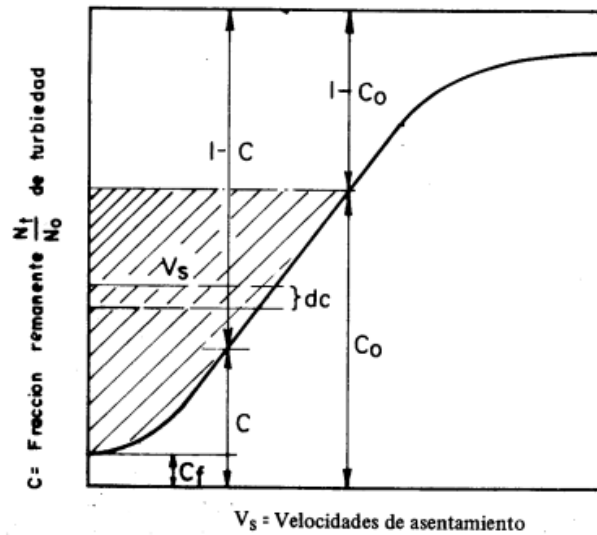
Recomendaciones: proteger las jarras del sol y del viento para proteger las muestras de corrientes térmicas, una forma puede ser colocar las jarras dentro de un contenedor mayor lleno de la misma agua del floculador.

- d. Realizar un gráfico que relacione la turbiedad final en el tiempo N_t sobre la turbiedad inicial N_0 en el eje Y, y en el eje X la velocidad de sedimentación por cada jarra. La curva obtenida tiene la forma de la Figura 2-8.

(2-5)

— (2-6)

Figura 2- 8 $V_s =$ Velocidad de asentamiento (Arboleda, 2008).



Donde — corresponde a la fracción de partículas que sedimenta con la velocidad v_s menor

que v_{sc} . (Teoría de Hazen)

La velocidad es el promedio teórico de sedimentación o carga superficial.

— (2-7)

En la figura 2-7 se observa que la velocidad de asentamiento v_s es igual al área sombreada dividida entre C_o y C_f , la cual se puede calcular por integración así:

(2-8)

Reemplazando el área en la ecuación (2-1) resulta:

$$\text{--- (2-9)}$$

En la práctica la turbiedad en la última jarra nunca es cero $C=C_0 - C_f$ y la curva no pasa por el origen, la ecuación 3 queda así:

$$\text{--- (2-10)}$$

La velocidad de sedimentación se obtiene despejando la ecuación 2-4:

$$\text{----- (2-10)}$$

2.6.3 Factor de seguridad

Factor que corrige el valor de obtenido y da un margen de seguridad para los diseños.

2.7 Método propuesto para calcular Remoción total R_T

Para demostrar la conveniencia del método propuesto para calcular la remoción total R_T , se establece una comparación con el método planteado por Arboleda (2008) usando el ejemplo descrito en la página 303 del libro Teoría y práctica de la purificación del agua.

2.7.1 Método desarrollado por Arboleda (2008)

Determinación de “ C_0 ”

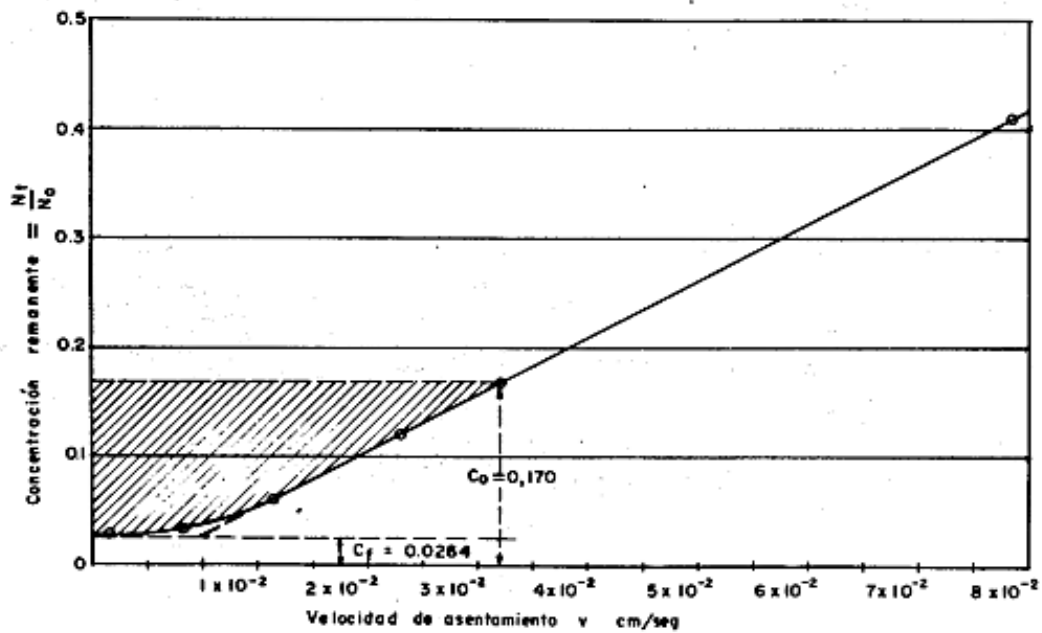
El autor propone leer el valor de “ C_0 ” de la gráfica experimental (Fracción contra V_s) a partir del valor de carga seleccionado [$32 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ d}$]. Ver figura 2-9.

Los datos experimentales de la prueba de sedimentación para este ejemplo se presentan en la tabla 2-6.

Tabla 2- 6 Velocidad de asentamiento para diferentes remociones de turbiedad (Arboleda, 2008)

1	2	3	4	5
Jarra No.	Tiempo	v_s cm/s	Turbiedad N_T	Fracción N_T/N_0
1	1	8.34×10^{-2}	39.0	0.41
2	3	2.78×10^{-2}	10.4	0.12
3	5	1.66×10^{-2}	5.7	0.06
4	10	0.834×10^{-2}	3.0	0.032
5	60	0.139×10^{-2}	2.95	0.030
6	180	0.046×10^{-2}	2.50	0.026

Figura 2- 9 Cálculo porcentaje de remoción (Arboleda, 2008)



$C_o = 0.17$

- Cálculo del área "a"

De la figura 2-9 se observa que el área rayada se asimila a un trapecio así:

-

- Cálculo de “ R_T ” usando la ecuación (2-10)

— (2-10)

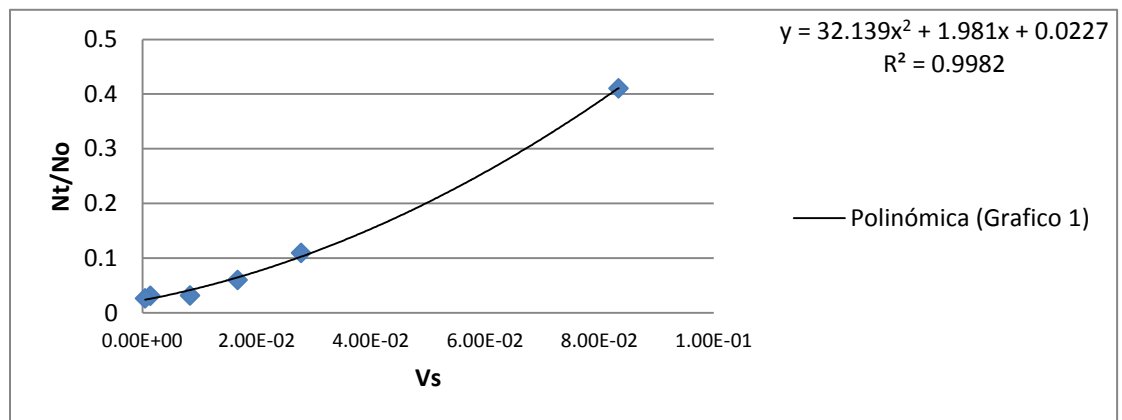
$$R_T = 94,5\%$$

2.7.2 Método propuesto

- Determinación de “ C_o ”

Se propone encontrar a “ C_o ” a partir de la correlación hallada con los datos experimentales de la prueba de velocidad de sedimentación crítica de la tabla 2-6, como se muestra en la figura 2-10

Figura 2- 10 Cálculo C_o



$$y = 32.139x^2 + 1.981x + 0.0227$$

$$\text{Fracción} = C = 32.139 \cdot V_s^2 + 1.981 \cdot V_s + 0.0227$$

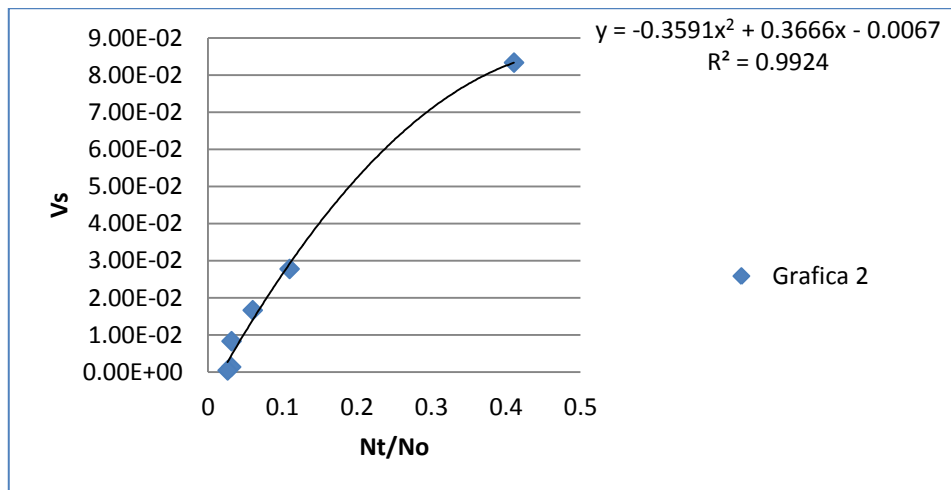
$$C_o = 32.139 \cdot V_{sc}^2 + 1.981 \cdot V_{sc} + 0.0227$$

$$C_o = 0.14$$

- Determinación del área “a”

Dado que el término “a” está definido por la integral [], se propone invertir los ejes de la gráfica anterior con el fin de poner “Vs” en función de “C” (Fracción [Nt/No]) y calcular el área bajo curva (equivalente al área rayada en la figura 2-9) con el método numérico de trapecios, usando el software Scilab, así:

Figura 2- 11 Calculo Área “a”



$$y = -0,3591x^2 + 0,3666x - 0,0067$$

$$V_s = -0,3591 C^2 + 0,3666 C - 0,0067$$

$$[Nt/No] = C = \text{fracción}$$

Reemplazando en la integral, se tiene:

(2-11)

Aplicando el método numérico de Trapecios,

- Cálculo de " R_T " usando la ecuación 2-10

—

————

$$R_T = 96,5\%$$

Metodología

3.1 Selección del método de análisis

Las pruebas de tratabilidad se basaron según lo establecido por el RAS 2000, título C, el cual estipula que el procedimiento para las pruebas de jarras deben guiarse por la Norma Técnica Colombiana NTC 3903 (ICONTEC, 2001), además se consideró que todo análisis de laboratorio debe hacerse de acuerdo a la normatividad vigente y en su ausencia con los métodos estándar internacionales como Normas ASTM; Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water de la APHA, AWWA y WPCF.

De igual forma la literatura técnica al respecto desarrollada por los autores Casas (1992), Pérez (2002) y Arboleda (2008) se constituye en el principal referente para la realización de las pruebas de tratabilidad durante la presente investigación.

3.2 Procedimiento de jarras para determinación de dosis, tiempo y gradiente óptimo. Basado en Casas (1992)

3.2.1 Determinación de la dosis óptima

En esta prueba se busca formar un floc compacto y pesado que pueda ser removido por sedimentación o que pueda ser retenido en un filtro.

Pasos:

- Al agua cruda se le determina: temperatura, turbiedad, color y pH.

- En cada una de los vasos del equipo de jarras poner dos litros de agua, previamente agitada. Figura 3-1
- Tomar volúmenes conocidos de coagulante PAC a una concentración de 1% (P/V), para dosificar en las 6 jarras de 2 litros cada una, de acuerdo a la tabla 3-1.
- Ubicar las paletas dentro de las jarras.
- Poner el sistema de agitación al máximo (300 rpm).
- Durante la agitación, se dosifica el coagulante, de modo que en todas las jarras se aplique a la misma profundidad y al mismo tiempo.
- A los 20 o 30 segundos de agitación, se disminuye la velocidad de rotación de las paletas a 30 rpm y se deja flocular durante 15 minutos.
- Transcurrido el tiempo de floculación, se suspende la agitación y se extrae las paletas, ubicando las jarras con sumo cuidado sobre la mesa.
- Pasados 5 minutos de sedimentación se toman muestras de cada jarra a la misma profundidad y al mismo tiempo, y se le determina turbiedad, color, pH e índice de Wilcomb. La jarra con las mejores características se define como la óptima. Figura 3-2

3.2.2 Determinación del tiempo de floculación óptimo

Con este ensayo se encuentra el tiempo óptimo de mezcla lenta o de floculación para la cual se obtengan los mejores resultados, manteniendo las condiciones de operación anteriormente encontradas:

- Se realiza el ensayo adicionando la dosis óptima de coagulante para el tiempo de coagulación de 30 segundos.
- Se selecciona el tiempo de floculación de acuerdo a los valores de la tabla 3-2.

Para la determinación de tiempo óptimo de floculación y gradiente óptimo se tomaron los intervalos propuesto por el RAS para el diseño de floculadores hidráulicos y mecánicos, así:

A cada jarra se le asigna un tiempo entre 20 y 40 minutos (Jarra No. 1 – 20 min, Jarra No. 2 – 25 min, Jarra No.3 – 30 min, Jarra No.4 – 35 min y jarra No. 5- 40 min). Con la

ayuda del cronometro cada jarra se somete al tiempo estipulado de floculación y luego se deja sedimentar por 5 minutos y se toman los valores de turbiedad, color, pH e índice de Wilcomb.

Tabla 3-1 Dosis de coagulante (Fuente propia)

Jarra	Dosis de Coagulante [mg/L]	Concentración de la solución de Coagulante [%]					
		10 %	5%	2%	1%	0,5%	0,1%
		[ml] de coagulante					
1	10	0,2	0,4	1,0	2,0	4,0	20,0
	15	0,3	0,6	1,5	3,0	6,0	30,0
2	20	0,4	0,8	2,0	4,0	8,0	40,0
	25	0,5	1,0	2,5	5,0	10,0	50,0
3	30	0,6	1,2	3,0	6,0	12,0	60,0
	35	0,7	1,4	3,5	7,0	14,0	70,0
4	40	0,8	1,6	4,0	8,0	16,0	80,0
	45	0,9	1,8	4,5	9,0	18,0	90,0
5	50	1,0	2,0	5,0	10,0	20,0	100,0
	55	1,1	2,2	5,5	11,0	22,0	110,0
6	60	1,2	2,4	6,0	12,0	24,0	120,0

Tabla 3-2 Tipo floculador vs. Intervalos tiempo y gradiente óptimos (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000)

Floculador	Variables	Intervalo.
Hidráulico	Tiempo	[20 – 30] minutos
	Gradiente	[20 – 70] s ⁻¹
Alabama	Tiempo	[20 – 40] minutos
	Gradiente	[20 – 70] s ⁻¹
Mecánico.	Tiempo	[20 – 40] minutos
	Gradiente	[15 – 75] s ⁻¹

Para evaluar cualitativamente el floc producido se usó el índice de Wilcomb, que se indica en la tabla 3-3.

