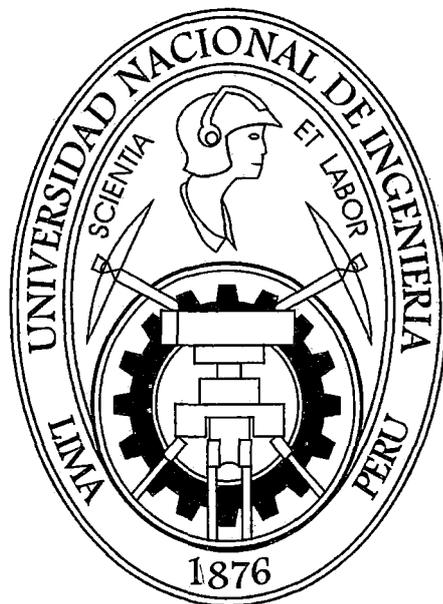


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

SECCION DE POSGRADO Y SEGUNDA ESPECIALIZACION



**“CONDICIÓN DE EQUÍLIBRIO HIDRÁULICO COMO
FACTOR DETERMINANTE PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL
MANTO DE LODOS DEL DECANTADOR PULSATOR”**

TESIS

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRO EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN:
TRATAMIENTO DE AGUA Y REUSO DE DESECHOS**

PRESENTADO POR:

YOLANDA ANDIA CARDENAS

LIMA, PERÚ

Digitalizado por:

**Consortio Digital del
Conocimiento MebLatam,
Hemisferio y Dalse**

2010

DEDICATORIA

A la memoria de mis queridos padres Alejandro y Rosa Elena quiénes me inculcaron: estudio, trabajo, honestidad y responsabilidad.

AGRADECIMIENTO

A DIOS: mi mejor consejero de la vida

A Mi Hijo: José Alejandro, por su apoyo y comprensión durante el desarrollo de la presente investigación.

Expreso también mi sincera gratitud a la empresa **SEDAPAL** por la oportunidad de experimentar día a día mis conocimientos dentro de sus Procesos “Planta de tratamiento de Agua La Atarjea”, durante mi vida laboral desde el año 1982.

RESUMEN DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación está enfocada en mejorar la calidad de agua que es suministrada a la población de la ciudad de Lima; durante la operación de plantas se concentró la atención en el funcionamiento del decantador de Manto de Lodos específicamente del tipo Pulsator. La optimización del manto de lodos se limitaba, anteriormente solo a una mayor dosificación de coagulantes; no obstante, el presente trabajo de investigación abarcó el manejo del funcionamiento hidráulico del manto de lodos.

El objetivo general de la presente investigación viene a ser la determinación de la influencia que la condición de equilibrio hidráulico puede ejercer para la optimización en el funcionamiento del manto de lodos en el decantador pulsator en la remoción de las impurezas que contiene el agua cruda en el proceso de decantación; por consiguiente, determinar, también, mayor reducción en los niveles de turbiedad para garantizar una mejor calidad en el agua y en consecuencia mayor garantía de salud en la población.

La hipótesis con que se operativizó fue la siguiente: La Condición de Equilibrio Hidráulico es un Factor Determinante para La Optimización del Manto de Lodos en el Decantador Pulsator, por lo tanto es pertinente usar esta condición en Plantas de Tratamiento de Agua que comparten esta tecnología. La presente investigación empleó la metodología Cuantitativa, por cuanto utilizó el tratamiento estadístico y es del tipo Tecnológico del nivel Correlacional y Explicativo con diseño Experimental.

La muestra la constituyó la elección aleatoria de tres caudales, así como también de dos variaciones en la altura de agua en la campana del decantador que se encuentran dentro de los límites de altura establecidos del decantador Pulsator; estas alturas también fueron escogidas imponiendo una diferencia de 20 y 40 centímetros respectivamente con respecto de la altura usada convencionalmente. De esta forma se realizaron nueve experimentos para su posterior análisis. La variable dependiente Optimización del Manto de Lodos se dividió en cuatro indicadores de su funcionamiento y un indicador de la calidad de agua decantada.

El resultado más importante del proceso investigativo es que los valores de los indicadores de turbiedad en el agua decantada se ven disminuidos al emplear

correctamente las alturas de agua en la campana en conjunto con los caudales elegidos; los bajos niveles de turbiedad de agua decantada obtenidos son el reflejo de la correcta operación del decantador Pulsator, considerando las variables hidráulicas; siendo este su efecto directo de la optimización de su manto de lodos.

Una vez obtenidos los resultados se contrastó con el Análisis de Varianza (ANDEVA). Se realizó, por cada caudal de tratamiento, el ANDEVA para cada indicador de la optimización del manto de lodos. Posteriormente, se realizó la interpretación de los valores de contraste obtenidos. El Análisis de Varianza se empleó para demostrar estadísticamente que se presentó una variación en los resultados de los diversos indicadores; posteriormente, se interpretaron dichos valores a través de los cuales se validó la hipótesis de la investigación.

Las principales conclusiones a las que se llegaron fueron las siguientes: la optimización en el funcionamiento del manto de lodos en el decantador Pulsator no depende únicamente de añadir los coagulantes en el proceso, sino más bien en el manejo hidráulico del decantador. Esto se ve reflejado en una notable disminución en los niveles de los diferentes indicadores de remoción de impurezas como son; principalmente, la turbiedad; además de buenos niveles de los indicadores del funcionamiento del manto de lodos: altura de manto de lodos, coeficiente de cohesión entre los flóculos, gradiente de velocidad y porcentaje de concentración de lodos.

Asimismo, se evaluó la factibilidad económica calculando el ahorro económico mensual para un caudal Base; este ahorro comprende, principalmente, reducción en la cantidad de coagulante empleado. Esto tiene un significativo impacto en la economía de la empresa. Finalmente y por consiguiente, el agua decantada garantizará, a partir de la esta implementación, mejor calidad de agua cuyos valores cumplen con los Estándares de Calidad para "Agua Potable" y contribuirá a mejorar la salud de la población servida; asimismo, este estudio contribuirá a la significativa reducción de costos operativos durante el tratamiento del agua, así como un modelo para las Empresas Prestadoras de Servicio.

SUMMARY

The present investigation has focused in improving the water quality that is supplied the population of Lima; during the operation of Water Works the attention centered in the functioning of the sludge ou mantle of mud, specifically of the Pulsator Decantator. The optimization of the mantle of mud was limiting itself, previously, to a major dosing of coagulant; nevertheless, the present work of investigation included the managing of the hydraulics in the mantle of mud.

The general aim of the present investigation comes to be the determination of the influence that the condition of hydraulic balance can exercise for the optimization in the functioning of the mantle of mud in the decantator about the impurities remotion; consequently, to determine, also, major reduction in the levels of turbidity to guarantee a better quality in the water and in major consequence was guaranteeing of health in the population.

The hypothesis with which it occurred was the following one: The Condition of Hydraulic Balance is a Determinant Factor for the Optimization of the Mantle of Muds in the Pulsator Decantator or Push-button, therefore it is pertinent to use this condition in drinkable water plants that shares this technology. The used methodology was cuantitative because its use statistical treatment and the type technologic correlational level and explicative with experimental design.

The sample constituted it the random choice of three flows, as well as also of two variations in the height of the bell of the decantator that, certainly, they find inside the limits of height established previously in works respect of the water treatment; these heights also were chosen imposing a difference of 20 and 40 centimeters respectively respect of the height used conventional. Therefore, nine experiments were formed for its later analysis. The variable dependent Optimization of the Mantle of Mud was divided in four indicators of his functioning and one indicator of the quality of praised water.

The most important result of the process of investigation is that the indicators of turbidity in the praised water meet diminished on having used correctly the water heights in the bell mentioned as a whole with the chosen flows; the low levels of turbidity of praised water obtained are the reflection of the correct operation of the decanter push-button, considering hydraulics variables it been its the optimization of its mantle of mud' effect.

Once obtained the results it was confirmed by the Analysis of Variance (ANOVA). The ANOVA was realized, for each flow of treatment, for every indicator of the optimization of the mantle of mud. Later, there was realized the interpretation of the values of contrast obtained. The Analysis of Variance used to demonstrate statistically that was presented a variation in the results of the diverse indicators; later, the above mentioned values were interpreted through which the hypothesis of the investigation was validated.

The main conclusions were the following ones: the optimization in the functioning of the mantle of mud in the decantator push-button does not depend only of adding the coagulants in the process, but rather in the hydraulic managing of the decantator. This meets reflected in a notable decrease in the levels of different indicators in removal of impurities as they are; principally, the turbidity; besides good levels of the indicators in the functioning of the mantle of mud: height of mantle of mud, coefficient of cohesion between the mud, speed gradient and percentage of concentration of mud.

Likewise, the economic feasibility was evaluated calculating the economic monthly saving; this saving understands, principally, reduction in the quantity of used coagulant. This has a significant impact in the economy of the company.

Finally and consequently, the praised water will guarantee, from now, major quality of production: better health that the population demands; likewise, this study will contribute to the significant reduction of operative costs during the treatment of the water, as well as a model for the Service Public Companies.

ÍNDICE**CAPÍTULO I****INTRODUCCIÓN**

	Pág.
1.1.	Descripción y Planteamiento del Problema 1
1.1.1.	Descripción del Problema.....1
1.1.2.	Planteamiento del Problema.....3
1.2.	Finalidad e Importancia de la Investigación..... 4
1.3.	Objetivos de la Investigación.....4
1.3.1.	Objetivo General.....4
1.3.2.	Objetivos Específicos.....5
1.4.	Hipótesis..... 5
1.4.1.	Hipótesis General.....5
1.4.2.	Hipótesis Específicas.....6
1.5.	Variables 6
1.5.1.	Variable Independiente.....6
1.5.2.	Variable Dependiente.....7
1.6.	Indicadores.....7
1.7.	Operacionalización de Variables a Indicadores..... 8
1.8.	Matriz de Consistencia.....10

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1.	Marco Referencial.....	11
2.1.1.	Referencia Internacional.....	11
2.1.2.	Referencia Nacional.....	15
2.2.	Marco Conceptual.....	17
2.2.1.	Teoría del Proceso de Sedimentación/Decantación.....	17
2.2.2.	Clasificación de Unidades de Decantadores.....	26
2.3.	Decantador del Manto de Lodos del Tipo Pulsator.....	33
2.3.1.	Elementos del Decantador Pulsator.....	35
2.3.2.	Proceso de Decantación en Decantador de Manto.....	41
	de lodos del Tipo Pulsator.	
2.3.3.	Factores que permiten la formación y funcionamiento.....	45
	del Manto de lodos.	
2.4.	Funcionamiento del Manto de Lodos.....	59
2.4.1.	Velocidades en el Manto de Lodos.....	63
2.4.2.	Fenómeno de Fluidización.....	65
2.4.3.	Regulación del Sistema de Pulsación.....	69

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.	Método, Tipo y Nivel de Investigación.....	73
3.2.	Población y Muestra.....	74
3.3.	Recolección y Procesamiento de Datos.....	76
3.3.1.	Recolección de Datos.....	76
3.3.2.	Procesamiento de Datos.....	76
3.4.	Diseño de la Investigación.....	77

3.4.1.	Secuencia de la Investigación.....	77
3.4.2.	Diseño de la Investigación.....	81
3.5.	Materiales.....	82
3.5.1.	Unidad de Análisis.....	82
3.5.2.	Recursos Utilizados.....	84
3.5.3.	Procedimientos Empleados.....	88

CAPITULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1.	Resultados.....	94
4.1.1.	Altura del Manto de Lodos.....	94
4.1.2.	Concentración del Manto de Lodos.....	100
4.1.3.	Coefficiente de Cohesión	108
4.1.4.	Gradiente de Velocidad.....	113
4.1.5.	Remoción de Turbiedad.....	116
4.2.	Análisis Estadístico.....	128
4.2.1.	Altura del Manto de Lodos.....	130
4.2.2.	Concentración del Manto de Lodos.....	133
4.2.3.	Coefficiente de Cohesión.....	136
4.2.4.	Gradiente de Velocidad.....	139
4.2.5.	Remoción de Turbiedad.....	142

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1.	Conclusiones.....	147
5.1.1.	Con Respecto a la Altura del Manto de Lodos.....	148

5.1.2.	Con Respecto a la Concentración	150
5.1.3.	Con Respecto al Coeficiente de Cohesión.....	151
5.1.4.	Con Respecto al Gradiente de Velocidad.....	152
5.1.5.	Con Respecto a la Remoción de Turbiedad.....	153
5.1.6.	Con respecto a la Operación del Decantador.....	155
5.1.7.	Con respecto a los Grupos de Experimentos.....	158
5.2.	Recomendaciones.....	160
Fuentes de Información.....		163
Anexos.		