Tabla 3-3 Índice de Wilcomb

Número de Índice	Descripción
0	Ningún signo de aglutinamiento
2	Floc muy pequeño, casi imperceptible
4	Floc que sedimenta muy lentamente o no sedimenta
6	Floc de tamaño relativamente grande, esponjoso, que sedimenta con lentitud.
8	Floc de sedimentación fácil aunque deja algo de turbiedad en el agua
10	Floc de muy buena sedimentación que deja agua cristalina

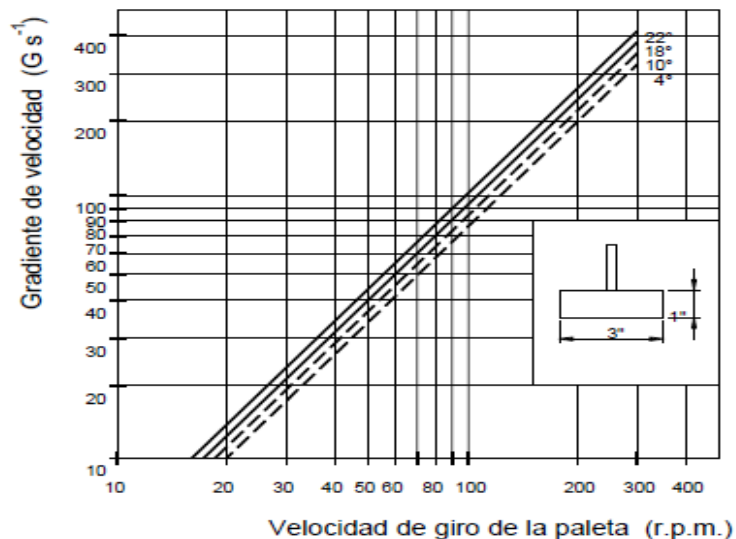
3.2.3 Determinación de gradiente óptimo

Este ensayo permite encontrar el gradiente de mezcla lenta que mejores resultados aporte en el proceso. Debido a que las seis paletas no pueden colocarse en rotación independientemente se requiere efectuar el ensayo jarra por jarra, dado el tiempo y dosis Óptima. En las figuras 3-2, 3-3 y 3-4 se presenta una prueba de jarras para determinación de dosis óptima de coagulante, de determinación de gradiente y tiempo óptimo y por último la imagen de las jarras luego del tiempo de sedimentación o del agua clarificada.

Pasos:

- Primero se selecciona el gradiente a estudiar de acuerdo a la tabla 3-2. Una vez seleccionado el gradiente y de acuerdo a la figura 3-1 se determina la velocidad de rotación en RPM que se desea evaluar dependiendo de la temperatura del agua y la geometría de la Jarra (En este caso Jarras de dos litro de forma cuadrada).

Figura 3- 1 Gradiente de velocidad vs. Velocidad de giro de paleta (Casas, 1992)



- Usando la dosis optima de coagulante para cada jarra, el tiempo óptimo de floculación y de requerirse el pH optimo, se procede a realizar la floculación en cada jarra independientemente seguida de la sedimentación y posterior a esto se determina la turbiedad, color, pH e índice de Wilcomb. Figura 3-3

Figura 3- 1 Muestra de agua Cruda del Rio Oro



Figura 3- 2 Agua Clarificada en la determinación de dosis óptima

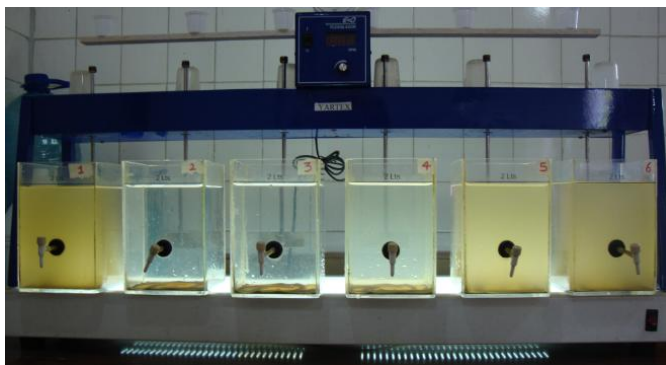


Figura 3- 3 Agua Clarificada bajo condiciones gradiente y tiempo óptimo



3.2.4 Determinación de pH óptimo

Se preparan las jarras a diferentes valores de pH, agregando Ácido Sulfúrico [1 N] o Hidróxido de Sodio [1 N] dependiendo del valor de pH que se quiere analizar. Una vez se agrega el ácido o la base se mide el pH y se registra el dato. Se someten las jarras a la dosis óptima y se determina la jarra con las mejores características ya finalizado el proceso de Coagulación- Floculación.

3.3 Prueba de velocidad de sedimentación crítica

- Se toma la muestra de agua en 6 jarras de 2 litros.
- Se someten a las condiciones de dosis, gradiente y tiempo óptimo.
- Después de realizar la coagulación-floculación, se retiran los agitadores de los recipientes y se extraen las muestras a la misma profundidad de 6 cm cada determinado intervalo de tiempo; dividiendo la profundidad de toma de la muestra por el tiempo transcurrido, se determina en cada caso la velocidad de sedimentación y se mide para cada muestra la turbiedad residual.

3.4 Cálculo Velocidad de sedimentación crítica (v_{sc})

3.4.1 Realización prueba de v_{sc}

Se efectúa la prueba de velocidad de sedimentación crítica, y se obtienen los datos que aparecen en la tabla 3-4.

No = 15.8 (turbiedad inicial del Agua Cruda)

Las columnas 1, 2 y 4 se obtienen directamente en el laboratorio. La columna 3 se obtiene al dividir la distancia por el tiempo de toma, considerando que la muestra se extrajo a 6 cm de profundidad.

Tabla 3- 4 Prueba de Velocidad de sedimentación crítica v_{sc} ³

1	2	3	4	5
Jarra No	Tiempo [min]	vs [cm/s]	Turbiedad [Nt]	Fracción [Nt/No]
1	1	0,1	10,8	0,683544304
2	3	0,033333333	6,77	0,428481013
3	5	0,02	4,88	0,308860759
4	10	0,01	1,92	0,121518987
5	60	0,001666667	0,8	0,050632911
6	180	0,000555556	0,64	0,040506329

3.4.2 Elaboración gráficas Velocidad de sedimentación V_s contra Concentración remanente C y Concentración remanente C contra Velocidad de sedimentación V_s

Con las columnas 3 y 5 de la tabla 3-4 se grafica Velocidad de sedimentación V_s contra Concentración remanente C , como se muestra en la figura 3-5; En la figura 3-6 se muestra la curva "Concentración remanente C contra Velocidad de sedimentación V_s ".

Para definir las regresiones que representan adecuadamente el comportamiento de las series de datos representadas en las curvas V_s contra C y C contra V_s , se realizan diferentes ensayos de modelos lineales, polinómicos y exponenciales, para los cuales se analiza el coeficiente de determinación (r^2) y la curva que contenga a la mayoría de los datos. El r^2 permite determinar la calidad del modelo para replicar los resultados y la proporción de variación de éstos, pero no necesariamente se basa en el mayor número de los datos, además si se llegase a definir un modelo polinómico, los de orden superior pueden oscilar mucho en los resultados y excluir los puntos medios y los de orden bajo pueden llegar a tener soluciones infinitas. Por tanto como criterio de selección se tomó como prioridad que la curva contuviera la mayor cantidad de los datos, con el objetivo de definir el modelo realmente represente la mayoría de los ensayos realizados. Se debe considerar que en gran parte los modelos presentaron un r^2 por encima de 0.9, por tanto

³ Muestra de Cálculo para el Día 18 del Mes Uno.

las ecuaciones seleccionadas pueden considerarse muy representativas del comportamiento analizado (Wikipedia, 2014)

Figura 3- 4 Velocidad de sedimentación V_s contra Concentración remanente C

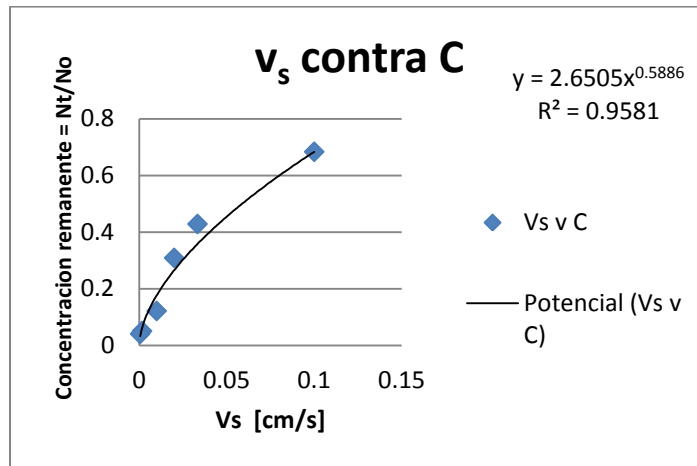
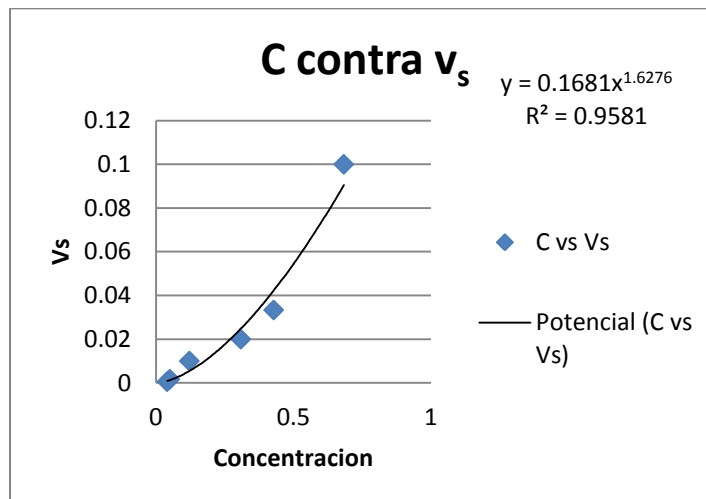


Figura 3- 5 Concentración remanente C contra Velocidad de sedimentación V_s



3.4.3 Cálculo del porcentaje de remoción total RT

- Se selecciona uno o varios valores de carga superficial basado en el RAS 2000 (Minproteccion, 2000), para el cual se desee hacer los análisis, de acuerdo el tipo de sedimentador según tabla 3.5.

Tabla 3- 5 Carga superficial de acuerdo al tipo de sedimentador (Minproteccion, 2000)

Tipo.	Intervalo de Carga Superficial. [m ³ /m ² d]
Flujo Horizontal	15 – 30 [m ³ /m ² d]
Flujo ascendente o Vertical	20 – 30 [m ³ /m ² d]
Manto de lodos	30 – 60 [m ³ /m ² d]
Alta tasa	120 – 185 [m ³ /m ² d] (Placas Angostas) 200 – 300 [m ³ /m ² d] (Placas Profundas)

Para una carga superficial dada, se calcula la v_{sc} en [cm/s] y con la correlación de los datos de la figura 3-1 se encuentra el valor de C_o .

$$C = 2,6505 V_{sc}^{0,5886}$$

- Luego se calcula el término “ a ”, según la ecuación 2-3, y reemplazando los valores de los límites de la integral, usando la correlación de los datos de la figura 3-6:

(3-1)

Método Numérico de Trapecios (Integración Numérica)

Si f continua en $[a, b]$. La regla de los trapecios para aproximar $\int_a^b f(x) dx$ viene dada por

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{b-a}{2} [f(a) + f(b)] \quad (3-2)$$

Además, cuando $f(x)$ es una función cóncava hacia arriba, el miembro de la derecha se aproxima a $\int_a^b f(x) dx$.

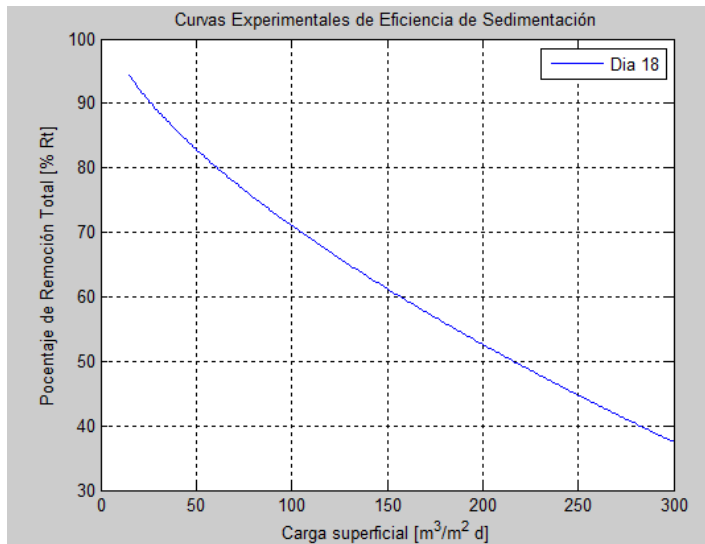
Se aplica integración Numérica con el Método de Trapecios debido a que la ecuación es altamente no lineal, se obtiene el valor de " a ",

- De la tabla 3-4 se obtiene el valor de $C_f = 0,040506329$
- Por último se calcula el porcentaje de remoción total (R_T) para una carga superficial dada.

$$\text{---} \quad (3-3)$$

- Se repite este cálculo para cada uno de los valores comprendidos dentro del intervalo de estudio para obtener una gráfica como la de la figura 3-7. Dicha grafica se obtiene a partir de un programa computacional desarrollado en un software matemático gratuito Scilab.

Figura 3- 6 Curva experimental Eficiencia de sedimentación



3.5 Recolección de muestras

Para realizar cada prueba de tratabilidad es necesario recolectar una muestra de 100 litros de agua cruda, pues todas las condiciones óptimas y la posterior prueba de velocidad de sedimentación crítica se realizan a una muestra uniforme en sus características fisicoquímicas.

3.6 Procedimiento para calcular Velocidad de sedimentación crítica.

- Toma de muestra de agua cruda de 60 litros mínimo
- Realizar prueba de jarras para determinar dosis óptima de coagulante
- Realizar prueba para determinar tiempo de floculación óptimo
- Realizar prueba para determinar gradiente óptimo
- Realizar prueba de pH óptimo
- Realizar prueba de velocidad de sedimentación crítica

- Realizar cálculos

3.8 Recolección de datos

Los datos obtenidos de las pruebas de tratabilidad se consignaron en las tablas de recolección de datos. Anexo Tablas de recolección de datos.

4. Resultados

4.1 Pruebas de tratabilidad

En la tabla 4-1, se presentan los resultados por día de 90 pruebas de tratabilidad aplicadas al Rio Oro, es decir se resumen las condiciones de agua cruda y los resultados de condiciones óptimas, así como las condiciones remanentes del agua clarificada y filtrada. Cabe aclarar que para que una prueba de tratabilidad sea aceptable es necesario que el pH, el color y la turbiedad del agua filtrada se ajusten a las condiciones o rangos establecidos en la Resolución 2115 de 2007 (Ministerio Protección Social, 2007).

Según lo descrito el pH debe estar en el rango 6.5 – 9.0; el color debe ser menor de 15 UPC y la turbiedad menor de 2 UNT.

La información de la tabla 4-1 es el insumo para realizar el análisis de las condiciones óptimas, de pH, gradiente, según se muestra en el numeral 4.2.

El análisis de Tiempo y Gradiente óptimos se realizó por mes aplicando la distribución de frecuencia.

Para el mes 1 los análisis están contemplados en la tabla 4-2 y grafico 4-1 para tiempo óptimo de floculación; y tabla 4-3 y grafico 4-2 para gradiente óptimo.

Para el mes 2 los análisis están contemplados en la tabla 4-4 y grafico 4-3 para tiempo óptimo de floculación; y tabla 4-5 y grafico 4-4 para gradiente óptimo.

Para el mes 3 los análisis están contemplados en la tabla 4-6 y grafico 4-5 para tiempo óptimo de floculación; y tabla 4-7 y grafico 4-6 para gradiente óptimo.

Para los primeros treinta días de ensayos no se realizó análisis de turbiedad, color y aluminio residual al agua filtrada, pues esta medida se implementó luego de incluir en el estudio la necesidad de analizar el impacto del policloruro de aluminio PAC sobre el aluminio residual.

El agua filtrada en una prueba de jarras se obtiene pasando una muestra de 10 ml de agua clarificada por un filtro de 9 mm de poro, usando una bomba de vacío.

Tabla 4- 1 Resultados Pruebas de tratabilidad

PRUEBAS DE TRATABILIDAD													
DÍA	CONDICIONES AGUA CRUDA			CONDICIONES OPTIMAS			CONDICIONES AGUA CLARIFICADA (propiedades residuales)				CONDICIONES AGUA FILTRADA		
				Dosis [mg/l]	Tiempo [min]	Gradiente [s ⁻¹]							
	TURBIEDAD [NTU]	COLOR [PCU]	pH				TURBIEDAD [NTU]	COLOR [PCU]	pH	ÍNDICE DE FLOCULACIÓN DE WILCOMB	TURBIEDAD [NTU]	COLOR [PCU]	ALUMINIO [mg/l]
1	1,54	20	7,42	10	40	15	1,43	8	7,1	4			
2	12,5	50	7,69	20	30	20	1,88			8			
3	1,57	20	7,94	12,5	35	20	1,27	10	7,5	4			
4	472	1960	7,28	40	40	20	2,96	20	7,09	8			
5	24,5	180	7,39	20	35	15	4,48	40	7,23	8			
6	17,5	150	7,34	15	35	15	5,4	80	7,06	8			
7	90,9	400	7,68	15	30	30	3,09	20	7,67	8			
8	2,75	50	7,44	10	40	20	1,98	20	7,4	6			
9	5,46	170	7,73	10	35	30	3,05	30	7,57	6			
10	5,51	80	7,68	10	35	20	2,77	40	7,55	6			
11	3,58	30	7,6	7,5	35	20	2,17	10	7,6	4			
12	17,7	140	7,62	15	35	20	4,8	40	7,21	6			
13	8,3	40	7,35	10	25	15	3,45	10	7,5	8			
14	36,6	230	7,36	20	35	15	2,53	10	7,22	8			
15	33,1	220	7,22	20	35	15	2,83	10	7,2	8			
16	3,82	60	7,09	7,5	35	15	2,89	30	7,31	4			
17	2,68	20	7,07	10	35	15	1,96	10	7,1	4			
18	15,8	130	7,31	10	30	20	4,8	40	7,01	6			
19	2,2	40	7,68	10	30	20	1,92	20	7,17	2			
20	24,2	140	7,28	10	25	15	3,9	50	7,14	6			
21	2,16	10	7,2	7,5	30	20	1,65	10	7,35	2			
22	3,38	20	7,06	7,5	35	20	1,87	10	7,27	2			

23	107	460	7,36	15	35	20	4,5	50	7,1	8			
24	53,1	340	6,5	25	35	20	4,8	40	6,37	8			
25	3,83	50	6,58	10	20	15	3,49	30	6,5	4			
26	48,1	330	7,37	25	35	20	2,33	30	6,99	8			
27	21,2	200	6,88	25	20	15	9,19	60	7,01	6			
28	56,6	410	7,72	25	20	15	4,18	50	7,22	8			
29	7,48	60	7,24	10	35	15	4,09	20	6,64	4			
30	624	2250	7,2	50	30	20	4,6	40	6,72	8			
1	267	990	7,39	30	25	20	2,93	30	7,19	8	-	-	-
2	5,09	30	7,42	10	30	20	1,61	30	7,33	4	-	-	0,12
3	1,96	20	7,84	5	35	15	1,41	8	7,5	2	0,95	4	0,12
4	122	600	7,53	20	35	20	2,86	30	7,15	10	1,36	20	0,12
5	61,3	330	7,66	15	35	20	2,22	30	7,32	8	0,84	20	0,12
6	2,89	40	7,48	10	35	15	1,87	30	7,27	4	0,46	20	0,12
7	2,45	30	7,18	7,5	35	15	1,65	20	7,27	4	0,48	10	0,12
8	2,2	30	7,56	7,5	30	15	1,53	10	7,52	4	0,94	10	0,12
9	1,85	30	7,59	7,5	30	15	1,47	20	7,57	4	0,22	20	0,12
10	2,45	30	7,18	10	35	15	1,65	20	7,2	4	0,48	10	0,12
11	156	960	7,19	30	35	20	2,47	30	7,19	8	0,54	30	0,07
12	81,3	500	7,17	35	35	20	2,65	50	7,02	10	0,38	10	0,12
13	4,38	60	7,17	15	25	15	2,17	30	7,07	4	0,56	10	0,07
14	3,89	50	7,67	10	30	15	3,32	20	7,46	4	0,48	20	0,12
15	2,99	30	7,41	10	30	15	2,07	20	7,15	4	0,43	10	0,07
16	174	840	7,69	20	35	20	2,39	40	7,11	10	0,85	10	0,07
17	116	640	7,6	15	30	20	3,47	30	7,28	10	0,76	20	0,07
18	43,2	250	7,47	10	35	15	3,56	10	7,42	10	0,72	10	0,07
19	6,98	80	7,51	10	35	15	2,51	20	7,52	6	0,38	20	0,07
20	2,04	30	7,47	7,5	30	20	1,65	10	7,35	4	0,23	8	0,07
21	18,2	130	7,62	12,5	40	15	1,75	10	7,52	6	0,78	0	0,07
22	86,7	560	7,61	30	30	15	3,52	40	6,95	8	0,84	3	0,07
23	16,9	130	7,59	10	35	15	4,59	30	7,54	6	1,58	20	0,12
24	11,7	160	7,21	30	20	15	5,22	80	7,2	6	0,72	20	0,07
25	14,4	130	7,68	25	35	15	3,98	30	7,26	6	0,52	6	0,12
26	11,6	90	7,39	15	35	15	2,89	20	7,33	8	0,46	6	0,07
27	92,5	600	7,32	15	35	15	6,08	30	7,35	6	1,63	8	0,07
28	9,89	80	7,31	10	30	15	3,63	40	7,45	6	0,71	10	0,07
29	43,3	290	7,65	15	40	20	2,88	30	7,31	6	0,79	7	0,07
30	5,37	70	7,3	10	30	15	3,8	30	7,4	4	0,62	8	0,12
1	4,21	70	7,5	10	25	15	2,95	30	7,45	4	0,26	6	0,07

2	2,99	40	7,72	10	35	15	2,15	20	7,56	4	0,37	5	
3	8,76	80	7,5	15	25	20	2,15	30	7,32	6	0,33	3	0,07
4	6,1	70	7,48	15	30	15	2,59	8	7,46	6	0,26	6	0,07
5	60,4	270	7,67	15	35	20	2,85	20	7,44	8	0,34	5	0,07
6	15,7	100	7,83	10	25	20	2,45	20	7,46	6	0,28	2	0,07
7	7,22	40	7,21	10	30	15	2,76	30	7,08	6	0,3	2	0,07
8	168	880	7,56	30	35	20	2,48	30	7,01	8	0,38	4	0,07
9	30,9	250	7,55	20	30	20	3,26	30	7,38	6	0,68	6	0,07
10	4,2	30	7,26	7,5	35	15	2,37	20	7,25	6	0,33	10	0,12
11	45,5	330	7,36	20	30	20	2,54	20	7,2	8	0,33	10	0,07
12	8,38	70	15	10	30	15	2,51	20	7,51	6	0,31	10	0,12
13	10,1	80	7,56	10	30	15	2,74	20	7,43	6	0,39	4	0,07
14	210	820	7,53	20	40	20	1,81	10	7,31	8	0,36	3	0,07
15	4,26	40	7,61	7,5	40	15	2,67	20	7,49	4	0,38	1	0,12
16	2,1	40	7,07	7,5	40	15	1,68	20	7,04	4	0,52	10	0,07
17	2,23	30	7,15	7,5	35	15	1,56	20	7,1	4	0,39	7	0,07
18	44,1	280	7,26	15	40	20	2,72	10	6,97	8	0,5	3	0,07
19	108	600	7,01	15	35	20	3,27	20	6,89	8	0,68	10	0,07
20	43,4	250	7,5	15	25	20	3,59	30		6	0,6	5	0,07
21	1,86	30	7,54	10	35	15	1,18	10	7,45	4	0,87	6	0,36
22	13,1	60	7,41	15	30	20	1,88	20	7,25	6	0,51	8	0,07
23	6,51	70	7,38	10	35	20	2,17	20	7,33	6	0,71	10	0,12
24	22,4	310	7,11	25	30	15	8,19	50	7,01	6	0,98	20	0,2
25	58,1	330	7,21	25	35	20	2,33	30	7,09	8	0,47	10	0,12
26	67,2	230	7,66	15	35	20	2,2	30	7,52	8	0,84	10	0,12
27	6,09	40	7,54	10	30	15	1,95	20	7,5	4	0,53	10	0,2
28	39,8	270	7,56	15	40	20	2,88	30	7,31	6	0,72	7	0,07
29	87,5	420	7,15	20	35	20	2,29	30	7,15	10	0,33	10	0,07
30	9,1	65	7,32	12,5	40	15	1,82	10	7,25	8	0,41	3	0,07

4.2 Análisis estadístico de la información para la determinación del gradiente y tiempo óptimos.

Mediante la distribución de frecuencia se realizó el análisis de datos para determinar tiempo y gradiente óptimo para los tres meses de estudio

Nomenclatura**LI:** Límite inferior**LS:** Limite Superior**x:** Marca de Clase**f:** Frecuencia Absoluta**fr:** Frecuencia Relativa**fa:** Frecuencia Absoluta Acumulada**far:** Frecuencia Relativa Acumulada.**Fórmulas aplicadas:**

$$- \text{ Intervalo} \quad (4-1)$$

$$\text{---} \quad \text{Media aritmética} \quad (4-2)$$

$$\text{—} \quad \text{Mediana} \quad (4-3)$$

$$\text{—} \quad \text{Moda} \quad (4-4)$$

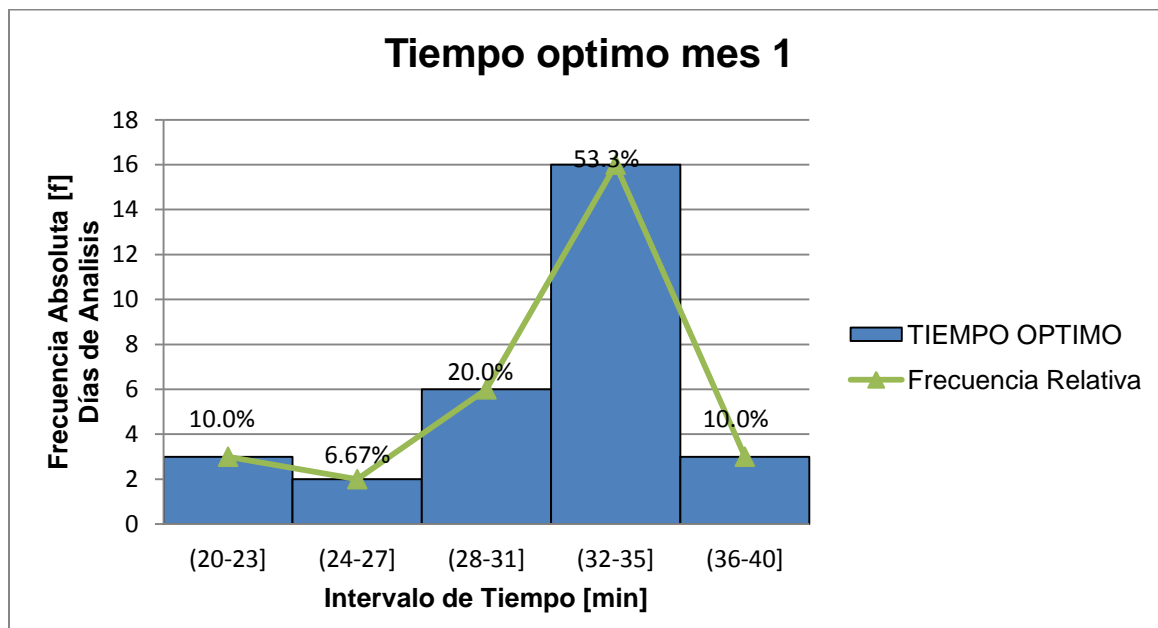
4.2.1 Tiempo óptimo de floculación Mes 1

Rango	R	21
Clase	K	5
Intervalo	I	4

Tabla 4- 2 Distribución de frecuencia Tiempo óptimo de floculación mes 1

LI	LS	x	f	Fr	fa	far	μ	$f\mu$
20	23	21,5	3	10,0%	3	10,0%	-2	-6
24	27	25,5	2	6,67%	5	16,67%	-1	-2
28	31	29,5	6	20,0%	11	36,67%	0	0
33	36	33,5	16	53,3%	27	90,00%	1	16
37	40	38,0	3	10,0%	30	100,00%	2	6
			30	100,0%				14

Gráfico 4- 1 Histograma de frecuencia Tiempo óptimo de floculación mes 1



Media aritmética 31,7

En el Mes Uno de estudio se observó que en 16 días de análisis que corresponden al 53.3%, se tuvo un promedio de 33.5 minutos como tiempo optimo, oscilando en un rango de 32 a 35 minutos. Y que para los 30 días de análisis se obtuvo un promedio de 31.7 minutos como tiempo óptimo de floculación. El valor promedio de tiempo óptimo para el mes 1 indica que al momento de optar por un diseño éste se ajusta a floculadores tipo Alabama o Mecánico según la tabla 3-2 (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000)

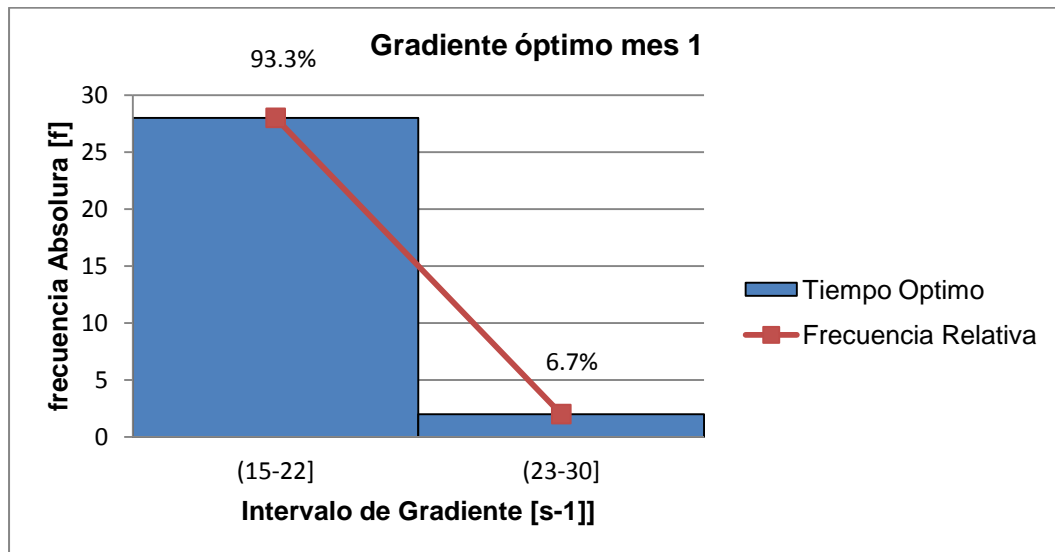
4.2.2 Gradiente óptimo de floculación mes 1

Rango	R	16
Clase	K	2
Intervalo	I	8

Tabla 4- 3 Distribución de frecuencia Gradiente óptimo mes 1

LI	LS	x	f	fr	fa	far	μ	$f\mu$
15	22	18,5	28	93,3%	28	93,3%	-1	-28
23	30	26,5	2	6,7%	30	100,00%	0	0
			30	100,0%				-28

Gráfico 4- 2 Histograma de frecuencia gradiente óptimo mes 1



Media Aritmética 19,03

En el Mes Uno de estudio se observó que en 28 días de análisis que corresponden al 93.3%, se tuvo un promedio de 18.5 s^{-1} como Gradiente óptimo, oscilando en un rango de 15 a 22 s^{-1} . Y que para los 30 días de análisis se obtuvo un promedio de $19,03 \text{ s}^{-1}$ como gradiente óptimo. Este resultado indica que para el diseño se ajusta mejor un floculador tipo Alabama según la tabla 3-2 (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000).