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Descripción y Planteamiento del Problema

1.1.1. Descripción del Problema

En el proceso de decantación del tratamiento de agua con fines de consumo humano, generalmente, no se consideran las condiciones hidráulicas en el mantenimiento y funcionamiento del manto de lodos del decantador Pulsator, utilizado en las Empresas de Agua que utilizan esta Tecnología, ya que consideran que la decantación se realiza solo por sedimentación natural de las partículas floculentas que provienen de la adición de los coagulantes químicos.

Por lo que el agua decantada presenta valores altos de turbiedad a la salida del decantador, afectando al siguiente proceso de tratamiento: la filtración, cuya consecuencia resulta en menor porcentaje de remoción de las impurezas del agua y mayor costo de tratamiento; ya que, se requiere realizar mas números de veces del lavado de las unidades de filtración, por lo tanto se requerirá de mayor volumen de agua para los lavados, asimismo esto implicaría mayor costo de energía eléctrica por los frecuentes lavados de filtros y en general costos operativos elevados.

El manto de lodos del decantador Pulsator al ser el elemento principal que favorece al proceso de decantación y separación de las partículas floculentas, es necesario el conocimiento y control de las variables que inciden en su funcionamiento y los impactos que estos producen en la calidad del agua decantada. Por lo tanto el control de las variables hidráulicas viene a ser un proceso tecnológico de mayor relevancia, al operar los decantadores Pulsator para la determinación de la Optimización del Manto de Lodos a través de los indicadores que identifican a un Manto de Lodos Óptimo.

En los trabajos de investigación realizadas por varios Investigadores, que a continuación se citan, como referencia por tener similitud con el presente estudio, se mencionan, entre otros, que el comportamiento del manto de lodos es función solo de los coagulantes, que no existen elementos que puedan variarse en los floculadores hidráulicos (manto de lodos) tal que se produzcan cambios en las operaciones unitarias, como los fenómenos de transporte de los flóculos que se presentan en el manto de lodos (solo refieren a la dosificación de los coagulantes), mencionando en forma global que para evitar el arrastre de los flóculos se debe tener en cuenta ciertas variables hidráulicas, asociados a las características de las unidades de decantación. Así:

- Miller, Derek G. de la Asociación de Investigación del Agua, Inglaterra 2002 sobre **“Reactores de Contacto con Sólidos”** explica que “Las principales ventajas que se le atribuyen a este tipo de unidades son: mejor floculación debido a la presencia de floc preformado a su habilidad para tratar cargas muy altas de sólidos suspendidos. (...) la floculación se logra hidráulicamente; es decir, se debe tener en cuenta ciertas condiciones hidráulicas. (...) Y lo más importante, los aumentos de la velocidad acarrearán más floc hasta los filtros. (...) La mayor profundidad del manto mejora la remoción del floc”
- Pavón Silva, Thelma Beatriz; Garrido Hoyos, Sofía Esperanza; Chávez Guerra, Carlos. De la Universidad Autónoma de México - 2000, sobre **Experiencias en la Evaluación de un Sistema de Potabilización con Sedimentación por Manto de Lodo Aplicado a Comunidades Rurales**, “(...) Menciona, con respecto al comportamiento del manto de lodo, en función del tipo de coagulante, (cloruro con dosis de 20 mg/L), observó que al dosificar el cloruro férrico en el minuto 200 de la prueba en planta alcanzó una altura del manto de lodo de 9 cm, en este tiempo se realizó una purga de lodo con el fin de evaluar la estabilidad del manto en cuanto a su fluidización y tiempo de formación. (...)”
- Ríos, Danilo; López, Julieta; Gómez, Cecilia; Broggi, Giuliana; Lanfranconi, Armando; Plottier, Daniela; realizaron el estudio sobre **“Optimización del Proceso de Floculación en Plantas que Operan**

con Gradientes de Velocidad Escalonados" presentado en el XXVIII Congreso Internacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental en la ciudad de Cancún México en el 2002, explican "De hecho, en una planta que cuente únicamente con floculadores hidráulicos en general no existen elementos que puedan variarse de modo de generar cambios en los procesos unitarios; solamente una dosificación más eficiente y efectiva, y los adecuados procedimientos de lavado de filtros y purga de sedimentadores se verán reflejados en un producto final de calidad adecuada".

Si bien es cierto que en estas investigaciones hay relaciones en cuanto al manejo del manto de lodos y en otros al uso de los coagulantes químicos; no existen estudios enfocados y dirigidos al comportamiento de las variables hidráulicas en el manto de lodos del decantador Pulsator.

Asimismo los diferentes trabajos de investigación encontrados para la optimización del tratamiento de aguas, están enfocados principalmente al manejo cuantitativo de coagulantes, reducción microbiana a través de diferentes reactivos desinfectantes utilizados en el tratamiento de agua, etc.

Por lo antes expuesto se pretende con este estudio optimizar el manto de lodos en el proceso de decantación teniendo en cuenta las condiciones hidráulicas en el mantenimiento y funcionamiento del manto de lodos del decantador Pulsator para los diferentes caudales de tratamiento.

1.1.2. Planteamiento del Problema

¿Será factible la optimización del manto de lodos a través del equilibrio hidráulico en el mantenimiento y funcionamiento del manto de lodos del decantador Pulsator en el tratamiento del agua con fines de consumo humano?

1.2. Finalidad e importancia de la investigación

Esta investigación es significativa en el aporte que brindará para:

- Optimizar el funcionamiento de los decantadores de manto de lodos y mejorar la calidad del agua producida por las plantas de agua que utilizan esta tecnología.
- Estandarizar la operación para conseguir un mayor porcentaje en la remoción de las impurezas del agua en el proceso de decantación.
- Contribuir al cumplimiento de los estándares de calidad de agua para consumo humano a través de la optimización de la operación de los decantadores de manto de lodos.
- Contribuir con las diferentes EPS (Empresas Prestadoras de Servicio) que utilizan este tipo de decantadores, con las experiencias obtenidas en este estudio.

1.3. Objetivos de la Investigación

Se establecieron los siguientes objetivos para desarrollar el problema planteado.

1.3.1. Objetivo General

- Demostrar que la condición de equilibrio hidráulico es un factor determinante para lograr la optimización del manto de lodos en la remoción de las impurezas del agua en el proceso de decantación.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar la relación de procesos fisicoquímicos e hidráulicos para la formación y mantenimiento de las partículas floculentas en el manto de lodos.
- Identificar los factores que permiten la formación y funcionamiento del manto de lodos.
- Analizar y determinar la relación entre la velocidad de sedimentación y la velocidad de flujo requerido para evitar el arrastre y pérdida de las partículas floculentas del manto de lodos.

Para responder al problema se ha desarrollado la siguiente hipótesis teniendo en cuenta los objetivos de la investigación, los antecedentes del estudio y el Marco Teórico.

1.4. Hipótesis

1.4.1. Hipótesis General

La condición de equilibrio hidráulico es un factor determinante para la optimización del manto de lodos del decantador Pulsator en la remoción de las impurezas del agua en el proceso de decantación.

$$H_0: X_{\text{Control}} = X_{\text{Experimental}}$$

$$H : X_{\text{Control}} \neq X_{\text{Experimental}}$$

$$\alpha = 0.05 \text{ y } z = 1.96$$

Esta hipótesis asevera que la operación del manto de lodos del decantador Pulsator considerando las condiciones de equilibrio hidráulico difiere en los resultados con respecto al funcionamiento del manto de lodos del decantador.

1.4.2. Hipótesis Específicas

H₁: Existe relación entre los procesos fisicoquímicos e hidráulicos para la formación y mantenimiento de las partículas floculentas del manto de lodos, para los diferentes coagulantes.

H₂: Existen factores que permiten la formación y funcionamiento del manto de lodos.

H₃: Existe relación entre la velocidad de sedimentación y la velocidad de flujo requeridos para evitar el arrastre y pérdida de partículas floculentas del manto de lodos.

1.5. Variables

1.5.1. Variable Independiente V.I. = (X)

Condición de Equilibrio Hidráulico.

Variable que se ha manipulado deliberadamente a través de sus indicadores a fin de conocer las influencias que produce en la variable dependiente.

Según Mario Tamayo y Tamayo (1994:212) describe la variable como un: "Aspecto o dimensión de un fenómeno que tiene como característica la capacidad de asumir los distintos valores. Símbolo al cual se asignan valores o número"

Esta variable se manipuló a través del indicador h_c : altura de agua en la campana de vacío, cuyos valores asignados fueron: $h_c = 0.60$ m., y $h_c = 0.80$ m. y del caudal de tratamiento Q ($Q_1 = 1.45$ m³/s, $Q_2 = 1.66$ m³/s y $Q_3 = 1.75$ m³/s)

1.5.2. Variable Dependiente V.D. = (Y)

Optimización del Manto de Lodos del Decantador Pulsator.

Las consecuencias (supuestos efectos) que la manipulación de la V.I. ejerció sobre esta variable se midieron para cada experimento desarrollado, a través de los indicadores que definen el manto de lodos optimizado: altura del manto de lodos, concentración de lodos, coeficiente de cohesión, gradiente de velocidad y remoción de turbiedad.

1.6. Indicadores

“Son subvariables que se desprenden del análisis de las variables con el objeto de facilitar su control, manipulación, medición y evaluación. Los indicadores tienen un carácter operativo práctico en el proceso de investigación” según Santiago Valderrama Mendoza (2003:141)

Los principales indicadores que se manipularon fueron:

- Caudal de Tratamiento: Q m³/s
- Variación de la altura de agua en la campana h_c : m.

Los principales indicadores que se midieron y calcularon para determinar el efecto de los indicadores asignados fueron:

- Altura manto de lodos: H
- Concentración de manto de lodos: %
- Coeficiente de cohesión de lodos: K

- Gradiente de velocidad G : s^{-1}
- Porcentaje de Remoción de Impurezas: Turbiedad residual, medido a la salida del decantador.

1.7. Operacionalización de Variables a Indicadores

1.7.1. Variable Independiente “Condición de Equilibrio Hidráulico”

La condición de equilibrio hidráulico para el presente estudio está definido como la situación en la que intervienen los diferentes valores de caudales Q de tratamiento en conjunto con la altura de agua en la campana h_c asignados, de tal forma que permita el movimiento armónico de expansión y compresión del manto de lodos, producidos por las pulsaciones, evitando el arrastre de los flóculos que lo componen.

Tanto el caudal Q así como la altura de agua en la campana h_c han sido considerados como los principales indicadores de esta variable, manipulados en forma intencional por medio de la asignación de los valores con los cuáles se han desarrollado los experimentos.

Con los valores asignados se determinaron los volúmenes de agua que ingresaban al decantador durante cada ciclo de las pulsaciones los cuáles producían diferentes valores de velocidad de flujo V_o (sentido ascendente) y diferentes valores de velocidad de sedimentación V_s (sentido descendente) considerados como subindicadores de la condición de equilibrio hidráulico del manto de lodos.

Variable Independiente	Dimensiones	Indicadores
Condiciones de Equilibrio Hidráulico	Volumen de Tratamiento	Caudal de Tratamiento: m^3/s
	Efecto de las Pulsaciones	Altura de Agua en la campana de Vacío h_c : m.

1.7.2. Variable Dependiente “Optimización del Manto de Lodos del Decantador Pulsator”

La optimización del manto de lodos se definió como el mejoramiento del proceso de decantación, para lo cual se realizó el proceso de determinación de los valores óptimos de los indicadores del funcionamiento del manto de lodos, en cada experimento, a través de la medición, análisis y cálculo, comparándolo con respecto a los valores obtenidos en la forma habitual de operar el decantador considerado como grupo de control (sin cambios).

- **Altura del manto de lodos: H** debe alcanzar el máximo nivel permitido, para tener facilidad de desarrollar el proceso de floculación y retener la mayor cantidad de las partículas floculentas.
- **Porcentaje de Concentración de lodos: % [lodos]**, debe contener la mayor cantidad de flóculos, en el nivel inferior del manto de lodos (fondo del decantador) y menor cantidad en el nivel superior (interfase agua-lodo) a mayor concentración de lodos es mayor la retención de los microfloculos provenientes del proceso de coagulación y promover su desarrollo durante su transporte a las capas superiores del manto.
- **Coefficiente de cohesión de lodos: K**, favorece la aglomeración o cohesión entre los flocs (en el rango de 0.8 a 1.2, señalado por Dégremont “Manual Técnico del Agua 2007” representa la resistencia a la ruptura de los flóculos.
- **Gradiente de velocidad: G**, favorece la transferencia del movimiento del agua entre los flóculos, de esta forma se produce la colisión y aglomeración de los mismos.

Así mismo, la optimización del manto de lodos se vió reflejada, en la calidad del agua decantada a través de la medición de:

- **Determinación del porcentaje de remoción de turbiedad en el agua decantada: % Turbiedad**, el porcentaje de remoción de turbiedad es directamente proporcional a la calidad del agua en el decantador, tiene relación con la remoción de otras impurezas fisicoquímicas y biológicas.