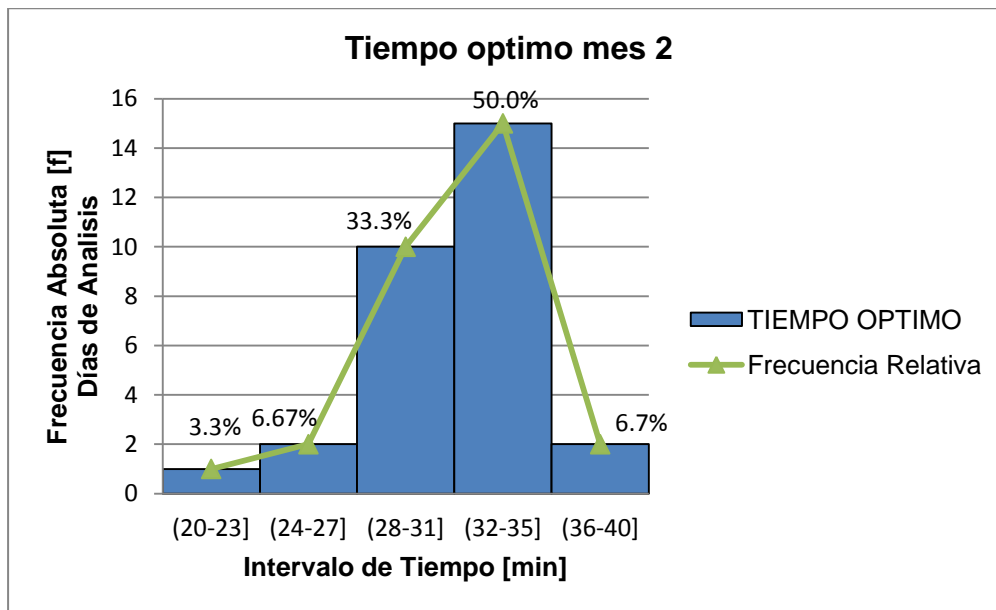
4.2.3 Tiempo óptimo de floculación Mes 2

Rango	R	21
Clase	K	5
Intervalo	I	4

Tabla 4- 4 Distribución de frecuencia Tiempo óptimo de floculación mes 2

LI	LS	x	f	fr	fa	far	μ	$f\mu$
20	23	21,5	1	3,3%	1	3,3%	-2	-2
24	27	25,5	2	6,67%	3	10,00%	-1	-2
28	31	29,6	10	33,3%	13	43,33%	0	0
32	35	33,5	15	50,0%	28	93,33%	1	15
36	40	38,0	2	6,7%	30	100,00%	2	4
			30	100,0%				15

Gráfico 4- 3 Histograma de frecuencia Tiempo óptimo de floculación mes 2



Media aritmética 31,70

En el Mes 2 de estudio se observó que en 15 días de análisis que corresponden al 50%, se tuvo un promedio de 33.5 minutos como tiempo óptimo, oscilando en un rango de 32 a 35 minutos. Y que para los 30 días de análisis se obtuvo un promedio de 31.7 minutos como tiempo óptimo. Estos resultados indican que el tiempo óptimo de floculación se ajusta a unidades de tipo Alabama o Mecánico según la tabla 3-2 (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000).

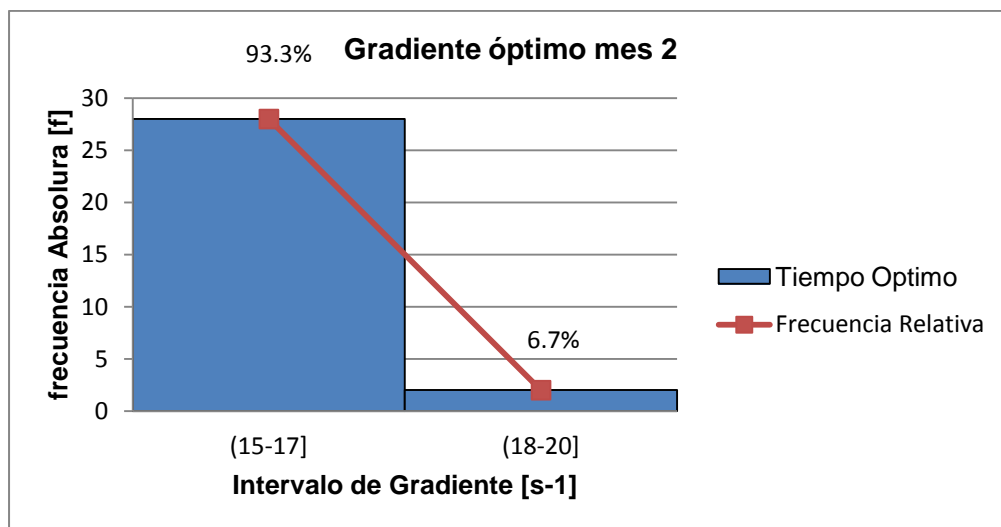
4.2.4 Gradiente óptimo de floculación Mes 2

Rango	R	6
Clase	K	2
Intervalo	I	3

Tabla 4- 5 Distribución de frecuencia Gradiente óptimo mes 2

LI	LS	x	f	fr	fa	far	μ	$f\mu$
15	17	16	28	93,3%	28	93,3%	-1	-28
18	20	19	2	6,7%	30	100,00%	0	0
			30	100,0%				-28

Gráfico 4- 4 Histograma de frecuencia gradiente óptimo mes 2



Media Aritmética 16,20

En el Mes 2 de estudio se observó que en 28 días de análisis que corresponden al 93.3%, se tuvo un promedio de 16 s^{-1} como Gradiente óptimo, oscilando en un rango de 15 a 17 s^{-1} . Y que para los 30 días de análisis se obtuvo un promedio de 16.2 s^{-1} como gradiente óptimo. Este resultado de gradiente óptimo infiere que el tipo de floculador debe ser Mecánico según la tabla 3-2 (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000).

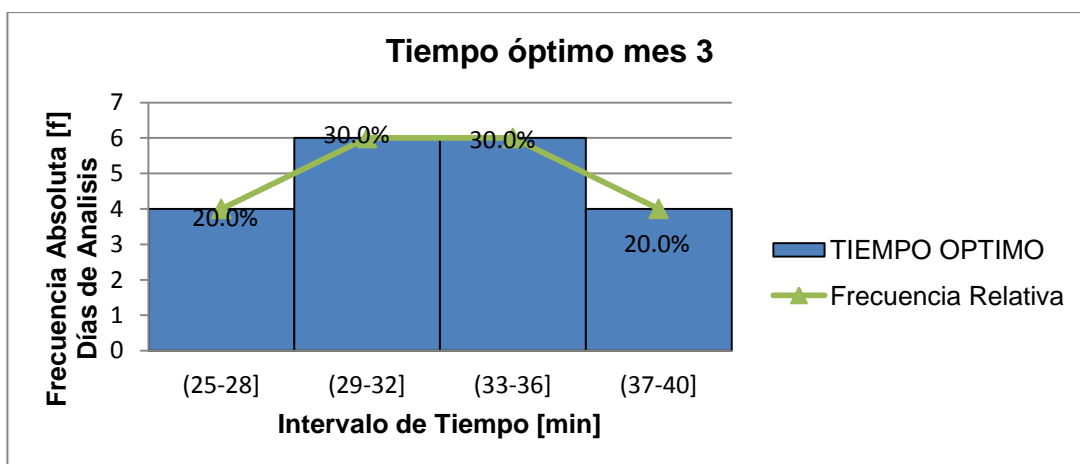
4.2.5 Tiempo óptimo de floculación Mes 3

Rango	R	16
Clase	K	4
Intervalo	I	4

Tabla 4- 6 Distribución de frecuencia tiempo óptimo de floculación mes 3

LI	LS	x	f	fr	fa	far	μ	$f\mu$
25	28	26,5	4	20,0%	4	20,0%	-2	-8
29	32	30,5	6	30,0%	10	50,00%	-1	-6
33	36	34,5	6	30,0%	16	80,00%	0	0
37	40	38,5	4	20,0%	20	100,00%	1	4
			20	100%				-10

Gráfico 4- 5 Histograma de frecuencia T óptimo mes 3



Media aritmética 32,50

En el mes 3 de estudio se observó que en 20 días corresponden al 66%, se tuvo un promedio de 32.5 minutos como tiempo óptimo, oscilando en un rango de 29 a 36 minutos. De acuerdo a la tabla 3-2 (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000) estos resultados se ajustan a floculadores tipo Alabama o Mecánico.

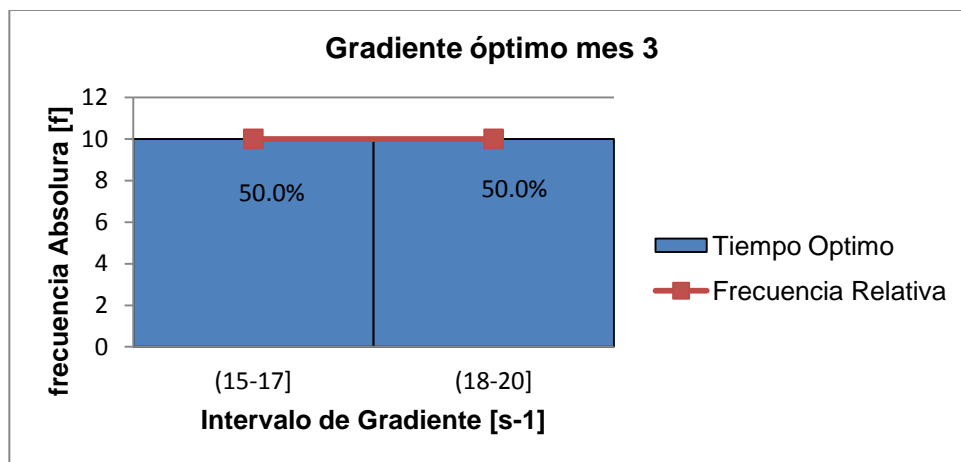
4.2.6 Gradiente óptimo de floculación Mes 3

Rango	R	6
Clase	K	2
Intervalo	I	3

Tabla 4- 7 Distribución de frecuencia Gradiente óptimo mes 3

LI	LS	x	f	fr	fa	far	μ	$f\mu$
15	17	16,0	10	50,0%	10	50,0%	-1	-10
18	20	19,0	10	50,0%	20	100,00%	0	0
			20	100,0%				-10

Gráfico 4- 6 Histograma de frecuencia gradiente óptimo mes 3



Media aritmética: 17,50

Para los 30 días de análisis se obtuvo un promedio de 17.5 [s-1] como gradiente óptimo, lo cual indica que el comportamiento promedio se ajusta a un floculador mecánico, tabla 3-2 (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000).

Las 90 pruebas de tratabilidad realizadas al Rio Oro indicaron que existe una alta variabilidad de turbiedad, color y pH, para un promedio de temperatura de 15 °C, es decir que para estas condiciones se puede implementar el uso de floculadores mecánicos (Arboleda, 2008). Adicionalmente, la determinación del tiempo óptimo de floculación arrojó un valor promedio de 32 minutos, tiempo que se encuentra dentro del rango del RAS para floculadores Mecánicos y Alabama, reforzando la elección del tipo de floculador.

No obstante lo concluido, el diseño de una planta debe considerar factores de infraestructura como disponibilidad energética y costos de operación para la implementación de floculadores mecánicos.

Como resultado general de este análisis se encontró que el gradiente óptimo está en el rango 15 a 30 s⁻¹ con un promedio de 18 s⁻¹, pero se debe destacar el hecho que durante el estudio no se tuvieron valores de turbiedad significativamente altas, dado que el 79% de los datos de turbiedad de agua cruda estuvieron comprendidos en el rango 1 a 60 UNT, razón por la cual no se pudo verificar la funcionalidad de este gradiente para valores altos de turbiedad. En consecuencia se hace necesario continuar o ampliar este estudio en un periodo de tiempo invernal, ya que en este trabajo el tiempo climático fue predominantemente seco aunque se tuvieron algunas lluvias aisladas. No obstante, el valor promedio de 18 s⁻¹, sugiere el uso de floculadores mecánicos considerando las restricciones antes mencionadas (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000)

4.3 Pruebas de pH óptimo

4.3.1 Pruebas de pH óptimo con H₂SO₄ 1 N (0.5 mol/l) y NaOH 0.1 N (0.1 mol/l)

En la tabla 4-8 se concentran los resultados de 26 pruebas de pH óptimo. El intervalo del pH se ajustó por debajo del pH inicial del agua con H₂SO₄ 1 N y por encima con NaOH 0.1 N (0.1 mol/l). Para el ajuste de pH se usaron reactivos marca Merck con purezas del 99.98%.

Los datos consignados en la columna CONDICIONES AGUA CLARIFICADA corresponden a las propiedades residuales de mejor comportamiento respecto al estándar de calidad de Turbiedad menor a 2 UNT y color menor a 15 UPC (Ministerio de Protección, 2007).

Tabla 4- 8 Resultados pH óptimo con H₂SO₄ 1 N y NaOH 0.1 N

DATO	CONDICIONES AGUA CRUDA		INTERVALO DE pH ÓPTIMO.			CONDICIONES AGUA CLARIFICADA (propiedades residuales)	
			INFERIOR	MEDIO	SUPERIOR		
				Condiciones normales del agua cruda			
TURBIEDAD	COLOR	pH			TURBIEDAD	COLOR	
1	2,75	50	5,91	7,44	9,03	1,98	20
2	5,46	170	5,62	7,19	10,75	3,05	20
3	17,7	140	6,23	7,21	8,17	4,8	40
4	8,3	40	5,41	7,22	9,47	3,45	10
5	33,1	220	6,4	7,36	8,85	2,83	10
6	3,82	60	6,41	7,28	8,43	2,89	30
7	24,2	140	5,35	7,32	8,03	3,9	50
8	48,1	330	6	7,67	8,97	2,33	30
9	5,09	30	6,55	7,42	8,73	1,61	30
10	1,96	20	5,01	7,5	8,48	1,41	8

11	122	600	6,29	7,53	□9	2,86	30
12	61,3	330	6,55	7,36	□9	2,22	30
13	2,89	40	6,59	7,48	8,43	1,87	30
14	2,2	30	6,55	7,56	8,29	1,53	10
15	156	960	6,26	7,19	□9	2,47	30
16	81,3	500	6,33	7,17	8,25	2,65	50
17	3,89	50	6,64	7,47	8,59	3,32	20
18	2,99	30	6,47	7,41	8,78	2,07	20
19	174	840	6,27	7,45	8,84	2,39	40
20	43,2	250	6,38	7,47	8,51	3,56	10
21	86,7	560	6,43	7,3	□9	3,52	40
22	16,9	130	6,7	7,57	8,89	4,59	30
23	11,7	160	6,15	7,1	8,57	5,22	80
24	11,6	90	6,31	7,39	8,69	2,89	20
25	92,5	600	6,57	7,32	8,86	6,08	30
26	43,3	290	□6	7,43	8,39	2,88	30

En la pruebas de pH óptimo realizadas con H_2SO_4 1 N y NaOH 0.1 N se concluyó que usando policloruro de aluminio como coagulante, no se requiere ajuste de pH dado que las mejores condiciones residuales fueron siempre para la muestra de agua original; es decir que el coagulante PAC presentó un excelente desempeño en un amplio rango de pH de agua cruda comprendido entre 6.4 y 8.7. Agua con pH fuera de este rango no presentó una buena coagulación-floculación.

De igual forma se pudo verificar la sensibilidad del proceso de coagulación-Floculación ante variaciones del rango de pH mencionado y frente a turbiedades por encima de 30 UNT, bajo las cuales los resultados del agua clarificada se alejan más del estándar de calidad. Para cada agua existe su rango de pH óptimo, el cual es función del tipo de coagulante a ser utilizado y de la naturaleza del agua a tratar, de ahí lo trascendental de la dosis óptima de coagulante. Si la coagulación se realiza fuera del rango de pH óptimo entonces se debe aumentar la cantidad del coagulante (Cárdenas, 2000).

En la tabla 4-9 se establece una comparación de los valores promedio obtenidos de color turbiedad y pH frente a los valores aceptables para el agua apta para consumo humano (Ministerio de Protección, 2007)

Tabla 4- 9 Comparación resultados promedio frente a la Resolución 2115/2007

CARACTERISTICAS FISICAS	EXPRESADAS COMO	VALOR MAXIMO ACEPTABLE RESOLUCION 2115/2007	VALORES PROMEDIO PRUEBAS DE pH OPTIMO
Color aparente	Unidades de Platino Cobalto (UPC)	15	28,77
Turbiedad	Unidades Nefelométricas de turbiedad (NTU)	2	3,01
Potencial de Hidrógeno pH		6,5>pH<9,0	7,38

La comparación de los resultados respecto a la Resolución 2115 de 2007 muestra que las características residuales se alejan del valor de referencia, lo cual se debe a se analizaron muestras de agua sedimentada y no filtrada, lo cual no descalifica la prueba y sus resultados, pues la referencia se establece en agua filtrada.

4.3.2 Pruebas de pH óptimo con Cal

En el tercer mes de estudio se efectuaron pruebas de pH óptimo con Cal, dado que este es el insumo químico habitualmente usado en las plantas de Empocaldas para ajustar el pH de agua cruda al inicio del proceso. Para las pruebas de laboratorio se preparó una solución conocida al 2% considerando las especificaciones técnicas de la cal industrial.

Para establecer una comparación entre el tratamiento de un agua básica con una agua acida se realizaron en paralelo pruebas acidificando el agua con H_2SO_4 1 N.

Los resultados de estas pruebas de pH se presentan en la tabla 4-11, en donde se indican las condiciones del agua cruda para pH, turbiedad y color; en la columna "ADICION DE CAL O H_2SO_4 1 N" se indica el volumen adicionado de la base o el ácido para modificar el pH; y las condiciones residuales de pH, turbiedad, color e índice de Wilcomb se presentan en la columna "CONDICIONES AGUA CLARIFICADA"

Datos de Cal hidratada industrial:

MARCA: PROCECAL (Cal Viva Hidratada).

Tabla 4- 10 Especificaciones técnicas Cal

Especificación	MÍNIMA	MÁXIMA
CaO	65 %	72 %
Ca(OH) ₂	85 %	95%
Granulometría	Malla 200	Malla 325.

Tabla 4- 11 Pruebas pH óptimo con Cal

DATO	CONDICIONES AGUA CRUDA			ADICION DE CAL O H ₂ SO ₄ 1 N	pH [pH] MODIFICADO	CONDICIONES AGUA CLARIFICADA (PROPIEDADES RESIDUALES)		
	Turbiedad [NTU]	Color [PCU]	pH [pH]			Turbiedad [NTU]	Color [PCU]	INDICE WILLCOMB
1	8,76	80	7,5	Sin aditivos	7,5	3,5	30	6
				CAL 3 ml al 2%	8,13	3,27	30	6
				CAL 4 ml al 2%	8,42	2,65	30	6
				[H ₂ SO ₄] 0,5 ml	6,55	4,77	50	4
				[H ₂ SO ₄] 1 ml	5,58	6,12	70	2
2	6,1	70	7,48	Sin aditivos	7,48	3,74	40	6
				CAL 3 ml al 2%	8,17	2,38	30	6
				CAL 4 ml al 2%	8,66	2,47	30	6
				[H ₂ SO ₄] 0,5 ml	6,37	4,8	50	4
				[H ₂ SO ₄] 1 ml	5,89	4,95	60	4
3	60,4	270	7,67	Sin aditivos	7,67	5,52	40	6
				CAL 3 ml al 2%	8,05	2,75	20	6
				CAL 4 ml al 2%	8,4	2,3	20	8
				[H ₂ SO ₄] 0,5 ml	6,37	4,4	40	6
				[H ₂ SO ₄] 1 ml	4,12	7,28	70	4
4	15,7	100	7,83	Sin aditivos	7,83	3,11	30	6
				CAL 3 ml al 2%	8,14	2,2	20	6

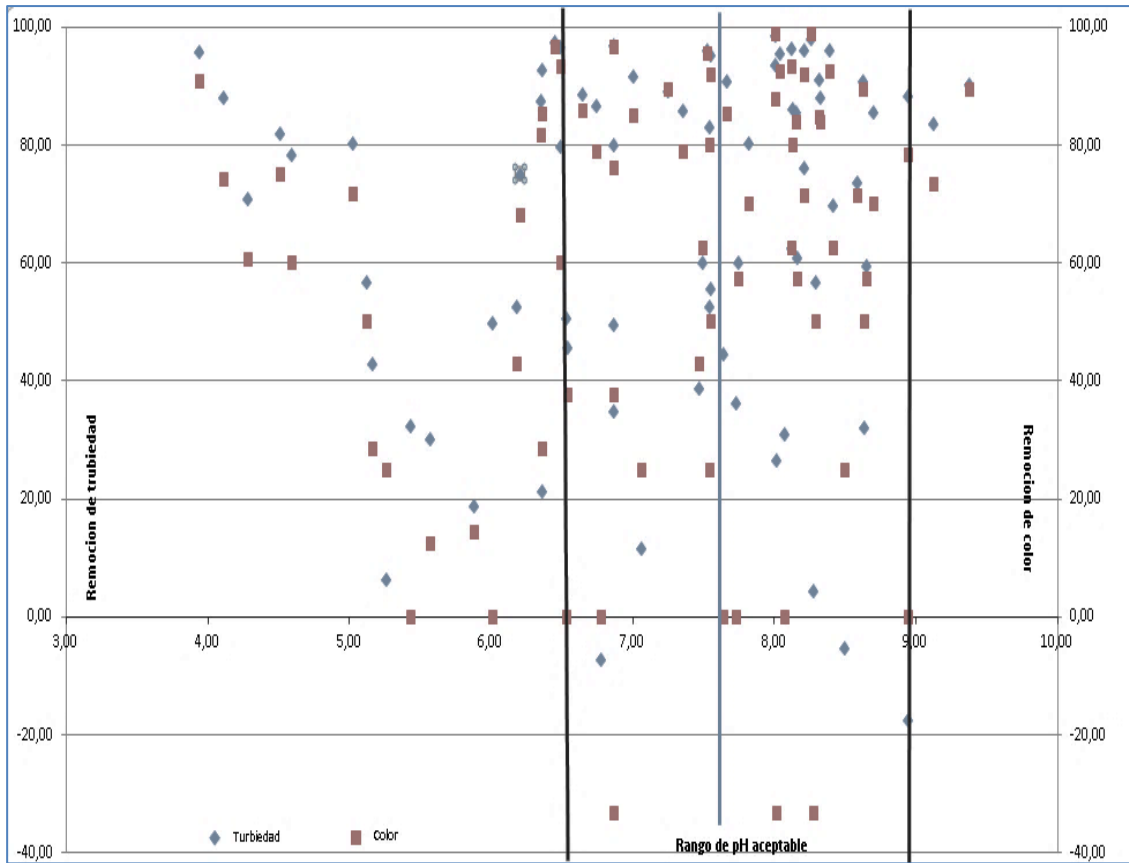
				CAL 5 ml al 2%	8,71	2,28	30	6
				[H2SO4] 0,5 ml	6,5	3,17	40	6
				[H2SO4] 1 ml	4,6	3,41	40	4
5	7,55	40	7,21	Sin aditivos	7,55	3,59	30	4
				CAL 5 ml al 2%	7,74	4,81	40	4
				CAL 7 ml al 2%	8,08	5,22	40	2
				[H2SO4] 0,5 ml	6,54	3,73	40	4
				[H2SO4] 1 ml	6,02	3,78	40	2
6	168	880	7,56	Sin aditivos	7,56	7,92	70	6
				CAL 4 ml al 2%	8,13	6,17	60	6
				CAL 5 ml al 2%	8,22	6,44	70	6
				[H2SO4] 0,5 ml	6,5	5,84	60	6
				[H2SO4] 1 ml	3,95	6,9	80	6
7	30,9	250	7,55	Sin aditivos	7,55	5,23	50	6
				CAL 3 ml al 2%	8,16	4,47	40	8
				CAL 4 ml al 2%	8,33	3,72	40	8
				[H2SO4] 0,5 ml	6,87	6,14	60	6
				[H2SO4] 1 ml	6,21	7,76	80	6
8	4,2	30	7,65	Sin aditivos	7,65	2,33	30	4
				CAL 3 ml al 2%	8,02	3,09	40	4
				CAL 4 ml al 2%	8,28	4,02	40	4
				[H2SO4] 0,5 ml	6,87	2,74	40	4
				[H2SO4] 1 ml	5,44	2,84	30	4
9	45,5	330	7,36	Sin aditivos	7,36	6,49	70	6
				CAL 3 ml al 2%	8,01	2,88	40	8
				CAL 4 ml al 2%	8,32	4,1	50	8
				[H2SO4] 0,5 ml	6,75	6,1	70	6
				[H2SO4] 1 ml	4,29	13,2	130	4
10	8,38	70	7,75	Sin aditivos	7,75	3,34	30	4
				CAL 3 ml al 2%	8,22	2,01	20	4
				CAL 4 ml al 2%	8,59	2,21	20	4
				[H2SO4] 0,5 ml	6,19	3,97	40	2
				[H2SO4] 1 ml	5,17	4,78	50	2
11	10,1	80	7,56	Sin aditivos	7,56	4,48	40	6
				CAL 3 ml al 2%	8,3	4,38	40	6
				CAL 4 ml al 2%	8,64	6,87	40	4

				[H2SO4] 0,5 ml	6,87	5,1	50	2
				[H2SO4] 0,9 ml	5,13	4,38	40	4
12	210	880	7,53	Sin aditivos	7,53	8,1	40	8
				CAL 4 ml al 2%	8,01	3,25	10	8
				CAL 5 ml al 2%	8,27	4,16	10	8
				[H2SO4] 0,5 ml	6,87	6,36	30	8
				[H2SO4] 0,9 ml	6,46	5,28	30	8
13	2,1	40	7,07	Sin aditivos	7,07	1,86	30	4
				CAL 2 ml al 2%	8,95	2,47	40	2
				CAL 1 ml al 2%	8,5	2,21	30	2
				[H2SO4] 0,5 ml	6,78	2,25	40	2
				[H2SO4] 0,9 ml	5,27	1,97	30	4
14	44,1	280	7,26	Sin aditivos	7,26	4,75	30	6
				CAL 3 ml al 2%	9,38	4,28	30	6
				CAL 1 ml al 2%	8,63	4,06	30	8
				[H2SO4] 0,5 ml	6,65	5,02	40	6
				[H2SO4] 0,9 ml	4,52	7,94	70	4
15	108	600	7,01	Sin aditivos	7,01	9,09	90	6
				CAL 2 ml al 2%	9,13	17,6	160	4
				CAL 1 ml al 2%	8,95	12,5	130	4
				[H2SO4] 0,5 ml	6,36	13,6	110	4
				[H2SO4] 0,9 ml	5,03	21,4	170	4

El rango del pH del agua cruda para estas 15 pruebas estuvo entre 7,01 y 7,83, las mayores remociones de turbiedad corresponden a las muestras de agua con pH modificado con Cal.

En la figura 4-1 se muestra el comportamiento de las remociones de la turbiedad (marcador azul) y del color (marcador rojo) en los ejes Y y del pH en el eje X. Se observa que para pH entre el rango 8.0 y 9.0 las remociones de color y turbiedad son mayores al 80%, no obstante considerando que una mayor remocion no necesariamente indica una mayor eficiencia del proceso (Rios, 1998).

Figura 4- 1 Comportamiento de las remociones de turbiedad y color frente al pH



4.3.3 Observaciones de las pruebas de pH con Cal

En las figuras 4-2 a la 4-16 se explica cómo fue el comportamiento del floc de acuerdo al ph modificado de la muestra en cada jarra.

El resumen de estas observaciones se presenta en la tabla 4-27.

Figura 4- 2 Montaje Jar Test pH óptimo con Cal. Dato No. 1



Condiciones Agua Cruda - Preparada

Condiciones Agua Clarificada

La jarra 1 corresponde a agua no modificada en su pH, las jarras 2, 3 y 4 corresponden a agua dosificada con cal al 2% con 2, 3 y 4 ml de la solución respectivamente. Por último las jarras 5 y 6 contienen ácido sulfúrico con 0,5 y 0,9 ml. Se observó que durante el proceso de floculación el agua con CAL formo floc más rápido y consistente.