Variable Dependiente	Dimensiones	Indicadores
Optimización del manto de Lodos del Decantador Pulsator	Funcionamiento del Manto de Lodos	Altura de Manto de Lodos: H
		Coefficiente de cohesión: K
		Porcentaje Concentración
		Gradiente de Velocidad
	Calidad de Agua Decantada: Turbiedad	Porcentaje de Remoción de Turbiedad: %

La presente investigación se realizó para determinar, cómo las diferentes condiciones operativas que se establecieron como "Grupo Experimental" afectan al manto de lodos, por cuanto se trata de medir la relación que existe entre las variables independiente y dependiente formulado, y realizar la operacionalización de estas variables a través de la medición de sus indicadores.

1.8. Matriz de Consistencia.

La matriz de consistencia se presenta en el cuadro 1.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Marco Referencial

2.1.1. Referencia Internacional

2.1.1.1. Decantadores de Manto de Lodos o Reactores de Contacto de Sólidos de Flujo Ascendente

a) Comportamiento del Manto de Lodos

Según experiencias realizadas por Pavón Silva, Thelma Beatriz; Garrido Hoyos, Sofía Esperanza y Chávez Guerra, Carlos. De la UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MÉXICO sobre **“La Evaluación de un Sistema de Potabilización con Sedimentación por Manto de Lodo Aplicado a Comunidades Rurales”** mencionan: que el incremento de la altura del manto de lodos es función del tipo de coagulante, de los valores obtenidos con dosis de cloruro férrico experimentados con dosis de 20 mg/l, se pudo observar que al dosificar el cloruro férrico en el minuto 200 de la prueba en planta se alcanza una altura del manto de lodo de 9 cm, en este tiempo se realizó una purga de lodo con el fin de evaluar la estabilidad del manto en cuanto a su fluidización y tiempo de formación. Finalmente el manto de lodo alcanzó una altura de 27 cm en el minuto 420, observándose en el tiempo mayor altura y con el cloruro férrico el manto de lodos se ve más favorecida en cuanto a la estabilidad, debido a las características del floculo producido por este coagulante.

La investigación realizada sobre **Reducción del Volumen de Lodos en Planta de Tratamiento de Aguas Urbanas Vía Filtración** realizado por Martínez Cisternas, Ariel Adolfo. De PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO (CHILE) -2008, señala que el volumen de manto lodos se reducirá como consecuencia de la sedimentación de las partículas floculentas. Esto se

debe gracias a la ausencia de una velocidad ascendente, orientado a sedimentadores convencionales.

En la investigación realizada sobre **Reactor Anaeróbico Tipo EASA: Reactor Híbrido de Flujo Ascendente** por López M. Manuel Enrique de la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DE LA PAZ (MÉXICO), hace referencia: al flujo ascendente que ingresa a un reactor rectangular donde el agua ingresa a través de una compuerta inferior, el líquido a depurar asciende con una velocidad pequeña y este se pone en contacto con el manto de Lodos. Se señala, además, que un adecuado caudal (Q) ocasiona la adecuada expansión del manto dentro de los límites para no dispersar los lodos. Así tendrá una mayor filtración y mejor decantación.

b) Floculación en Manto de Lodos

En el manto de lodos de lodos se produce la floculación hidráulica en forma escalonada, tal como se menciona en el trabajo de investigación sobre **"Optimización del Proceso de Floculación en Plantas que Operan con Gradientes de Velocidad Escalonados"** desarrollados por Ríos, Danilo; López, Julieta; Gómez, Cecilia; Broggi, Giuliana; Lanfranconi, Armando y Plottier, Daniela, presentados en XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental Cancún, México, 27 al 31 de octubre, 2002.

Este estudio explica que en una planta que cuente únicamente con floculadores hidráulicos en general no existen elementos que puedan variarse de modo de generar cambios en los procesos unitarios; solamente una dosificación más eficiente y efectiva son importantes, y los adecuados procedimientos de lavado de filtros y purga de sedimentadores se verán reflejados en un producto final de calidad adecuada que en plantas potabilizadoras equipadas con floculadores mecánicos de varias etapas; en este último caso los resultados dependerían prioritariamente de las últimas etapas de floculación, debiendo prestarse especial atención en la selección de sus parámetros de diseño; de contarse con varias etapas de floculación, se podría operar las mismas a velocidad constante, dejando exclusivamente para las últimas etapas la posibilidad de variar el

gradiente de velocidad, dado su clara influencia sobre la calidad del agua sedimentada .

Igualmente en la investigación realizada sobre **Tratamiento Físico Químico De Aguas Residuales** por Carrasco Quiroz, Carlos Alberto de la UNIVERSIDAD DE CHILE (Chile) – 2007.

Explica que la eficiencia de la floculación dependerá del parámetro llamado gradiente de velocidad que determinará las condiciones de operación de las unidades de decantación. Conforme se produce la coalescencia o floculación, la masa de partículas va aumentando, y se deposita a mayor velocidad. La medida en que se desarrolle el fenómeno de floculación depende de la posibilidad de contacto entre las diferentes partículas, que a su vez es función de la carga de superficie, del gradiente de velocidad, de la concentración de partículas y del tamaño de las mismas. El efecto de estas variables sobre el proceso sólo se puede determinar mediante ensayos de sedimentación como las pruebas de jarras”

c) Ventajas y Desventajas de Reactores de Contacto de Sólidos

Los estudios de investigación realizados por el Ingeniero Miller, Derek G. de la Asociación de Investigación del Agua, Inglaterra 2002, muestran las principales ventajas cuando se utilizan este tipo de reactores en el tratamiento de aguas:

- Mejor floculación debido a la presencia de floc preformado y a su habilidad para tratar cargas muy altas de sólidos suspendidos, los poros entre los flóculos, actúan como floculadores.
- La floculación se logra hidráulicamente; es decir, se debe tener en cuenta ciertas condiciones hidráulicas.
- La presencia de una fase suspendida como lo es el manto de lodos también permite la retención de sólidos más finos y el resultado total es el desarrollo de unidades compactas con incrementos sustanciales en la producción.

- Los sistemas de contacto con sólidos ofrecen la ventaja de flocular el agua en presencia de un manto de lodos que ayuda a atrapar las partículas del floc.
- El flujo ascendente es más ventajoso que el de sedimentación en flujo descendente en términos de consumo de coagulante, debido a que el medio filtrante actúa como un medio poroso de manto de lodos, señalado por Derek en su trabajo de Filtros de Flujo Ascendente.
- La mayor profundidad del manto de lodos mejora la remoción del microfloc, proveniente del proceso de coagulación.
- Los sistemas de manto de lodos requieren un control cuidadoso para prevenir la pérdida de sólidos que pueden conducir a la destrucción del proceso combinado de floculación – sedimentación.
- Y lo más importante, los aumentos de la velocidad acarrearán más floc hasta los filtros. La magnitud de este efecto depende del tamaño de las unidades ya que en tanques de gran diámetro el incremento de velocidad puede producir pérdida completa de la suspensión.

2.1.1.2. Parámetros Hidráulicos en Reactores de Fosas Sépticas de Manto de Lodos.

Los reactores de fosas sépticas son utilizados para el tratamiento anaeróbico de las aguas residuales domésticas, cuyos parámetros hidráulicos fueron estudiados por Juan Sebastián Ramírez de la Universidad Central Del Ecuador Escuela de Ingeniería Química 2003, durante el desarrollo del manto de lodos observó que a medida que iba formándose los flóculos, constituidos por reactivos y partículas retenidas, se acumulaban cerca del fondo y finalmente se expandían hacia la parte periférica en forma de manto de lodos que se mantenía en equilibrio dinámico con el flujo ascendente del agua.

El buen funcionamiento de este reactor exigía la formación de un manto de lodos y su mantenimiento de acuerdo a las velocidades ascendentes y de sedimentación.

Además, la altura del manto de lodos dependía de la concentración de fangos y de la velocidad ascensional del agua.

En lo que concierne al comportamiento hidráulico del manto de lodos se había establecido que su volumen (y en consecuencia su altura) es una función lineal creciente del caudal; en otras palabras, si se dobla el caudal se dobla la expansión del manto, resultando que la concentración es una función lineal decreciente o inversamente proporcional.

El objetivo deseado de este estudio consistía en obtener una expansión suficiente del manto de forma que se consiga asegurar una probabilidad adecuada de crecimiento por coalescencia de los flóculos admitidos por la parte inferior del manto, lo que exigía una cierta velocidad vertical mínima, y sin embargo la velocidad ascensional en la parte superior del manto de lodos deberá ser inferior a la que provocaría el arrastre de los flóculos formados. El método hidráulico más común consistía en el bien conocido estanque con tabiques desviadores, en el que el agua entraba por arriba y por debajo del tabique desviador que había sido dispuesto de manera que se produzca el grado deseado de turbulencia.

Se hace mención a esta referencia, toda vez que en los compartimentos de las fosas sépticas se produce en el primer compartimento los flóculos biológicos (por digestión de las agua residuales) y en el segundo compartimento se produce la sedimentación de los mismos; conceptos que también son utilizados en los procesos de tratamiento de agua con fines de consumo humano; además que como menciona Metcalf – Eddy en su libro *Tratamiento y Depuración de las Aguas Residuales* el *“objetivo que persigue el tratamiento biológico de las aguas residuales son la coagulación y eliminación de los sólidos coloidales no sedimentable.....”* donde la coagulación y eliminación de las partículas coloidales son también objetos del tratamiento de agua para consumo humano.

2.1.2. Referencia Nacional

En el Perú no se aborda sistemáticamente la problemática planteada respecto a la optimización del manto de lodos en función de las condiciones hidráulicas, no se encontraron registros de estudios con respecto del funcionamiento hidráulico

del manto de lodos en decantador Pulsator; se han realizado las búsquedas de tesis en las más importantes Universidades de nuestro país, como son la Universidad Nacional de Ingeniería UNI, la Universidad Nacional Mayor de San Marcos UNMSM, Universidad Ricardo Palma URP, Pontificia Universidad Católica del Perú PUCP, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas UPC.

Estas tesis también fueron buscadas en portales digitales de estas Universidades, más específicamente en Cybertesis Perú, así como en sus respectivas bibliotecas virtuales, los cuáles reúnen los más importantes trabajos de investigación en nuestro país, sin embargo no se han encontrado temas de investigación semejantes al respecto.

Las mencionadas universidades cuentan con las ingenierías que guardan relación a través de sus asignaturas con los proceso de tratamiento de aguas: sedimentación convencional y decantación en sistemas de patente.

Ahora bien, es pertinente señalar que se ha revisado en todas las especialidades profesionales, además se ha puesto énfasis en áreas de Ingeniería Ambiental, Química, Industrial, Biología, e incluso Civil por tener la debida relación en investigación con los conceptos señalados anteriormente.

Las investigaciones, en relación a la optimización del tratamiento de agua, se enfocan en su mayoría al análisis biológico, uso cuantitativo de los coagulantes en la sedimentación. Además, se ha encontrado diversas investigaciones para el tratamiento de aguas residuales, tanto en alternativas de diseño como en optimización de costos en la operación; sin embargo esto no se relaciona directamente con lo planteado.

De esto se concluye, que en cuanto a la literatura Nacional especializada, no existen registros que señalen la relevancia en el manejo hidráulico del decantador Pulsator; es decir, manipulación en los componentes del mismo en función de optimizar el proceso de decantación en decantadores de Manto de Lodos del tipo Pulsator.

2.2. Marco Conceptual

2.2.1. Teoría del Proceso de Sedimentación/Decantación

La sedimentación es un procedimiento de separación sólido/líquido por gravedad; se habla de **Decantación** cuando se espera obtener un líquido clarificado y de **Sedimentación** cuando se busca que el sólido separado se concentre, desde el punto de vista de tratamiento de agua estos dos conceptos pueden ser concebidos como uno solo ya que la denominación depende del tipo de partículas a separar.¹ Según el Ingeniero Químico M. F. Edeline, Profesor de la Facultad de Ciencias Agronómicas de Gembloux – Francia.

En general la decantación se trata de la separación de partículas floculentas formadas por la acción de los coagulantes químicos con las partículas coloidales que contiene el agua a tratar desarrolladas en el proceso de coagulación, pasando los coloides a la forma de flocs que vienen a ser los precipitados de los hidróxidos del metal que corresponde al coagulante.

La sedimentación es en esencia un fenómeno netamente físico donde los sólidos por acción natural caen y forman depósitos de lodos acumulados, en plantas de agua de tecnología convencional son bastante utilizados.

Las partículas sedimentan² o caen de diferente forma dependiendo de sus propias características, así como de su concentración; por lo tanto cuando una partícula cae sin haber recibido algún tratamiento químico entonces se refiere a la sedimentación de partículas discretas, en cambio sí las partículas después de haber recibido el tratamiento químico/biológico caen, entonces se refiere a la decantación de partículas floculentas o de partículas por caída libre e interferida. Indicado en el texto Tratamiento de Aguas por José Pérez, Asesor en Tratamiento de Aguas de la Organización Panamericana de la Salud OPS – Organización Mundial de la Salud OMS.