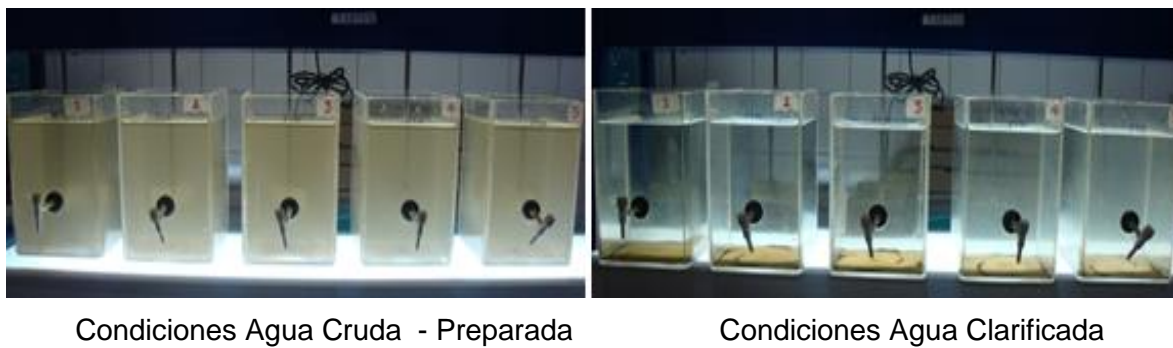
Figura 4- 3 Montaje Jar Test pH óptimo con Cal Dato No. 2



La jarra 1 corresponde a agua no modificada en su pH, las jarras 2 y 3 corresponden a agua dosificada con cal al 2% con 3 y 4 ml de la solución respectivamente. Por último las jarras 5 y 6 contienen ácido sulfúrico con 0,5 y 0,9 ml.

Se observó que durante el proceso de floculación el agua con CAL formo floc más rápido y consistente.

Figura 4- 4 Montaje Jar Test pH óptimo con Cal. Dato No. 3



La jarra 1 corresponde a agua no modificada en su pH, las jarras 2 y 3 corresponden a agua dosificada con cal al 2% con 3 y 4 ml de la solución respectivamente. Por último las jarras 3 y 4 contienen ácido sulfúrico con 0,5 y 1 ml.

Se observó que durante el proceso de floculación el agua con CAL formo floc más rápido y consistente.

Figura 4- 5 Montaje Jar Test pH óptimo con Cal. Dato No. 4



Condiciones Agua Cruda - Preparada

Condiciones Agua Clarificada

La jarra 1 corresponde a agua no modificada en su pH, las jarras 2 y 3 corresponden a agua dosificada con cal al 2% con 3 y 5 ml de la solución respectivamente. Por último las jarras 5 y 6 contienen ácido sulfúrico con 0,5 y 1 ml.

Se observó que durante el proceso con floculación el agua con CAL formo floc más rápido y consistente.

Figura 4- 6 Montaje Jar Test pH óptimo con Cal. Dato No. 5



Condiciones Agua Cruda - Preparada

Condiciones Agua Clarificada

La jarra 1 corresponde a agua no modificada en su pH, las jarras 2 y 3 corresponden a agua dosificada con cal al 2% con 5 y 7 ml de la solución respectivamente. Por último las jarras 4 y 5 contienen ácido sulfúrico con 0,5 y 1 ml.

Se observó que las mejores condiciones de tratabilidad las obtuvo el agua sin ser tratada.

Figura 4- 7 Montaje Jar Test pH óptimo con Cal No. 6



Condiciones Agua Cruda - Preparada

Condiciones Agua Clarificada

La jarra 1 corresponde a agua no modificada en su pH, las jarras 2 y 3 corresponden a agua dosificada con cal al 2% con 4 y 5 ml de la solución respectivamente. Por último las jarras 4 y 5 contienen ácido sulfúrico con 0,5 y 1 ml.

Se observó que las mejores condiciones de tratabilidad las obtuvieron bajo pH acidos, igual se conserva la tendencia que la Cal favorece el proceso de floculación.

Figura 4- 8 Montaje Jar Test pH óptimo con Cal No. 7



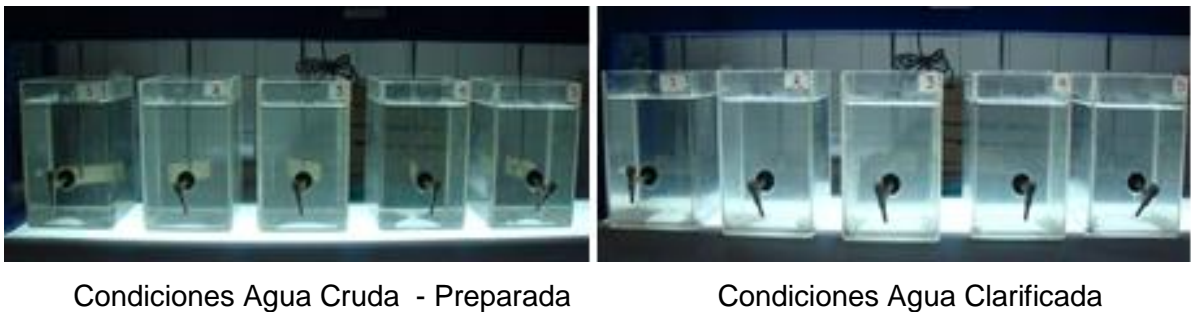
Condiciones Agua Cruda - Preparada

Condiciones Agua Clarificada

La jarra 1 corresponde a agua no modificada en su pH, las jarras 2 y 3 corresponden a agua dosificada con cal al 2% con 3 y 4 ml de la solución respectivamente. Por último las jarras 4 y 6 contienen ácido sulfúrico con 0,5 y 1 ml.

Se observó que las mejores condiciones de tratabilidad las obtuvo el agua tratada con CAL.

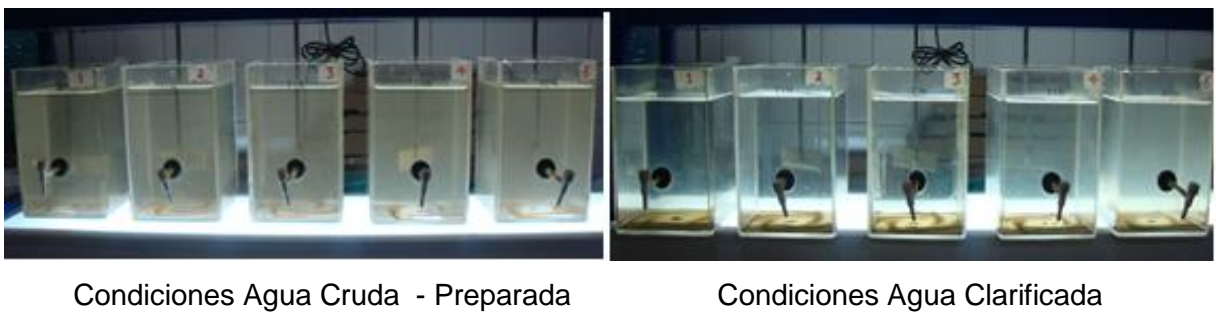
Figura 4- 9 Montaje Jar Test pH óptimo con Cal. Dato No. 8



La jarra 1 corresponde a agua no modificada en su pH, las jarras 2 y 3 corresponden a agua dosificada con cal al 2% con 3 y 4 ml de la solución respectivamente. Por último las jarras 4 y 5 contienen ácido sulfúrico con 0,5 y 1 ml.

Se observó que las mejores condiciones de tratabilidad las obtuvo el agua no tratada.

Figura 4- 10 Montaje Jar Test pH óptimo con Cal. Dato No. 9



La jarra 1 corresponde a agua no modificada en su pH, las jarras 2 y 3 corresponden a agua dosificada con cal al 2% con 3 y 4 ml de la solución respectivamente. Por último las jarras 4 y 6 contienen ácido sulfúrico con 0,5 y 1 ml.

Se observó que las mejores condiciones de tratabilidad las obtuvo el agua tratada con CAL, debido a la rápida formación de un floc más pesado.

Figura 4- 11 Montaje Jar Test pH óptimo con Cal. Dato No. 10



Condiciones Agua Cruda - Preparada

Condiciones Agua Clarificada

La jarra 1 corresponde a agua no modificada en su pH, las jarras 2 y 3 corresponden a agua dosificada con cal al 2% con 3 y 4 ml de la solución respectivamente. Por último las jarras 4 y 6 contienen ácido sulfúrico con 0,5 y 1 ml.

Se observó que las mejores condiciones de tratabilidad las obtuvo el agua tratada con CAL.

Figura 4- 12 Montaje Jar Test pH óptimo con Cal. Dato No. 11



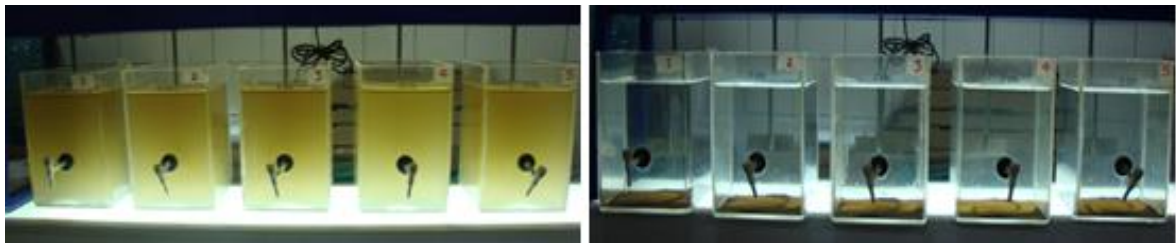
Condiciones Agua Cruda - Preparada

Condiciones Agua Clarificada

La jarra corresponde a agua no modificada en su pH, las jarras 2 y 3 corresponden a agua dosificada con cal al 2% con 3 y 4 ml de la solución respectivamente. Por último las jarras 4 y 6 contienen ácido sulfúrico con 0,5 y 1 ml.

Se observó que las mejores condiciones de tratabilidad las obtuvo el agua tratada con Cal, sin presentar mucha diferencia entre agua tratada y sin tratar.

Figura 4- 13 Montaje Jar Test pH óptimo con Cal. Dato No. 12



Condiciones Agua Cruda - Preparada

Condiciones Agua Clarificada

La jarra 1 corresponde a agua no modificada en su pH, las jarras 2 y 3 corresponden a agua dosificada con cal al 2% con 3 y 4 ml de la solución respectivamente. Por último las jarras 4 y 5 contienen ácido sulfúrico con 0,5 y 1 ml.

Se observó que las mejores condiciones de tratabilidad las obtuvo el agua tratada con CAL.

Figura 4- 14 Montaje Jar Test pH óptimo con Cal. Dato No. 13



Condiciones Agua Cruda - Preparada

Condiciones Agua Clarificada

La jarra corresponde a agua no modificada en su pH, las jarras 2 y 3 corresponden a agua dosificada con cal al 2% con 3 y 4 ml de la solución respectivamente. Por último las jarras 4 y 5 contienen ácido sulfúrico con 0,5 y 1 ml.

Se observó que las mejores condiciones de tratabilidad las obtuvo el agua sin ser tratada.

Figura 4- 15 Montaje Jar Test pH óptimo con Cal. Dato No. 14



Condiciones Agua Cruda - Preparada

Condiciones Agua Clarificada

La jarra 1 corresponde a agua no modificada en su pH, las jarras 2 y 3 corresponden a agua dosificada con cal al 2% con 3 y 1 ml de la solución respectivamente. Por último las jarras 4 y 5 contienen ácido sulfúrico con 0,5 y 1 ml.

Se observó que las mejores condiciones de tratabilidad las obtuvo el agua tratada con Cal.

Figura 4- 16 Montaje Jar Test pH óptimo con Cal. Dato No. 15



Condiciones Agua Cruda - Preparada

Condiciones Agua Clarificada

La jarra 1 corresponde a agua no modificada en su pH, las jarras 2 y 3 corresponden a agua dosificada con cal al 2% con 2 y 1 ml de la solución respectivamente. Por último las jarras 4 y 6 contienen ácido sulfúrico con 0,5 y 1 ml.

Se observó que las mejores condiciones de tratabilidad las obtuvo el agua sin ser tratada.

Tabla 4- 12 Compilación resultados observaciones de la prueba de pH óptimo con CAL al 2%

PRUEBA	MEJOR FORMACION DE FLOC
1	pH modificado con Cal
2	pH modificado con Cal
3	pH modificado con Cal
4	pH modificado con Cal
5	pH agua cruda
6	pH modificado con H ₂ SO ₄
7	pH modificado con Cal
8	pH agua cruda
9	pH modificado con Cal
10	pH modificado con Cal
11	pH modificado con Cal
12	pH modificado con Cal
13	pH agua cruda
14	pH modificado con Cal
15	pH agua cruda

De las pruebas de pH con Cal se concluye que en el 67% de las pruebas realizadas la adición de Cal favorece la remoción de color y turbiedad usando el PAC como coagulante y en el 27% de las pruebas no fue necesaria la adición de Cal para obtener buenas remociones de color y turbiedad.

Estos resultados indican que la Cal favorece el proceso de coagulación floculación incidiendo en la remoción de color y turbiedad, pero se deja claro que la implementación de esta conclusión a nivel de planta requiere ampliar el número de pruebas, sobre todo aplicadas a aguas crudas con altas turbiedades y adicionalmente realizar un estudio de costo beneficio. Así mismo en este análisis no se ha profundizado en la incidencia del pH en la remoción del color (Rios, 1998), ni en la relación de la dosis de coagulante con la

remoción de color y turbiedad; y con la alcalinidad que juega un papel fundamental en el proceso de coagulación y floculación (López, 2006)

4.3 Evaluación eficiencia del proceso

Para evaluar la eficiencia del proceso de tratamiento, simulado en las pruebas de jarras bajo las condiciones óptimas, respecto a los parámetros turbiedad, color y aluminio residual, se procedió de la siguiente forma:

En la Tabla 4-28 se comparó el promedio de los primeros 30 datos experimentales correspondientes al color y turbiedad para el agua clarificada frente a los valores admitidos por la Resolución 2115 de 2007 muestra.

Para las siguientes 60 pruebas a partir del segundo mes, se realizaron gráficos de control para los resultados de Color, Aluminio y turbiedad obtenidos del agua clarificada y filtrada frente a los valores admitidos por la Resolución 2115 de 2007. Estos resultados se presentan en las figuras 4-17 a 4-22.

Tabla 4- 13 Eficiencia color, turbiedad y pH

Características Físicas	Expresados como	Valor máximo aceptable Res. 2115/2007	Valores Promedios agua clarificada
Color aparente	Unidades de Platino Cobalto (UPC)	15	28.20
Turbiedad	Unidades Nefelométricas de turbiedad (UNT)	2	3.34
pH	Potencial de Hidrógeno	$6,5 \geq \text{pH} \leq 9,0$	7.17

Los valores obtenidos para los parámetros, color y turbiedad se encuentran por fuera de la norma, pero tratándose de un agua clarificada estos valores se consideran aceptables,

pues la obtención de un agua apta para consumo humano requiere el proceso posterior de filtración que podría remover el color y la turbiedad hasta valores ajustados a la calidad del agua exigida.

El pH resultante se ajusta al rango aceptable por la normatividad, lo cual ratifica que el coagulante PAC dosificado de una manera correcta presenta un buen desempeño frente al pH del agua tratada.