¹La Decantación y Sedimentación CAP. 3 Depuración Físicoquímica de las Aguas F. Edeline,

² Evaluación de Plantas de Tratamiento de agua T1 José Pérez 1984

Para el Profesor Raymond Desjardins de la Escuela Politécnica de Montreal – Canadá, la decantación es un proceso utilizado en la mayoría de plantas de tratamiento de agua de tecnología convencional y de patente, donde los procesos de coagulación y floculación están presentes y tiene por objeto eliminar las partículas floculentas en suspensión provenientes de estos procesos, siendo la densidad de estas partículas superior a la del agua.

Además menciona que según la concentración de lodos y la naturaleza de las partículas (densidad y forma) se distinguen 4 tipos de decantación: decantación de partículas discretas; decantación de partículas floculentas; decantación frenada y decantación con compresión de lodos.

2.2.1.1. Tipos de Decantación.

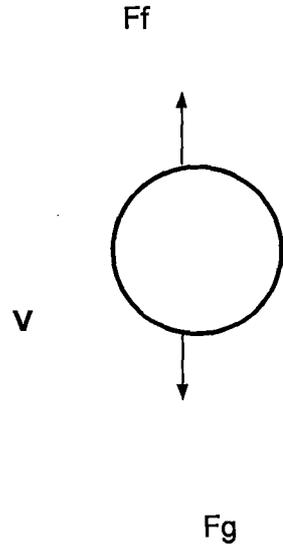
a) Decantación de Partículas Discretas.

Este tipo de decantación discreta o individual; es caracterizado por el hecho que las partículas conservan sus propiedades físicas iniciales (forma, dimensión y densidad) a través de su caída. La velocidad de caída es independiente de la concentración de sólidos; esto debido a que las leyes clásicas de Newton y Stokes son aplicables a este tipo de partículas. Fig. N° 1

Fig. N° 1 Fuerzas que actúan sobre una Partícula que Cae

$$F_f = \rho \cdot g \cdot V \quad \text{ec. (1)}$$

$$F_g = g \cdot \rho_s \cdot V \quad \text{ec. (2)}$$



- Donde:
- g : aceleración de la gravedad
 - d : diámetro de las partículas "Flóculos"
 - C_D : coeficiente de arrastre o fricción de Newton
 - ρ_s : densidad del sólido
 - ρ : densidad del agua
 - V : Volumen de la partícula = $\frac{\pi}{6} \cdot d^3$
 - F_f : fuerza de flotación
 - F_g : fuerza de gravedad
 - F_i : fuerza de impulsión

La fuerza resultante de F_f y F_g , es: $F_i = g V (\rho_s - \rho)$ ec. (3)

La partícula arrastrada por la fuerza F_i desciende con velocidad creciente, durante este descenso se genera la fuerza de roce definida por la Ley de Newton, cuyo valor es:

$$F_R = C_D A \rho V_s^2 / 2 \quad \text{ec. (4)}$$

- Dónde $V_s^2 / 2$: energía cinética
 A : área transversal de la partícula $\pi \cdot d^2 / 4$

Igualando las ecuaciones 3 y 4 F_i con F_R , se obtiene la velocidad de caída o sedimentación V_s (m/s) de la partícula (cuerpo esférico) en un fluido.

$$V_s = \left(\frac{4}{3} \cdot g / C_D (S_s - 1) d \right)^{1/2} \quad \text{ec. (5)}$$

- Dónde S_s : peso específico de la partícula

b) Decantación de Partículas Floculentas.

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

La materia en suspensión que origina la turbiedad consiste principalmente en sílice finamente dividida, arcilla y limo. La densidad original de las partículas es similar a 2.60. el color, en cambio, es producido principalmente por ácidos orgánicos (fúlvico, húmico, etc.) de origen vegetal con densidades variables de 1 a 1.5 dependiendo de su concentración; presentándose principalmente en estado coloidal, siendo necesario añadir coagulantes químicos y someterlas a procesos de coagulación y floculación para incrementar su tamaño y/o densidad en forma previa al proceso de sedimentación.

Las partículas en suspensión de aguas tratadas con coagulantes, consisten en flóculos formados por óxidos metálicos (Al_2O_3 ó Fe_2O_3), de 85% a 95%. 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 1.2. 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).

La velocidad de sedimentación/decantación de suspensiones floculentas depende de las características de las suspensiones, así como de las características hidráulicas de los sedimentadores o decantadores, de la presentación de procesos concomitantes: floculación por diferencias de velocidades de sedimentación de los flóculos, **imposibilitan la preparación de un modelo matemático general**. Por este motivo se recurre a ensayos en laboratorio o plantas piloto con el propósito de predecir las eficiencias teóricas remocionales en función de cargas superficiales o velocidades de asentamiento preseleccionadas, tomándose las siguientes precauciones:

- Que la muestra de la suspensión sea representativa.
- Que la muestra se mantenga a igual temperatura.

Este tipo de decantación es caracterizada por la aglomeración de partículas a través de su caída, las propiedades físicas de estas partículas (forma, dimensión, densidad y velocidad de caída) son modificados durante el proceso, las partículas resultantes son más grandes y con más peso. Se obtiene este tipo de decantación en decantadores con suficiente concentración de lodos que operan por lo general en plantas de tratamiento de agua con fines de consumo humano y en decantadores secundarios de las plantas de aguas residuales (procesos combinados). Durante la decantación de las partículas floculentas la aglomeración, se produce a cierto ritmo y las partículas resultantes son las más grandes y pesadas que las partículas iniciales.

La velocidad de decantación de las partículas floculentas se determina en una columna de 1,8 a 2,4 m de altura de un diámetro de 0,15 m, y se va tomando las muestras cada 0,6 m, empezando desde la superficie (Fig. N° 2) las tomas de muestra a intervalos regulares permite trazar las curvas de eliminación de partículas (Fig. N° 3) a partir de estos resultados se puede evaluar el porcentaje de partículas eliminadas en un tanque ideal de decantación, en función de

diferentes tiempos de retención y a diversas profundidades con la ayuda de la siguiente ecuación, ec. (6):

Ecuación (6)

$$R = \frac{\Delta h_1 \times (R_1 + R_2)}{H} + \frac{\Delta h_2 \times (R_2 + R_3)}{H} + \dots + \frac{\Delta h_n \times (R_n + R_{n+1})}{H}$$

Donde:

R: porcentaje total de partículas eliminadas en un tanque ideal de decantación.

R_1, R_2, \dots, R_n : porcentaje total de partículas eliminadas en un tanque ideal de decantación a una profundidad h , después de un tiempo de retención t .

$\Delta h_1, \Delta h_2, \dots, \Delta h_n$: alturas promedios entre dos curvas del mismo porcentaje de eliminación de partículas.

H: altura total de la columna.

Fig. N° 2 Columna de Decantación

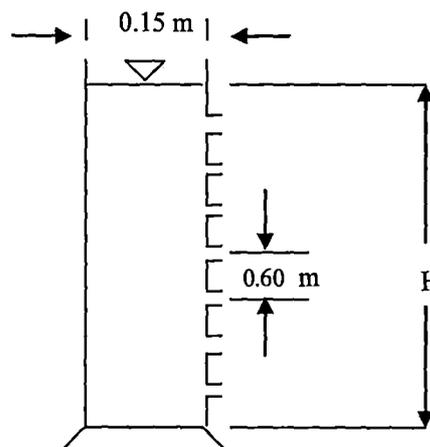
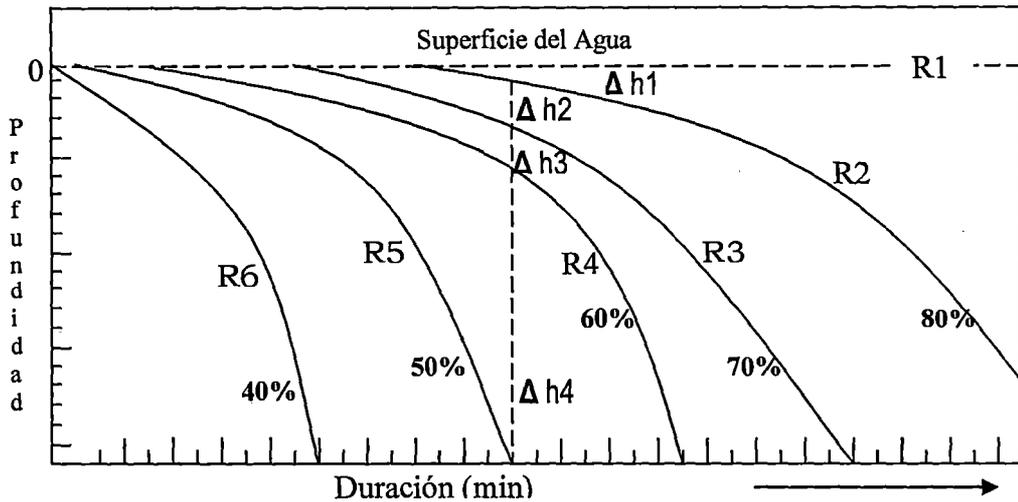


Fig. N° 3 Curvas de Porcentaje de Eliminación de Partículas



La decantación de partículas floculentas no solo está en función de las características de decantación sino también de las características de floculación, "la aglomeración de partículas favorecen la decantación, aún cuando la densidad de las partículas resultantes es inferior al de aquellas partículas iniciales, puesto que la velocidad de decantación es función del diámetro y de la densidad de partículas, así como de la viscosidad dinámica del agua".³

La floculación juega un rol importante dentro del procedimiento de decantación y la tasa de floculación de partículas es función de:

- de la distancia de partículas recorridas
- de la carga superficial
- de los gradientes de velocidad dentro del decantador
- de la concentración de partículas

La remoción total R_T es igual a:

$$R_T = (1-C) + \frac{C_0}{V_s} \int_0^{C_0} V \cdot dC \quad \text{ec. (7)}$$

C : concentración de partículas Vol./Vol.

c) Decantación Frenada o Interferida.

Este tipo de decantación es caracterizado por una concentración elevada de partículas que conducen a la formación de un lecho de lodos y por consecuencia la aparición de una demarcación neta entre los sólidos decantados y el líquido sobrenadante, este tipo de decantación se encuentra en la parte profunda de los decantadores.

En la decantación interferida las partículas se encuentran colocadas a distancias tan reducidas que el líquido desplazado se confina como dentro de un tubo y la velocidad aumenta conforme se interfiere en los campos situados alrededor de las partículas individuales.

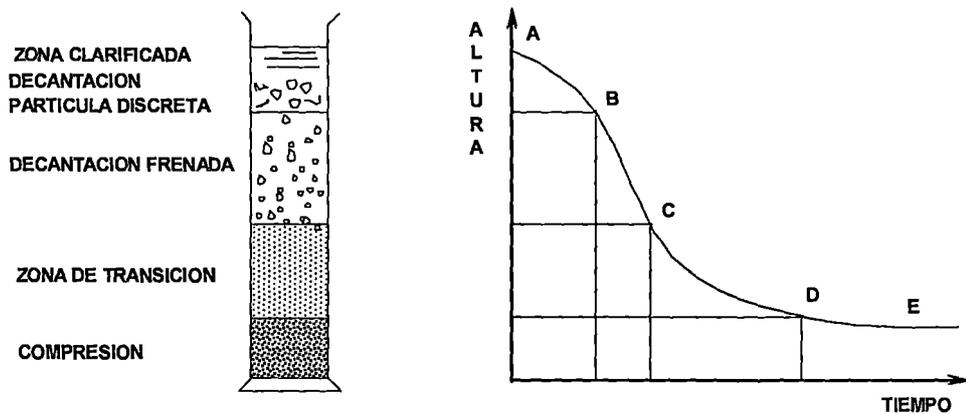
El flujo no sigue líneas paralelas sino trayectorias irregulares a causa de la interferencia de las partículas en suspensión lo que produce un fenómeno similar al retrolavado de un filtro.

Si la concentración del flóculo es pequeña, durante su caída y/o sedimentación no se comportan como una partícula granular independiente sino que debido al coagulante empleado, su decantación esta afectada en parte por la naturaleza de éste, considerándose por tanto como una "sedimentación difusa". Cuando la concentración es mas elevada (del orden de 0.5 gr/l) la decantación de los flóculos en conjunto se ve frenada, distinguiéndose mas fácilmente la separación entre la masa de partículas o flóculos y el líquido en este caso el agua, a este tipo de sedimentación se le conoce como "sedimentación en bloque o pistón o decantación interferida" ⁴

⁴ El Agua Potable – Decantación – <http://www.fortunecity.es/felices/Andorra/51/decantación.htm> 7

Este tipo de decantación se presenta en los decantadores de manto de lodos del tipo Pulsator.

Fig. N° 4 Decantación por Caída Interferida



Kynch, establece que la velocidad de caída de las partículas floculentas depende de la concentración, esto se puede observar:

Al llenar una columna de sedimentación (Fig. N° 4) de diámetro y altura conocidos con una suspensión floculenta de elevada concentración, se tiene inicialmente una concentración uniforme en toda la altura de la columna (h_0), a diferentes tiempos se mide la altura de la capa superior de los lodos obteniéndose los siguientes:

Zona A-B La superficie de separación es muy definida, siendo esta la fase en la que los floculos colisionan, se observa también una pequeña zona de decantación libre.

Zona B-C Se presenta una sección rectilínea, que corresponde a una velocidad de caída constante definida por la concentración de las partículas. Al aumentar la concentración de las partículas

disminuye la velocidad, a esta zona se denomina "Decantación Frenada".

Zona C-D En esta zona se produce la disminución progresiva de la velocidad de caída y se denomina zona de "desaceleración o transición".

Zona D-E En esta zona los flocúlos ejercen presión sobre las capas inferiores, ya que estas se encuentran apoyadas entre sí, esta zona se llama "zona de compresión".

d) Decantación en Compresión de Lodos.

Dentro de este tipo de decantación, las partículas entran en contacto unas con otras y se depositan sobre las partes profundas; dentro de esta zona el fenómeno de consolidación es relativamente lenta. Este tipo de decantación se obtiene dentro de los espesadores de lodos por gravedad, en plantas de tratamiento de aguas residuales.

Para el presente estudio se hará referencia a la decantación por tratarse de las partículas del tipo "Floculentas" proveniente de la obtención con un coagulante químico: Sulfato de Aluminio y Cloruro Férrico.

2.2.2. Clasificación de unidades de decantadores.

De acuerdo a la clasificación realizada por Dégremont⁵, Empresa Francesa especializada en el desarrollo de tecnologías de tratamiento de aguas, cuyas aplicaciones se encuentran distribuidas en diferentes partes del mundo; realiza la siguiente clasificación:

⁵ Manual Técnico del Agua - 2007 Editorial Dégremont

a) **Decantadores Estáticos**, son aquellos que no tienen recirculación de lodos ni contacto de lodos, en este caso la decantación se realiza según el procedimiento dinámico, según la naturaleza de concentración de la materia en suspensión, volumen de precipitados a evacuar y de la pendiente del fondo de la unidad hidráulica. Estos pueden ser decantadores simples de flujo vertical sin arrastre de lodos del tipo troncocónico, decantadores de flujo horizontal con sistema de barre lodos y pueden ser circulares, rectangulares y otros.

b) **Decantadores de Contacto de Lodos**, entre estos se tienen a:

- Decantadores de Lecho o manto de Lodos (Pulsator, Pulsator Laminar, Superpulsator, etc.)
- Decantadores de Recirculación de Lodos (ACCELATOR, CIRCULATOR, TURBOCIRCULATOR, etc.)
- Decantadores Espesadores.

c) **Decantadores de Masa de Contacto Granular**, el mas conocido es el GYRAZUR, la diferencia esencial con los decantadores de contacto de lodos reside en la utilización de gérmenes de gran tamaño.

Decantadores de Contacto de Lodos

Según, Arboleda "Procesos de Tratamiento de Agua" La teoría de la decantación interferida se aplica a este tipo de unidades; se requiere una alta concentración de partículas para incrementar las posibilidades de contacto en un manto de lodos, cuya concentración debe oscilar entre 10 a 20%, señalado por Dégremont, en el Manual Técnico del Agua.

Según esto, en el proceso de decantación, el flóculo no conserva su peso, tamaño ni su forma constante, las partículas pequeñas que entran por el fondo son arrastradas por el flujo hacia la superficie o salida del decantador, al chocar estas con otras, incrementan su tamaño hasta adquirir un volumen tal que o se disgregan por el esfuerzo cortante, o suspenden su ascenso y caen chocando con las que suben.

El contacto entre las partículas se consigue por medio de la agitación lenta, lo cuál favorece a la formación y funcionamiento del manto de lodos además permite aprovechar el coagulante químico adicionado desarrollando reacciones secundarias que aumentan el tamaño de los flocs y el grado de colisión entre ellos; es decir que después del proceso de coagulación, el coagulante residual (ya sea hierro o aluminio) existente en el manto de lodos permite optimizar la coagulación-floculación de las partículas.

Según Derek la teoría para el diseño y operación de reactores de contacto con sólidos debe describir el proceso de floculación, la fase de sedimentación interferida y la retención de flocs finos por un proceso de filtración gruesa.

Debe también describir los complejos fenómenos hidráulicos, el tamaño cambiante de partículas y los efectos producidos por las alteraciones de las condiciones químicas y la calidad del agua cruda.

Hudson, Ives y Brown, y La Motta han derivado ecuaciones que muestran cómo la floculación depende del gradiente de velocidad, de la concentración de partículas y del tiempo, Ejemplo:

$$N_t = N_0 \exp[-GS_t/\eta] \quad \text{ec. (8)}$$

N_0 = número de partículas en el tiempo 0 (cero)

N_t = número de partículas en el tiempo t

G = gradiente de velocidad

S_t = concentración volumétrica de partículas

En el caso de sistemas completamente suspendidos el término de concentración es muy significativo y determina la eficiencia de este tipo de floculación, bajo este principio funcionan los decantadores Pulsator.

Para los sistemas totalmente suspendidos se ha trabajado mucho en establecer una relación entre el manto poroso y la tasa de flujo ascendente. Bond(4), Tesarik (5) y Brown y La Motta (3) han mostrado que para los sistemas

floculados la relación tiene la forma de la ecuación de Richardson y Kaki(6) en su trabajo de fluidificación general, ejemplo:

$$V = V_s P^n \text{ ec. (9)}$$

V = velocidad ascendente

V_s = velocidad de asentamiento de partículas individuales en sedimentación discreta.

P = porosidad

n = constante que depende de las condiciones hidráulicas y de la naturaleza de las partículas.

Según Brown y la Motta para suspensiones floculentas indicaron que esta constante era muy variable y tenían valores, en los sistemas estudiados desde 1.75 hasta 6.4.

Los decantadores con contacto de sólidos pueden trabajar con velocidades entre 2-8 cm/min (30 m³/m²/d a 120 m³/m²/d), el tiempo de retención varia entre 1,0 a 1,5 horas, la concentración de sólidos en el manto varia entre 10% a 20% del volumen y la altura del manto de lodos varia entre 1 a 3 m.

Los reactores de contacto de sólidos o decantadores de manto de lodos, presentan las siguientes ventajas:

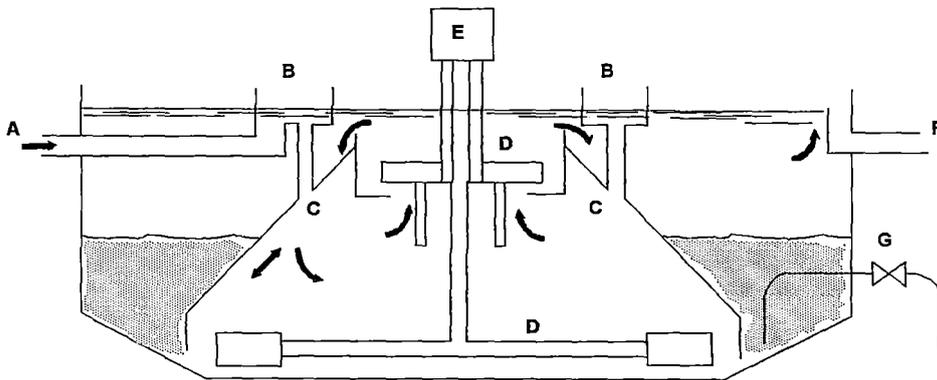
- mejora la floculación debido a la presencia del floc preformado.
- habilidad para tratar aguas con elevada cantidad de partículas en suspensión.
- la floculación es realizada en menor tiempo y con menor consumo de energía, ya que son realizados por lo general hidráulicamente.
- La presencia de una fase suspendida permite también la retención de partículas muy finas y el resultado total es el desarrollo de unidades compactas con incrementos sustanciales en la producción y costos de tratamientos reducidos.

Decantadores de recirculación de lodos

En los decantadores de recirculación, los lodos son separados del agua clarificada dentro de la zona de decantación. Estos son enseguida reciclados hacia una zona de mezcla provisto de una agitación mecánica (en el caso del decantador tipo Acclerator) o hidráulico (tipo Circulator), el agua cruda con reactivos químicos es igualmente introducido dentro de la zona de mezcla.

- **Decantador Aquazur (Acclerator)**, presenta una zona central de floculación rodeado de una zona de decantación. Estas zonas se comunican por la parte superior e inferior, la llegada de agua cruda se hace por las canaletas circulares situados alrededor de la columna central de mezcla.

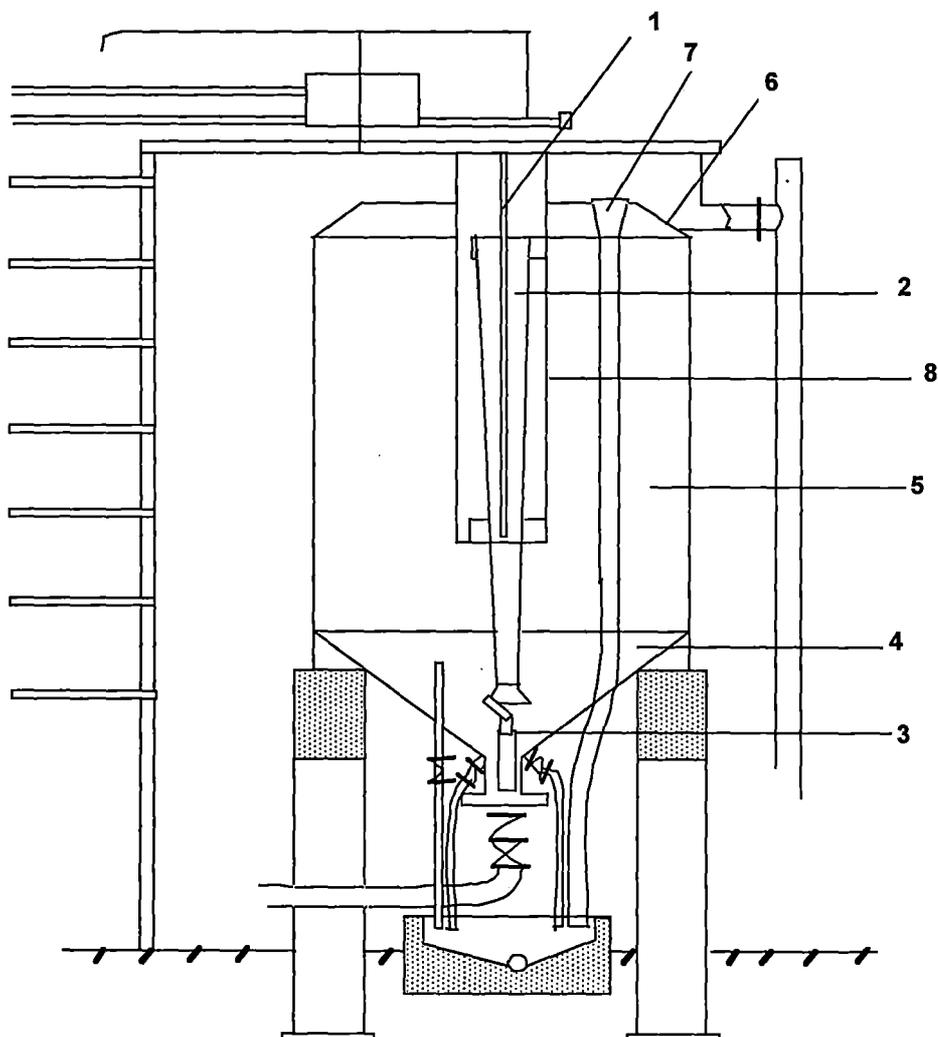
Fig. N° 5 Decantador Acclerator



- A: Entrada de agua cruda
- B: Canal de repartición de agua cruda
- C: Llegada de agua cruda al cilindro tronco cónico
- D: Turbinas de recirculación de agua y lodos de floculación.
- E: Grupo motor-reductor de turbinas.
- F: Salida de agua decantada
- G: Salida de lodos extraídos

- **Decantador Circulator**, tiene un dispositivo hidráulico que asegura la aceleración de las reacciones por circulación de los precipitados formados con los productos químicos, por lo general tienen un fondo cónico para ayudar a deslizar los lodos hacia el eyector que asegura la recirculación.