Figura 4- 17 Gráfico control turbiedad mes 2

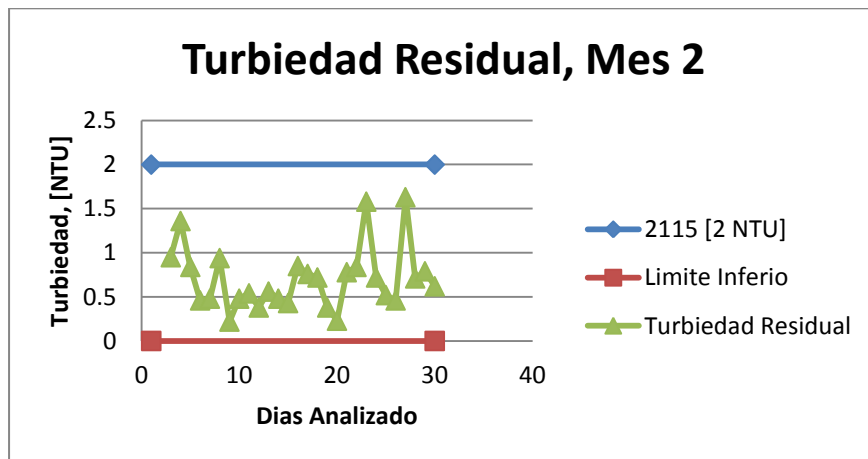


Figura 4- 18 Gráfico control Aluminio residual mes 2

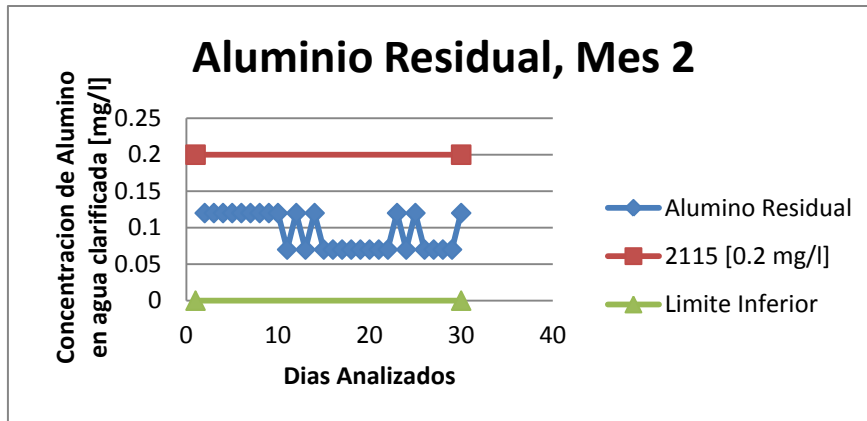


Figura 4- 19 Gráfico control Color mes 2

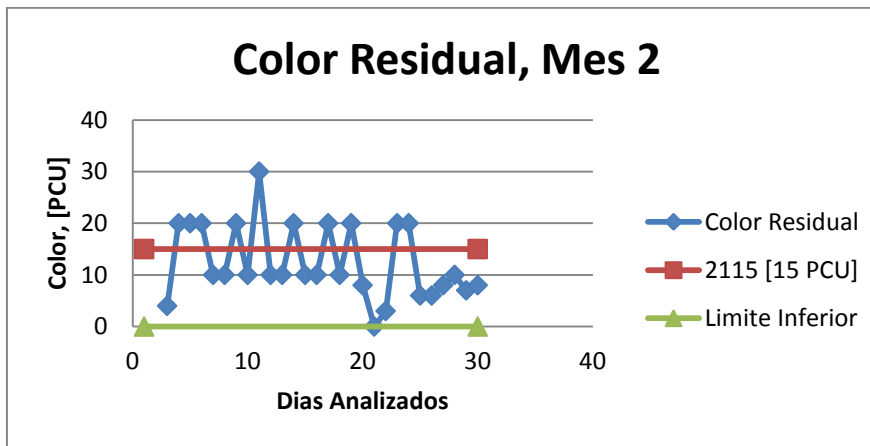


Figura 4- 20 Gráfico control turbiedad mes 3

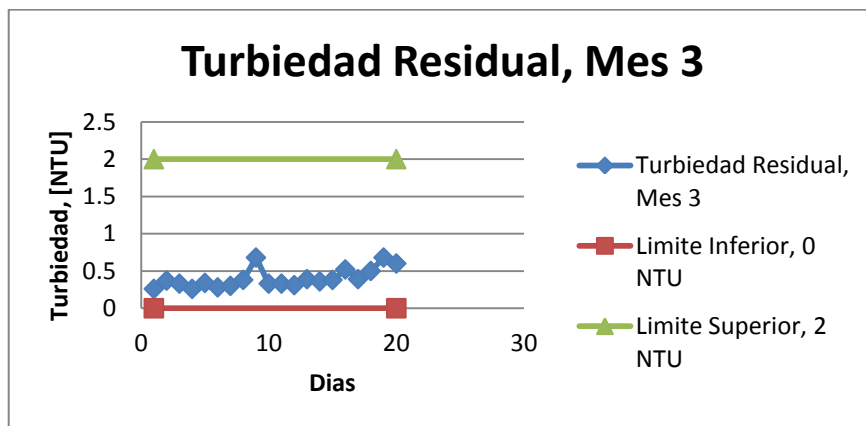


Figura 4- 21 Gráfico control Color mes 3

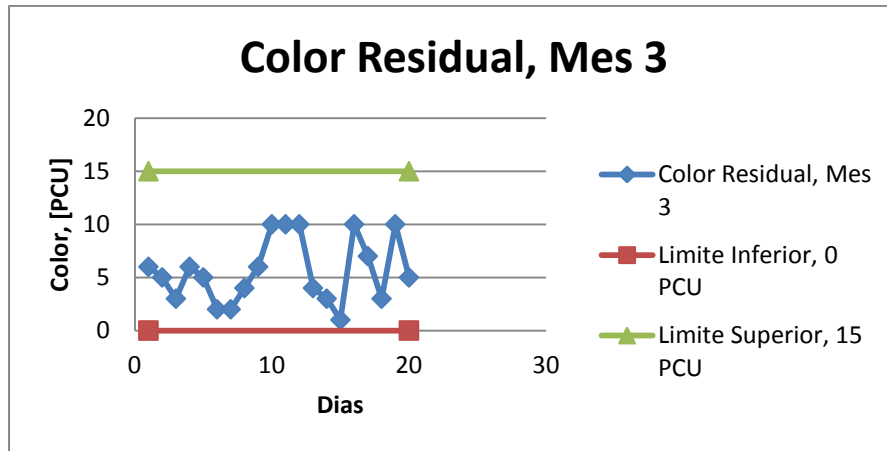
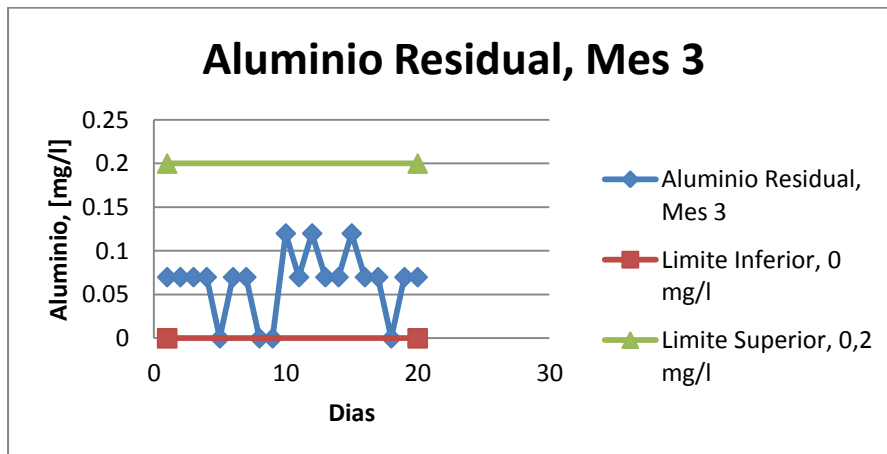


Figura 4- 22 Gráfico control Aluminio residual mes 3



Se observa en las gráficas de control que tanto el aluminio residual como la turbiedad estuvieron siempre ajustados a la Resolución 2115 d 2007 cumpliendo con la calidad del agua para consumo humano exigida.

Para el caso del parámetro color aproximadamente el 60% de los datos estuvieron ajustados a la normatividad.

Como resultado de esta evaluación de la eficiencia, se infiere que una correcta dosificación de coagulante garantiza la calidad del agua tratada, pues la clave del

proceso de potabilización está en la coagulación-floculación, la cual depende de una correcta dosificación de coagulante.

4.4 Pruebas de Velocidad de sedimentación crítica

Los datos experimentales de las 90 pruebas de velocidad de sedimentación crítica, así como las gráficas Curva “Velocidad de sedimentación Vs contra Concentración remanente C”, “Concentración remanente C contra Velocidad de sedimentación Vs” y “Eficiencia de sedimentación” se presentan en el Anexo B. Pruebas de Velocidad de sedimentación crítica.

Para realizar un análisis de la información, se construyó una tabla que contiene día a día los datos de carga versus remoción total, los cuales resultan de correr en el programa Scilab cada ecuación de las curvas “Eficiencia de sedimentación”. Estas tablas no se presentan en el cuerpo del trabajo, debido a su extensión pero hacen parte del Anexo B.

Se efectúa una filtración de datos para analizar solo las cargas comprendidas el rango 15 y 40 [$\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ d}$] rango correspondiente a sedimentadores y se organiza la información presentando todas las REMOCIONES POR AGRUPACIÓN DE CARGAS en la tabla B-4 y CARGAS Y RT POR DIA en la tabla B-5.

Con los datos de las tablas B-4 y B-5 se realizó un análisis en el paquete estadístico R-PROJECT según se muestra en las figuras 4-23 y 4-24.

De acuerdo la distribución de los datos se deduce que las cargas superficiales comprendidas en el rango 15 y 40 [$\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ d}$] tienen buenos porcentajes de remoción superiores al 80%, tal y como lo sugiere el RAS 2000 (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000)

Al momento del diseño el rango se debe delimitar aún más el rango a valores comprendidos entre 20 [$\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ d}$] y 30 [$\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ d}$], dado que para valores por debajo de 20 [$\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ d}$] los sedimentadores resultan muy grandes y para valores por encima de 30

[$\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ d}$] se recargan mucho los filtros (Pérez, 2002). Además se sugiere que al momento de determinar la Velocidad Crítica de diseño a través de la lectura de las gráficas experimentales se use el factor de seguridad de 1.3 tal y como se explicó anteriormente, así por ejemplo, para una carga superficial de 25 [$\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ d}$] leída en la curva experimental de eficiencia de sedimentación se obtiene una carga superficial de diseño de aproximadamente 17 [$\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ d}$] al aplicar el factor de seguridad, equivalente a una velocidad crítica de diseño de 0.019676 [cm/s].

Figura 4- 23 Comportamiento de la Remoción R_T por agrupación de cargas

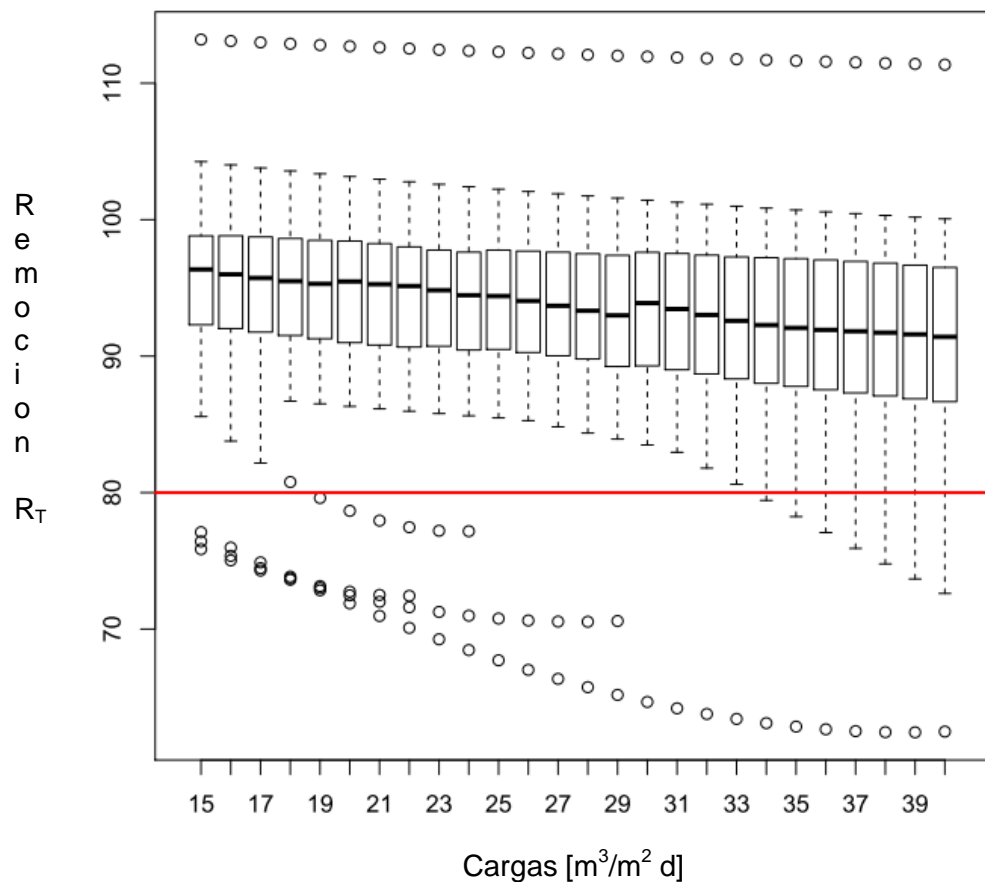
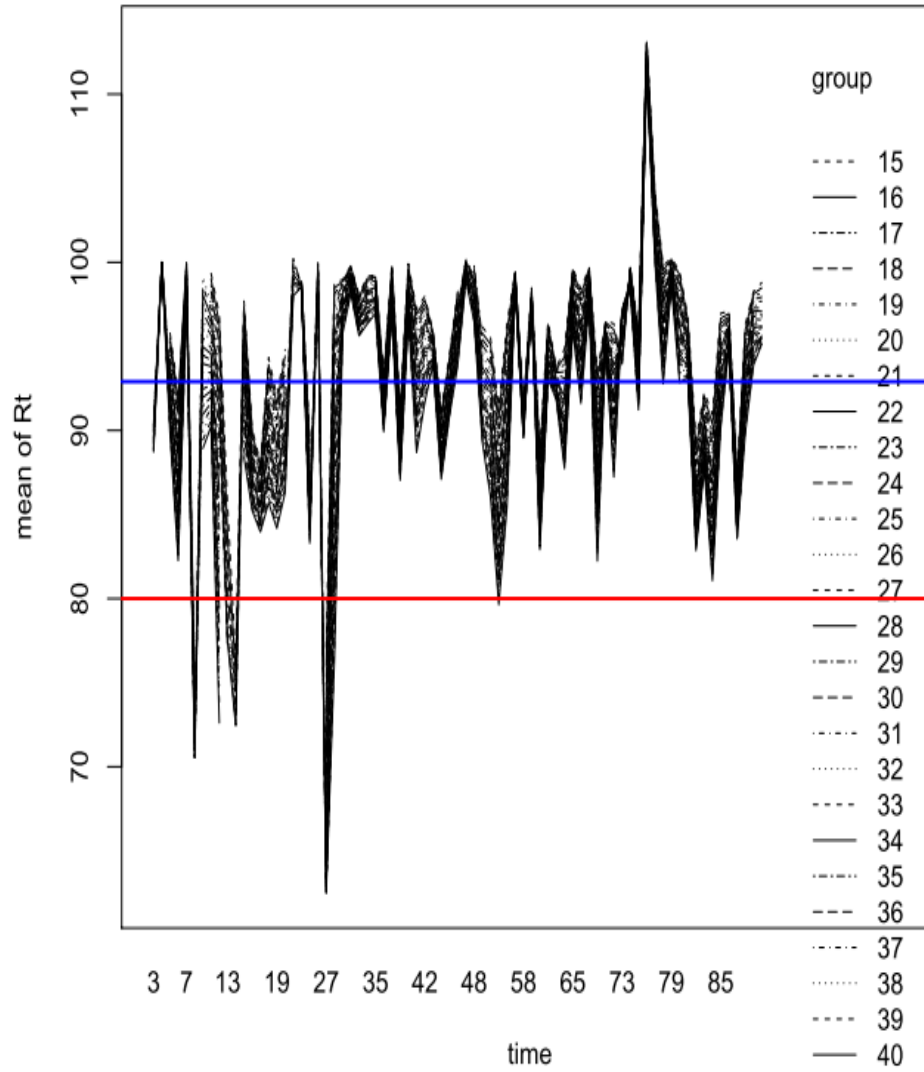


Figura 4- 24 Cargas por remociones R_T y por día

5. Conclusiones y recomendaciones

La operación rutinaria de una planta de tratamiento en Empocaldas genera gran cantidad de información y son los operadores de planta los responsables de tomar decisiones sobre el tratamiento, basados en la caracterización del agua cruda y tratada, en la disponibilidad de coagulantes y sobre todo en su experiencia personal.