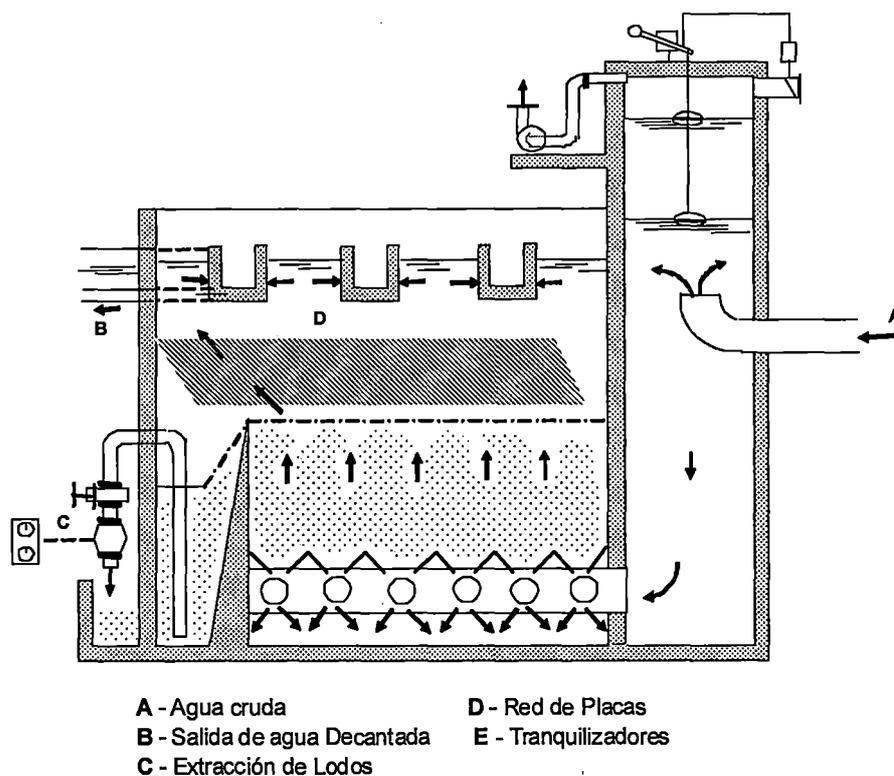
Fig. N° 6 Decantador Circulator



(1) Adición de reactivos
(3) Hidroyector.

(2) Zona de reacción.
(4) Concentrador de lodos.

Fig. N° 8 Decantador Pulsator de Placas



2.3. Decantador de Manto de Lodos del Tipo Pulsator ⁶

El decantador de manto de lodos del tipo Pulsator es una unidad hidráulica que permite velocidad ascendente hasta 8 m/h. Este decantador está constituido por un tanque de fondo plano provisto en su base de una serie de tuberías perforadas con orificios pequeños para la distribución del agua coagulada sobre todo el fondo del decantador.

El decantador Pulsator es un decantador de manto o lecho de lodos, cuyo principio de funcionamiento consiste en realizar una depresión en la campana mediante la aspiración de aire que ésta contiene. Esta operación provoca una subida progresiva del nivel de agua, cuando el nivel alcanza un valor comprendido entre 0.6 a 1.0 m., por encima del nivel estático de agua en el decantador, un contacto de nivel abre rápidamente una válvula de puesta a la atmósfera, produciendo la descarga del agua almacenada. La presión atmosférica actúa sobre el agua almacenada en la campana haciendo que esta se impulse a gran velocidad hacia las tuberías de distribución en el fondo del decantador. Esta acción se realiza en forma intermitente que produce una agitación que permite el contacto entre las partículas coaguladas, aumentando así el tamaño y volumen de estas, para formar una masa de lodos llamada "manto de lodos"

Este decantador es considerado también como decantador invertido por ser el sentido de flujo ascendente, o como decantadores de "lechos fluidizados" de manto de lodos que funciona en la zona inferior cerca a los tubos de distribución de agua ocupando aproximadamente un tercio de la profundidad total del decantador, seguido al mismo tiempo de la separación sólido – líquido que finaliza en los dos tercios de la profundidad del reactor. El exceso de lodos formado pasa a los concentradores para ser eliminados por medio de las válvulas de purgas accionadas en forma manual o automática.

En este tipo de decantadores, el manto de lodos suspendido obedece significativamente a la concentración de las partículas floculentas que la conforman y a su propia estructura (estable o inestable, compacto, o muy poroso), siendo este uno de los requisitos los que determinan la eficiencia de la floculación y decantación.⁷

La eficiencia del decantador de manto de lodos además es función del grado de compactación de los flóculos, de la profundidad, dosificación de coagulantes químicos y/o polímeros y de la carga superficial.

⁷ El Agua Potable – Decantación – PTT://www.fortunecity.es/felices/Andorra/51/decantación.htm

En estos decantadores existen 3 zonas claramente definidas, en donde las velocidades son diferentes:

zona de amortiguación, constituida por los deflectores, por lo general tienen 0,45 m. a 0.60 m. de altura.

zona de lodos comprendido entre el borde superior de la zona de amortiguación y el borde de los concentradores; la altura esta comprendida entre 1,30 m. y 1.50 m.

zona de aguas claras, por encima de los concentradores hasta las tuberías perforadas de recolección. La velocidad es decreciente de abajo hacia arriba, y varía con el tiempo durante los períodos de expansión y contracción del manto.

2.3.1. Elementos del Decantador Pulsator

El ingreso de agua a los decantadores.- se realiza a través del canal colector general situado en la parte inferior o en el fondo del decantador y es de gran sección tal que la pérdida de carga sea menor y que las variables hidráulicas se mantengan en equilibrio para el funcionamiento del manto de lodos.

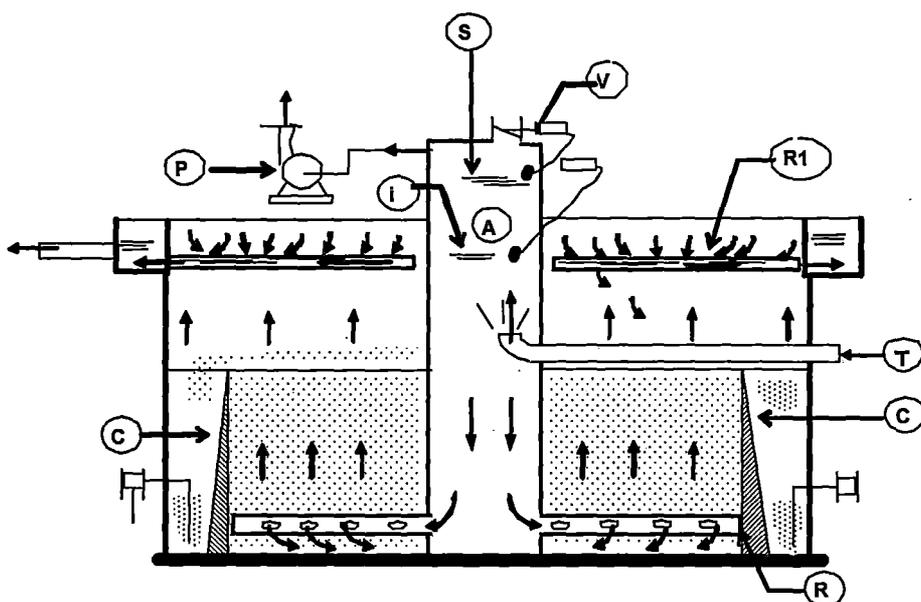
La alimentación de agua coagulada al canal colector se realiza en forma intermitente, que consiste en almacenar durante un cierto tiempo un cierto volumen de agua en la campana de vacío para luego hacer ingresar rápidamente al decantador.

A este canal se encuentran conectadas una serie de tuberías radiales con orificios, que se encuentran distribuidos a todo lo largo de este canal y en toda la superficie del fondo del decantador, estos orificios son calculados tal que se produzca el manto de lodos.

Las tuberías perforadas están cubiertas parcialmente por deflectores en forma de "V" invertida que impiden que la turbulencia brusca creada por las pulsaciones se propague hacia el manto de lodos, además permiten distribuir el agua coagulada uniformemente por todo el fondo del decantador durante cada vaciado de la campana. Conocida como zona de amortiguación.

Cuando la velocidad del flujo es excesiva se presenta alteración en la zona de entrada, esto puede deberse a que los orificios de entrada tienen tamaños pequeños o mala distribución de los orificios, etc.

Fig. N° 9 Decantador de Manto de Lodos del Tipo Pulsator



Siendo:

- (A) Campana de vacío.
- (C) Concentradores de lodos.
- (R) Ramificaciones de Tuberías de Distribución.
- (R1) Colectores de recolección de agua Decantada.
- (P) Bomba de Vacío
- (T) Llegada de agua cruda.
- (V) Válvula de puesta a la atmósfera.
- (I) Nivel de agua en la campana de vacío h_c .

Zona de manto de lodos.- El manto de lodos formado por los microfloculos y floculos provenientes del proceso de coagulación, se ubica entre los deflectores de las tuberías de distribución de agua y el borde o vertedero de los concentradores de lodos, como se observa en la Fig. N° 9, este manto se caracteriza por ser un lecho de lodos homogéneo que se encuentra sometido a movimientos alternos, simulando movimientos de abajo hacia arriba durante cada vaciado de la campana y de arriba hacia abajo durante cada periodo de reposo, estos movimientos son producidos por el accionamiento del sistema de pulsaciones.

Zona de Concentración de Lodos o Concentrador de Lodos.

La zona de acumulación de lodos "Concentrador de lodos", se comporta tal como si se colocará un recipiente en el lecho de lodos que funciona con expansión producida por una corriente de agua ascensional; esto es fácilmente comprensible ya que dentro de dicho recipiente no circula el agua y no existe fuerza alguna que tienda a mantener el lodo en expansión; sucede como si el recipiente constituyese una zona de débil presión, mientras que en el resto del decantador existe una presión mas elevada.

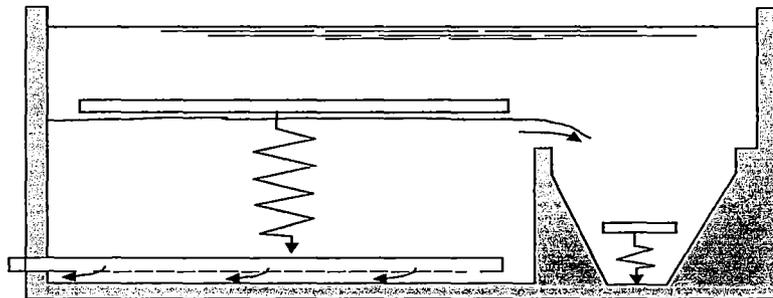
Por lo tanto, el manto de lodos en exceso pasa rápidamente de la zona de alta presión a la zona de baja presión, esta unidad como se mencionó constituye el concentrador desde donde el lodo es evacuado o descargado. La representación esquemática se puede observar en la siguiente figura N° 10

Cuando el nivel del manto de lodos alcanza un cierto valor es necesario evacuar o eliminar el exceso hacia el desagüe o a la planta de tratamiento de lodos. Para lo cual se reserva una zona en el decantador en el que se disponen unos compartimentos de paredes y fondo inclinados (C), donde se recogen y se concentran los lodos, de estos concentradores se realizan las purgas de manera intermitente mediante válvulas automáticas (F) ver fig. N° 9 accionadas por dispositivos tipo relojería .

Los concentradores presentan las siguientes ventajas:

- ✓ Un exceso de purgas puede dar lugar a una disminución de la concentración del manto de lodos.
- ✓ La disposición del lodo consiste en la ausencia de todo sistema de agitación mecánica de lodos que pueda producir el rompimiento de los flocúlos ya formados.

Fig. N° 10 Representación del Funcionamiento del Concentrador de Lodos



Zona de Decantación.

El agua que atraviesa el manto de lodos pasa a una zona de mayor área transversal donde la velocidad ascensional disminuye aproximadamente en 30 %, lo cual hace que las partículas que constituyen el manto de lodos no tienen la posibilidad de ascender, para lo cual es necesario tener en cuenta las condiciones de operación de la unidad. Es preferible tener flujo laminar estable; la presencia de flujo pistón mejora el proceso, lo que quiere decir que el agua debe permanecer el tiempo de retención **requerido por el decantador**. Esta zona también es denominada zona de aguas clara.

Salida del agua del decantador.

La parte superior del decantador tiene una serie de tubos perforados o de canaletas perforadas distribuidas en toda la superficie del decantador, que toman el agua decantada en forma uniforme, evitando toda irregularidad de la velocidad en las diferentes partes del decantador. Es a la salida del decantador que se miden los diferentes parámetros fisicoquímicos con los cuales se determinan los correspondientes porcentajes de remoción en relación al contenido de los mismos en el agua de entrada.

Siendo la **turbiedad del agua decantada**, el parámetro operacional más importante del proceso de decantación, ya que indica finalmente que el manto de lodos funciona correctamente y que las impurezas del agua han sido removidas en aproximado el 70% respecto a su contenido inicial en el agua cruda o entrada al decantador.

Sistema de Pulsaciones.

Para alimentar el canal colector inferior de la campana de una manera discontinua pueden emplearse diferentes medios; todos consisten en almacenar agua coagulada durante un tiempo determinado en la campana y luego se hace ingresar al colector de la forma más rápida posible.

Este sistema esta formado por la campana de vacío, sistema eléctrico y equipos electromecánicos, como: válvula de puesta a la atmósfera y extracción de aire: bomba de vacío o compresor, sistema de control de nivel de agua en la campana con dispositivo de detección automática.

El procedimiento mas conocido para producir las pulsaciones (fig. N° 9) consiste en hacer ingresar agua coagulada en la campana (A), en cuyo interior se aspira el aire de la campana por medio de un equipo mecánico (P), que puede ser una bomba de vacío o compresor o ventilador que extrae un caudal de aire igual a la mitad del caudal máximo de agua a tratar, produciendo una presión negativa que eleva el nivel de agua dentro de la misma, nivel que es previamente regulado por

medio de un flotador con interruptor eléctrico, se accionan en función a los niveles (S) e (I) del agua contenida en la campana.

En estas condiciones el nivel de agua aumenta progresivamente en la campana hasta alcanzar el nivel regulado por encima del nivel estático del agua en el decantador, se efectúa entonces, la apertura brusca de la válvula (V) de comunicación de la campana con la atmósfera accionado por medio de un sistema eléctrico tal como un releé eléctrico, La presión atmosférica entonces actúa sobre el agua almacenada en la campana, produciendo el vaciado o descarga de ésta y penetrando el agua a gran velocidad en el decantador a través de los tubos de distribución.

En estos decantadores se regulan las frecuencias de pulsaciones, generalmente de forma que, el vaciado de la campana se efectúa de 5 a 20 s (segundos), mientras que la duración de su llenado es de 20 a 40 s.

La velocidad de vaciado de la campana (A) puede ser fácilmente regulada por medio de una válvula manual colocada en la tubería de comunicación a la atmósfera. Este vaciado debe ser suficientemente rápido para evitar que se depositen fangos en el fondo del decantador, pero no excesivamente rápido ya que se producirían turbulencias en la zona de agua decantada.

Cuando el nivel de agua en la campana después de la descarga se sitúa entre 10 a 20 cm., por encima del nivel estático del agua en el decantador, se cierra la válvula de puesta a la atmósfera y se repite el ciclo.

2.3.2. Proceso de Decantación en Decantador de Manto de Lodos del Tipo Pulsator

Para la decantación de las partículas provenientes de la coagulación en el Decantador Pulsator, se requieren:

Primero: desarrollo de la floculación en el manto de lodos.

Utilizando como floculador el manto de lodos; en los decantadores Pulsator, el agua cruda descargada al fondo, produce cierta turbulencia, necesaria para la floculación, esa turbulencia es gradualmente disipada en el manto de lodos, provocando la tendencia a sedimentar en sentido contrario al flujo del agua, este proceso causa aglutinación de flóculos por contacto entre ellos. Con el aporte de nuevas partículas coaguladas traídas por el agua, el manto tiende a aumentar su altura y concentración, vertiendo el exceso de lodos hacia el concentrador cuando el manto se expande; desde donde es drenado periódicamente a través de una válvula accionada manualmente o por un equipo temporizador, a fin de mantener la concentración óptima del manto de lodos y su estabilidad.⁸

Durante la ejecución de las pulsaciones, los flóculos conforme van aumentando de tamaño y peso se van aglomerando y a su vez decantando, presentándose así, **la decantación interferida o frenada**, dada la alta concentración de partículas floculentas que vienen acumulándose en el manto de lodos. En la aglomeración y decantación simultánea y secuencial de las partículas floculentas, es donde se realizan las diferentes interacciones físicas y químicas, que permiten remover o eliminar las impurezas físicas o químicas que contiene el agua, realizándose la clarificación del agua, cuya eficiencia dependerá de los factores que determinan la condición de equilibrio hidráulico del manto de lodos.

⁸ Cap. VII Floculación Ente Nacional de Obras Hídricas de Saneamiento ENOHS (la misma denominación es dada también a unidades de filtración directa de flujos ascendentes "filtros rusos")
A

Esta condición de equilibrio requiere del control de las variables de velocidades tanto de desplazamiento ascensional, como de sedimentación para la separación de las impurezas del agua bajo la forma de partículas floculentas; siendo este control, un tema de interés técnico muy importante cuando se operan los decantadores de manto de lodos; con los cuáles se conseguirán una eficiente separación de los flóculos, eliminación de nubes de partículas floculentas en la superficie del decantador y en general optimizará el funcionamiento del decantador.

Los floculadores de manto de lodos son controlados por la concentración de sólidos C . como esta varía continuamente es necesaria una atención constante durante la operación.

Los criterios generales para la realización de la floculación en estos floculadores son los siguientes:

- CGT entre 60 y 120
- $C = 0,05$ a $0,20$ en promedio $C = 0,15$
- Tiempo de floculación (depende de la profundidad del manto) $5 < T < 15$ min.
- Gradiente de velocidad (depende de la concentración y densidad de los flóculos) $G < 5 \text{ s}^{-1}$
- Profundidad del manto $1 < h < 3$ m. (media 2 m.)

Estabilidad de los flóculos, a medida que el floculo aumenta, su densidad disminuye y el floculo se vuelve mas sujeto a las tensiones de cizallamiento hidrodinámico generadas por los gradientes de velocidad.

Cuanto mayor es el gradiente de velocidad más rápida es la velocidad de aglutinación de las partículas, por lo tanto los flóculos aumentarían hasta un límite máximo, arriba del cuál las fuerzas de cizallamiento los rompen en partículas menores. El tamaño máximo de un flóculo en mm. Sería :

$$d_{\max} = C/G^n \quad \text{ec. (10)}$$

Expresión derivada de diferentes investigadores (Lagvankar, 1968; Kaufman, 1972; Tambo, 1979) donde el exponente depende de la microescala de turbulencia.

La expresión anterior refuerza la práctica y demuestra las ventajas de una floculación escalonada o en cascada, con gradientes de velocidad decrecientes entre el comienzo y la finalización del proceso de floculación.

Soucek e Sindelar (1967) mostraron que la rotura de los flóculos se caracteriza por las condiciones de turbulencias, que definen el número S, que es la inicial de los autores.

$$S = G.Re^{-0,5} \text{ ec. (11)}$$

S por debajo de 1,3 la rotura resulta despreciable. El cloruro férrico para agua alcalina y # de Camp $Ca = 400000 S < 0,7 \text{ s}^{-1}$, para aguas de baja alcalinidad con sulfato de aluminio se sugiere un valor como $S < 0,3 \text{ s}^{-1}$

En la **práctica** se utiliza el criterio de aplicar el menor gradiente posible en los floculos formados menor a 30 s^{-1}

De acuerdo con Ives (1968), en reactores de manto de lodos, el producto CGT se encuentra entre 60 y 120, pudiéndose considerar 100 un valor de referencia y la concentración del manto C entre 0,05 - 0,20, tomando los límites el producto $GT = C$ resulta entre 300 y 2400 tomando como referencia de 1500.

A través del control operacional de CGT la eficiencia del proceso se modifica, destacándose lo siguiente:

- Las aguas de poca turbiedad con baja dosis de coagulante necesitan GT mas elevado siendo mas bajo para aguas de mayor turbiedad. Como T esta en función del caudal tratado en un volumen fijo del tanque de floculación, las aguas de baja turbiedad necesitan un gradiente mas elevado que las aguas de alta turbiedad, como la turbiedad puede variar entre límites muy amplios en una misma unidad se debe prever la posibilidad de variar el gradiente de velocidad.

- Cuando el tiempo de floculación y la dosis óptima de coagulante están fijados en base a la calidad del agua cruda, el problema reside en determinar el valor óptimo de G que produce una turbiedad residual mínima. Estudios realizados por Villegas y Letterman(1976) indicaron, para **Sistemas Convencionales**, que:

$$(G^*)^{2.8} D. T = 4,4. 10^6 \quad \text{ec. (12)}$$

G^* : gradiente de velocidad óptimo (s^{-1})

D : dosis de coagulante (mg/l)

T : tiempo de floculación (min.)

Segundo: sedimentación diferencial

Además de la floculación pericinética y ortocinética que se presenta en el manto de lodos, se debe considerar un tercer proceso de colisión; se debe considerar cuando los flóculos de diferentes tamaños están presentes, por ejemplo en una unidad de sedimentación y en particular en una unidad de clarificación de manto de lodos, donde existe una sedimentación diferencial o sea dónde las partículas de diferentes tamaños y densidad tienden a sedimentar con diferentes velocidades. La diferencia de velocidad es tanto mayor cuanto mayor es la diferencia de tamaños. Con grandes concentraciones de flóculos el proceso se asemeja a la filtración, proporcionando una gran oportunidad de contacto entre las partículas.

En base a consideraciones teóricas y comprobadas por ensayos experimentales por Tambo (1979) a partir de la ecuación de Smoluchowski, ec. (13).

Ecuación (13)

$$\lambda \frac{\partial n}{\partial x} + D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} = \frac{\partial n}{\partial t}$$

Donde n es la concentración de partículas de soluto en un punto x del medio, en un instante t determinado, D es el coeficiente de difusión, y λ se denomina velocidad de arrastre.

Y admitiendo la validez de la ecuación de Stokes para la sedimentación, estableció la siguiente relación:

$$N/N_0 = e^{-9/2 C \cdot h / (D^2/d)} = e^{-4,5 C \cdot h / D(D/d)} \quad \text{ec. (14)}$$

Donde D y d son los diámetros de los flóculos ($D \gg d$), C la concentración volumétrica de flóculos y h la profundidad de la capa de flóculos. De esta ecuación se concluye que la eficiencia de un reactor en manto de lodos será más eficiente cuando:

- Mayor sea la concentración de flóculos y la altura del manto, lo suficiente para que no haya un pasaje exagerado de flóculos hacia los filtros.
- Mayores fuesen D y la relación D/d .

En esta última conclusión Tambo (1979) sugiere que los reactores de manto de lodos tienen un aumento significativo en su eficiencia con la introducción de una pre-cámara de floculación, con un corto periodo de detención y relativamente intensa agitación que incrementa el tamaño de los flóculos.

2.3.3. Factores que Permiten la Formación y Funcionamiento del Manto de Lodos.

Durante la formación y funcionamiento del manto de lodos es importante tener en cuenta la calidad de los flóculos que lo conforman, para esto en la operación del decantador Pulsator se debe tener en cuenta los siguientes factores:

- Aplicación de Insumos Químicos: coagulante y/o polímero
- Caudal de tratamiento
- Regulación del sistema de pulsaciones y extracción de lodos
- Concentración de lodos
- Altura del manto de lodos
- Gradiente de Velocidad
- Otros relacionados a la remoción de las impurezas del agua cruda: turbiedad, componentes químicos y biológicos.

2.3.3.1. Aplicación de Insumos Químicos: Coagulante y/o Polímero.

Para la formación del manto, primero se debe tener en cuenta **formación del floc o flóculos** que se consigue con la dosificación de coagulantes químicos y/o polímero (sales metálicas de hierro, aluminio, otros) en el proceso de **Coagulación**, el resultado de este proceso vienen a ser los diferentes hidróxidos por ejemplo hidróxido de hierro o hidróxido de aluminio, luego se produce formación del manto de lodos por la aglomeración de los flóculos y la suspensión del manto por el efecto de pulsaciones.

Durante la puesta en marcha del decantador

En la puesta en marcha de cualquier decantador Pulsator, este no contiene todavía los flóculos necesarios para formar el manto de lodos, por lo que al inicio de la formación del manto de lodos es necesario que, la velocidad de reacción de la cinética de reacción entre el coagulante y los componentes del agua, sea lo más rápida y completa posible, lo cual se consigue agregando mas coagulante.

Operación normal

Esta condición se presenta cuando hay manto de lodos donde la cantidad de coagulante corresponde al valor obtenido en los ensayos de jarras.

La aplicación de polímeros, por lo general la dosificación se realiza para mantener la estabilidad del manto de lodos cuando sea necesario (especialmente cuando la turbiedad del agua a tratar corresponde a los valores de turbiedad extremos es decir muy baja o muy alta), la dosis recomendada en estos casos es muy pequeña oscila entre 0.10 p.p.m a 0.50 p.p.m (partes por millón o milgramos/l).

La eficacia de la aplicación de las dosis de coagulantes y/o polímeros se mide a través de la **estabilidad o resistencia de los flóculos** del manto de lodos, para esto es necesario medir el **coeficiente de cohesión de lodos K^9** , siendo el rango de medición aceptable entre 0.8 a 1.2 el valor ideal es 1.0, valores por encima del rango especificado significan que los flocs se pueden desprender del manto de lodos, cuando los valores están por debajo del rango, se observa escasez de partículas.

Por lo tanto la reacción química de los coagulantes con el agua fue incompleta, demostrando que las cantidades aplicadas de los insumos químicos fueron insuficientes, siendo necesario el ajuste de la dosis.