De otro lado los ingenieros de diferentes disciplinas, con frecuencia basados en directrices teóricas, diseñan, rediseñan y optimizan los sistemas de tratamiento buscando mejorar la calidad del agua y la eficiencia del tratamiento.

Los dos escenarios presentados, pueden mejorarse mediante la realización de pruebas de tratabilidad, tal como sucedió con el presente estudio.

La investigación planteó como objetivo principal implementar una guía metodológica para determinar la velocidad de sedimentación crítica para el diseño de un sedimentador de agua potable aplicado al Acueducto Regional de Occidente, propósito que en su desarrollo implicó la obtención de otros importantes resultados relacionados con las condiciones óptimas de tratabilidad del Río Oro, y evaluar la incidencia del coagulante policloruro de aluminio PAC en el aluminio residual y pH del agua tratada, así como la incidencia de la Cal como ayudante de coagulación.

La comparación del método propuesto para calcular la velocidad de sedimentación crítica frente al método documentado en la literatura muestra diferencias significativas que parten del tratamiento matemático de la información; en primer lugar disponer la información (invertir ejes) para determinar un área bajo la curva mediante una integral y segundo resolver la integral mediante el método numérico de los trapecios valiéndose de un software que calcula n rectángulos acercándose al área real, representado esto un importante aporte metodológico al procedimiento tradicional.

CONCLUSIONES

- El diseño de unidades de un sistema de potabilización se puede basar en datos teóricos y esta investigación pudo determinar que las pruebas de tratabilidad y de velocidad de sedimentación crítica arrojaron datos y resultados ajustados a los criterios establecidos en el RAS 2000, pero debido a las características fisicoquímicas particulares de cada fuente es recomendable validar la base de cálculo teórica mediante estudios aplicados. Las 130 pruebas de tratabilidad aplicadas al Rio Oro arrojaron las condiciones óptimas de dosis, tiempo, pH y gradiente, indicando que un floculador tipo Alabama o Mecánico, sería la mejor alternativa de diseño para la nueva planta de tratamiento del Acueducto Regional de Occidente.
- Las pruebas para verificar la incidencia del coagulante policloruro de aluminio PAC en el aluminio residual y pH del agua tratada, demostraron que en todas las pruebas de jarras sometidas a la dosis óptima de coagulante no se presentaron valores de aluminio residual por encima de 0.2 mg/l, ni tampoco valores de pH por fuera del rango establecido en la Resolución 2115 de 2007, lo cual indica que a nivel de las plantas de

Anserma y Risaralda existe un problema en la dosificación asociado o no al factor humano y que se refleja en la calidad del agua suministrada.

- La verificación del mejor desempeño del Policloruro de Aluminio PAC asociado a la adición de Cal al agua cruda en el tratamiento del agua del Rio Oro, quedó demostrado, aunque los resultados sin adición de cal también reflejaron condiciones de agua clarificada satisfactorias, por lo cual no es concluyente el uso de cal como ayudante de coagulación en el Rio Oro y se requiere más trabajo de laboratorio abarcando mayores valores de turbiedad, adicionalmente de un estudio de costo beneficio.

- El rango del pH del agua cruda para 15 pruebas estuvo entre 7,01 y 7,83 y las mayores remociones corresponden a muestras de agua con pH modificado con Cal.

El resultado anterior, debe ser analizado a nivel de planta considerando ampliar el concepto de eficiencia del sedimentador (RÍOS, 1998), pues aunque la adición de cal para el tratamiento del Rio Oro es una práctica común del operador de planta de Empocaldas, éste no resulta concluyente, toda vez que las remociones de color y turbiedad también son altas para las condiciones de pH normales de la fuente.

En este punto también es importante resaltar que una prueba de jarras constituye una reproducción parcial del proceso y que inciden factores de orden físico y químico que toman relevancia cuando se evalúan a gran escala (De Vargas, 2004).

- El estudio de las relaciones entre la gran cantidad de variables que componen la calidad del agua requiere mayor desarrollo no solo de tipo analítico sino tecnológico que permita su medición en los diferentes estadios del agua en planta desde la entrada hasta la filtración. Se han desarrollado software comerciales muy específicos para el modelaje y estudio de las variables de calidad del agua que no permiten modificaciones aplicadas lo que hace necesario el perfeccionamiento de software de libre acceso (Alvarez, s.f.).

- Las pruebas de jarras se han usado tradicionalmente para guiar la dosificación de coagulantes en planta mediante una relación turbiedad vs. Dosis óptima, lo cual conlleva errores, pues la remoción de turbiedad mediante una adecuada dosis óptima no necesariamente garantiza una eficiente remoción de color, dado que éste parámetro está

estrechamente relacionado con el pH (López, 2006), y a su vez el pH con la alcalinidad (Andia, 2000).

- Mientras no se defina un modelo para establecer la relación entre color, turbiedad y dosis óptima de coagulante se recomienda siempre realizar pruebas de jarras para cada condición del agua cruda con el fin de evitar incorrecta dosificación de coagulante que conlleva a pérdidas económicas y por supuesto a problemas de calidad del agua (Acosta, 2006). Sería de gran interés el desarrollo de aplicaciones multidisciplinarias que permitan evaluar y tomar decisiones frente a la mejor forma de tratar el agua y lograr un agua segura para el consumo humano.
- La sedimentación de partículas es un proceso muy dependiente de la variación de la densidad del agua, la cual está determinada por la temperatura. De esta forma en un experimento, como el desarrollado, donde la variable temperatura no es controlada es probable que para una similar calidad del agua cruda, la dosis de coagulante sea diferente, incidiendo en la coagulación, en la formación del floc y por último en eficiencia de la sedimentación (Andia, 2000).

RECOMENDACIONES

- Posterior a este estudio se recomienda realizar ensayos a nivel de planta piloto para simular los procesos de una manera más cercana a la realidad, utilizando la fuente de abastecimiento seleccionada con un flujo continuo de entrada a la planta piloto. Además, sería conveniente realizar pruebas de tratabilidad en un periodo invernal ya que este estudio se desarrolló en un tiempo predominantemente seco.

- López (2006) deja abierta la posibilidad de plantearse una ecuación que relacione turbiedad del agua cruda y dosis de coagulante, y de esta forma sólo medir la turbiedad de entrada del agua para estimar la dosis de coagulante a aplicar, sin realizar un ensayo de jarras. Desarrollar esta idea basado en su estudio sería de gran ayuda para los sistemas de tratamiento de nuestro medio, pues ante la poca disponibilidad de recursos analíticos y tecnológicos para evaluar las diversas relaciones de variables que intervienen en la calidad del agua cruda y tratada, los operadores de planta dispondrían de un criterio rápido para definir una dosis óptima que garantice un agua segura para el consumo humano.

A. Anexo: Tablas de recolección de datos

Tabla A- 2 pH óptimo

DATO	CONDICIONES AGUA CRUDA			MUESTRA AGUA CRUDA ADICION DE ACIDO O BASE	pH [pH] MODIFICADO	% REMOCION TURBIEDAD	% REMOCION COLOR
	Turbiedad [NTU]	Color [PCU]	pH [pH]				
1				Sin aditivos			
				CAL 3 ml al 2%			
				CAL 4 ml al 2%			
				[H2SO4] 0,5 ml			
				[H2SO4] 1 ml			
2				Sin aditivos			
				CAL 3 ml al 2%			
				CAL 4 ml al 2%			
				[H2SO4] 0,5 ml			
				[H2SO4] 1 ml			
3				Sin aditivos			
				CAL 3 ml al 2%			
				CAL 4 ml al 2%			
				[H2SO4] 0,5 ml			
				[H2SO4] 1 ml			
4				Sin aditivos			
				CAL 3 ml al 2%			
				CAL 4 ml al 2%			
				[H2SO4] 0,5 ml			
				[H2SO4] 1 ml			
5				Sin aditivos			
				CAL 3 ml al 2%			
				CAL 4 ml al 2%			
				[H2SO4] 0,5 ml			
				[H2SO4] 1 ml			

B. Anexo: Pruebas de velocidad de sedimentación crítica (Archivo digital)

Bibliografía

ACOSTA, Lorenzo. Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación – floculación. Redalib. 2007. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, vol. XL, núm. 2, mayo-agosto, 2006, pp. 10-17.

ALVAREZ, R. Et ál. Análisis multivariante de la línea de agua en planta potabilizadora (ETAP) de Lardero (Logroño). Virtual PRO, 2007. {En línea}. {Consultado el 1-06-2014}. Disponible en <http://www.revistavirtualpro.com/descarga/analisis-multivariante-de-la-linea-de-agua-en-la-planta-potabilizadora-etap-de-lardero-logrono->. (s.f).

ANDÍA CÁRDENAS, Yolanda. Tratamiento de agua. Coagulación y floculación. Evaluación de Plantas y Desarrollo Tecnológico. SEDAPAL, Peru, 2000. {En línea}. {Consultado el 28-01-2014}. Disponible en <http://www.frm.utn.edu.ar/archivos/civil/Sanitaria/Coagulaci%C3%B3n%20y%20Floculaci%C3%B3n%20del%20Agua%20Potable.pdf>.

APHA, AWWA, WPCF. Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater, 21 th ed., 2011.

ARBOLEDA VALENCIA, J. Teoría y práctica de la purificación del agua. Editorial Mc Graw Hill. Tercera edición, 2008.

BARRENECHEA A. Coagulación. En Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría tomo 1. CEPIS Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente CEPIS, Lima, 2004. 306 p.

BLACK, A. P.; CHRISTMAN, R. F. Chemical characteristics of fulvic acids. Journal of the American Water Works Association, 1963. p. 5. 1963.

CASAS REYES, J. Coagulación-Floculación. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Sede Bogotá. Primera edición, 1992.

CASTRO DE ESPARZA M. Parámetros físico-químicos que influyen en la calidad y en el tratamiento del agua. Curso Taller sobre control de calidad analítica Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente CEPIS, Lima, 1987.

DE VARGAS L. Criterios para la selección de los procesos y de los parámetros óptimos de las unidades. En Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría tomo II. CEPIS Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Lima, 2004. 217 p.

DIVISIÓN DEL DESARROLLO SOSTENIBLE. ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS. Agenda 21. Capítulo 28. Sección II. 1992. {En línea} {Consultado el 03-02-2012}. Disponible en (<http://www.un.org/spanish/esa/sustdev/agenda21/agenda21toc.htm>)

GRANADOS-CASTAÑO, N. Determinación de la dosis más efectiva de la mezcla de carbón activado en polvo con sulfato de aluminio líquido para la potabilización de agua en la Empresa Aguas y Aguas de Pereira. Tesis de grado. Universidad Tecnológica de Pereira. 2007.

ICONTEC. NTC 3903. Procedimiento para el ensayo de coagulación-floculación en un recipiente con agua o método de jarras. Norma Técnica Colombiana. Gestión Ambiental. Agua. Bogotá, 2001. p. 9-10.

LÓPEZ, J.; GONZÁLEZ, E.; BIANCHI, F.; LARREA, D.; REZZANO, N. La dualidad entre dosis óptima y calidad del agua bruta, en el proceso de floculación de aguas. Ponencia congreso interamericano de ingeniería sanitaria y ambiental. Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. 2006 {En línea}. {Consultado el 15-11-2011}. Disponible en (http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/uruguay30/UY02108_Lopez.pdf).

MACIAS QUIROGA, Iván Fernando. Informe de tratabilidad para determinación de velocidad de sedimentación crítica. Aguas de Manizales, 2012.

MALDONADO YACTAYO, Víctor. Sedimentación. En Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría tomo I. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente CEPIS, Lima, 2004. 63 p.

MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO. DIRECCIÓN DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS - 2000. Bogotá, Noviembre de 2000.

MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL, MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. Resolución número 2115. 2007. {en línea} {Consultado el 03-02-2012}. Disponible en (http://www.minambiente.gov.co/documentos/res_2115_220707.pdf. p. 3)

MONTOYA C. Et ál. Efecto del incremento en la turbiedad del agua cruda sobre la eficiencia de procesos convencionales de potabilización. Escuela de Ingeniería de Antioquia. Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 16, p. 137-148. Diciembre 2011, Medellín.

OMS Organización mundial de la salud. Guías para la calidad del agua potable. Primer apéndice a la tercera edición. Volumen 1 Recomendaciones. pág. 186. Versión electrónica para la Web. 2006.

PEREZ PARRA, J. Manual de potabilización del agua. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Sede Medellín. Tercera Edición, 2002.

TORRES P. Et ál. Índices de calidad de agua en fuentes superficiales Utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica. En Revista Ingenierías, Universidad de Medellín, 2009. Vol. 8, No. 15 especial, p. 79-94.

RÍOS PIGNATA, D. Utilización del parámetro "eficiencia" en remoción de turbiedad en sedimentadores. Ponencia Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 26 (AIDIS 98), Lima, 1-5 nov. 1998.

United States Environmental Protection Agency (USEPA). National primary drinking water regulations. 2006. [consultado el 22-025-2014]. Disponible en: <<http://www.epa.gov/EPA-WATER/2006/January/Day-05/w04c.htm>>

VALENTIN, Nicolas. Modelamiento de la dosis de coagulante en una planta de tratamiento de agua. Virtual PRO, 2007. . {En línea}. {Consultado el 30-05-2014}. Disponible en <http://www.revistavirtualpro.com/biblioteca/modelamiento-de-la-dosis-de-coagulante-en-una-planta-de-tratamiento-de-agua#sthash.bii17HT7.dpuf>.

VEGA-GUZMAN, J.; VILACRESES-ZAMBRANO, J. Estudio del fenómeno de sedimentación en el tratamiento del agua en tres casos de estudio. Tesis de Grado. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil, Ecuador, 2006.

WISNIEWSKI, E. Sedimentation tank design for rural communities in the hilly regions of Nepal. {En línea}. {Consultado el 12-11-2011}. Disponible en (<https://ewb.box.com/sedimentationtanknepal>).

World Water Day. {En línea}. {Consultado el 06-12-2011} Disponible en (<http://www.unwater.org/index.html>).

World Water Day. {En línea}. {Consultado el 11-12-2011}. Disponible en <http://www.unwater.org/index.html>

Wikipedia {En línea}. {Consultado el 14-05-2014}. Disponible en http://es.wikipedia.org/wiki/Ajuste_de_curvas