2.3.3.2. Caudal de tratamiento

Dentro del decantador de manto de lodos al hacer circular el agua de abajo hacia arriba, cada partícula esta sometido de una parte, a la fuerza de la gravedad y de otra parte a la fuerza de frotamiento debido al paso de fluido; esto resulta en un equilibrio, definiendo una velocidad límite: si la velocidad ascensional del fluido es inferior a esta velocidad límite, entonces la partícula tiene tendencia de decantar "reposo", y si la velocidad ascensional del fluido es superior, entonces la partícula tiene tendencia a ser transportado hacia la parte superior por el líquido.

⁹ para un lodo bien constituido de decantación rápida el valor del coeficiente K puede alcanzar de 0,8 a 1,2 Métodos y medios de Análisis – Manual Técnico del Agua Dégrement 1973, 1989 y 2007

El buen funcionamiento de un reactor a manto de lodos está condicionado por:

- una buena repartición del caudal del fluido en la base del reactor.
- Un material de contacto homogéneo y resistente a la abrasión.

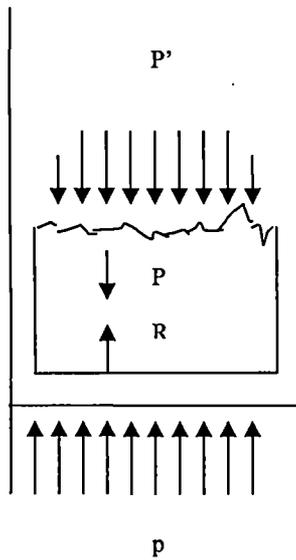
Durante la operación del decantador, la repartición o distribución del caudal de agua en el fondo dependerá también de cuan bien se hayan regulado los tiempos dentro del sistema de pulsaciones.

1ro Para pequeños caudales de corriente de agua, el manto de lodos se mantiene casi fijo es decir estático y es atravesado fácilmente por el agua que sube a una cierta disminución de presión o pérdida de carga, este fenómeno es semejante a aquel flujo que es realizado por ejemplo dentro de un tubo.

Esta pérdida de carga es debido: al rozamiento del agua con las partículas que forman el manto de lodos "flóculos" y de otra parte a aquellas sinuosidades impuestas a cada masa de agua provocada por la presencia de flóculos.

En general se considera despreciable el rozamiento del agua con las paredes del decantador con relación a las dimensiones de los flóculos.

Se nota que la caída de presión no puede sobrepasar un cierto valor, en efecto se analizan las fuerzas que agitan el lecho de lodos y el agua que aprisiona en un momento cualquiera, es despreciable siempre la pared del recipiente, las fuerzas verticales se reducen a 3 ver Fig. N° 11., en esta figura la sección transversal es S.



- Una fuerza de presión producto del agua de la sección recta S, representado por la disminución de presión $p-p'$
- El peso del floculo P (siendo el peso del agua despreciable)
- La reacción R del material de soporte de los floculos., Dirigido hacia arriba, se considera despreciable la fuerza de frotamiento de las paredes de los recipientes.

Fig. N° 11

2do para grandes caudales de corriente de agua, en este caso las partículas están entrampados dentro del sentido de corriente, se escapan así de la columna. En este caso los floculos que se escapan son rodeados de una masa de agua donde la velocidad que alcanzarían las partículas si cayeran aisladamente dentro del agua es superior al estado considerado. Esta velocidad de caída aislada es conocida como velocidad "límite" teniendo en cuenta las características del floc y del agua (densidad, diámetro de la partícula, viscosidad del fluido). Estos están dados por las fórmulas de Stokes, Allens y Newton.

Cada partícula se encuentra así, arrastrado con una velocidad que es la diferencia entre la velocidad local del agua de dicha partícula y la velocidad límite. Se nota por otra parte que por poco que las partículas sean relativamente numerosas en el sentido de la corriente de agua, la velocidad local del fluido es prácticamente imposible de determinar.

3ro. Entre estos dos casos de dominio extremos, se puede imaginar que la corriente de agua, en el cual la velocidad del agua permanece en todos los puntos, inferior a la velocidad límite de las partículas floculentas, pero es sin embargo suficiente para conferir a estas partículas una cierta energía cinética.

La optimización de un decantador de flujo ascendente supone el cálculo de flujo máximo Q a aquel corresponderá una velocidad V y una concentración C .

2.3.3.3. Concentración de Lodos

Por lo general la concentración del manto de lodos va disminuyendo conforme el agua asciende desde el fondo hasta el nivel del vertedero del concentrador de manto de lodos, por lo que es de esperar que en los primeros 50 cm de la altura del manto la concentración es el mas alto que en las capas intermedias y en la capa superior.

Cuando a un lecho de partículas floculentas se le inyecta un flujo ascendente con velocidad V , si esta velocidad es menor que la velocidad de descenso de la interfase V_i ($V < V_i$) no se produce expansión y el lecho permanece en reposo.

Si hacemos que $V > V_i$ el manto se expande paulatinamente disminuyendo en el la concentración C de partículas y aumentando la porosidad "*Proporcion de vacíos existentes expresada como $P = (1-C)$* **Sedimentación – Diseño. Teoría, Diseño y Control de los Procesos de Clarificación del Agua. T 13. OPS – CEPIS**" hasta hacer $V \approx V_i$ momento donde la expansión cesa y la interfase mantiene la posición adquirida, mientras no cambie la temperatura ni la densidad de las partículas. Durante este proceso, fragmentos de flóculos pueden ser arrastrados por las fuerzas de fricción hasta llegar a las canaletas de salida de agua.

Sí la velocidad V se incrementa mas, la expansión aumenta proporcionalmente hasta llegar a un punto en el cual el manto se rompe y supera la velocidad de fluidificación y es arrastrado por el flujo ascendente del agua. Sí antes de llegar a este límite se disminuye la velocidad V , aumenta la concentración C y disminuye la porosidad $p = (1-C)$ con lo que la interfase desciende hasta hacer $V \approx V_i$.

Se deduce así, que los "floculos" en el manto están en un estado de **equilibrio inestable**, que depende de la concentración C de las partículas suspendidas. Cualquier variación de esta concentración se traduce en un ascenso o descenso

de la interfase con mayor o menor arrastre de flóculos en el efluente del decantador.

como $V_d = V / p$ entonces $V = V_d \times p$

Cuando hay equilibrio, la velocidad intersticial V_d debe ser igual a la velocidad de descenso no interferido de los sólidos V_s ($V_d = V_s$) y por consiguiente:

$$V = V_s \times p = p [(4/3)(g/C_D)(\rho_s - \rho)d/\rho]^{1/2} \text{ ec. (15)}$$

$$V = (1 - C) [(4/3)(g/C_D)(\rho_s - \rho)d/\rho]^{1/2} \text{ ec. (16)}$$

Teniendo en cuenta que $p = (1-C)$ e introduciendo un coeficiente de forma K , tenemos:

$$V = V_s (1-KC) \text{ ec. (17)}$$

La ecuación (17) es la de una línea recta que pasa por el origen cuando $KC = 1$, sin embargo Richardson y Zaki trabajando con suspensiones discretas tales como esferas de vidrio, encontraron una relación exponencial entre la porosidad del lecho suspendido y la velocidad ascensional $V = Q/A$, así:

$$V = V_s p^n = V_s (1-C)^n \text{ ec. (18)}$$

Según Brown y La Motta esta expresión empírica se puede aplicar a suspensiones floculentas, por lo menos para las velocidades de trabajos usuales.

Una expresión similar fue deducida por Bond considerando la concentración C como función de área/volumen y partiendo del principio de que todas las partículas están colocadas por tamaños en planos horizontales. Siendo el área proporcional a $n^2 d^2$, donde n es el número de partículas y d el diámetro, y el volumen proporcional a $n^3 d^3$, se encontró que:

$$V = V_s (1-f C^{2/3}) \text{ ec. (19)}$$

En donde f es el factor de forma, que Bond hace igual a 2.78 para floc de hierro y de aluminio.

Despejando C en la expresión anterior tenemos la expresión derivada por Rouse quién define la concentración C como la diferencia entre los pesos específicos de la suspensión y la del fluido solo.

$$C = (1/f)^{3/2} (1-V/V_s)^{3/2} \text{ ec. (20)}$$

$$C = A (1 - B V / V_s)^{3/2} \text{ ec. (21)}$$

Bond determinó los valores de A y B para un grupo de sustancias floculantes, aplicables a las ecuaciones (20) y (21):

Para Floc de Aluminio	:	$A = 0,17$
Para Floc de Calcio y Magnesio	:	$A = 0,27$
Factor de proporcionalidad B para arena	:	$B = 1$

Se observa el incremento de la porosidad con la velocidad ascensional, no es lineal en términos generales; sin embargo para velocidades entre 4,2 y 8,4 cm/min esta proporcionalidad puede tomarse como lineal.

Tanto la expresión de Richardson y Zaki como la de Bond se ajustan a los datos experimentales dentro de dicho intervalo de velocidades, sin embargo la ec. (18) es poco sensible a los cambios de la concentración C especialmente para exponentes de n mayores que 3.

Por lo tanto las ecuaciones (20) y (21) de Rouse-Bond son mas aplicables para explicar el fenómeno de C .

2.3.3.4. Altura del Manto de Lodos

La altura es una característica que posee el manto de lodos, se define como el espacio en el cual se produce el desarrollo de los microflocs hasta la obtención de flóculos con tamaño y peso mas altos que faciliten la separación del agua; cuanto mas altura ocupa el manto, mejor es la remoción de las impurezas fisicoquímicas del agua (bajo la forma de flóculos), ya que en este espacio el contacto entre ellos es mas frecuente por lo tanto aumentan de tamaño y peso que les permite decantar fácilmente y el porcentaje de remoción las impurezas fisicoquímica y biológica del agua que presenta el valor mas alto de porcentaje de remoción. En cambio, cuanto menos altura tiene el manto, el efecto del desarrollo y separación de los microflocos es menor que se refleja especialmente en el valor de la turbiedad residual elevada que deja el decantador.

La altura del manto de lodos esta asociada con la concentración del manto de lodos y las características del flujo proporcionadas por el sistema de pulsaciones que comprende la altura de agua en la campana de vacío h_c y la calibración de los tiempos T1 y T2, para el caudal que se está tratando.

Es recomendable que la altura del manto de lodos alcance el valor máximo establecido (por lo general varia entre 1.20m. a 1.60 m).

2.3.3.5. Gradiente de Velocidad

El gradiente de velocidad está expresado como la diferencia de velocidades $u_2 - u_1$ que se presentan entre 2 puntos, z_1 y z_2 separados por una distancia dz , Fig. N° 12 lo que indica que existe un gradiente de velocidad du/dz que caracteriza la tasa de deformación del fluido, se sabe que por la mecánica de fluidos, que el esfuerzo cortante τ entre dos láminas de fluido de área A que se deslizan una sobre otra con una fuerza F , es igual a:

$$\tau = F/A = \mu du/dz \quad \text{ec. (22)}$$

Según Camp y Stein, la potencia consumida P por unidad de volumen para transportar un fluido es igual a:

$$P = \tau \, du/dz \quad \text{ec. (23)}$$

Reemplazando el valor de τ en la ecuación (23)

La Potencia es: $P = \mu \, [du/dz]^2 \quad \text{ec. (24)}$

Donde du/dz : gradiente promedio para la masa de agua: G

En la ec. (24) $P = \mu \, G^2 \quad \text{ec. (25)}$

Por lo tanto $G = \sqrt{P / \mu} \quad \text{ec. (26)}$

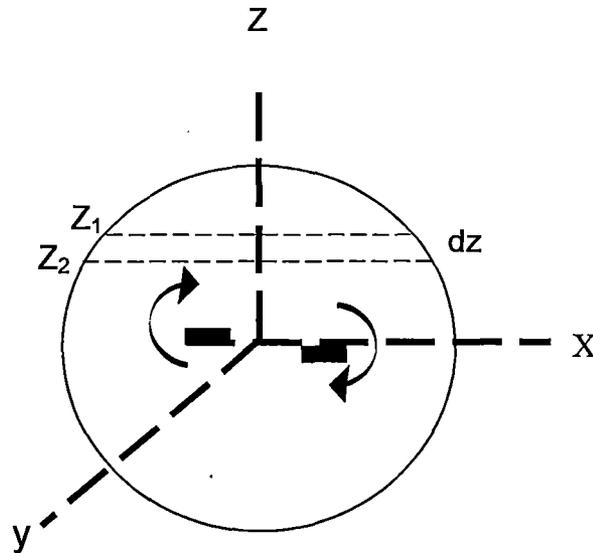
Para el caso en que la potencia P consumida para producir la turbulencia es hidráulica, el trabajo efectuado para distorsionar las líneas de flujo es el producido por la fuerza de energía denominada pérdida de carga; por lo tanto la potencia disipada en los floculadores hidráulicos, se calcula según Camp, así:

$$P = \dot{V} \, h_f / t_r \quad \text{ec. (27)}$$

Y

$$G = \sqrt{[\dot{V} \, h_f / t_r \, \mu]} \quad \text{ec. (28)}$$

Fig. N° 12 Líquido Sometido a una Agitación



En el trabajo desarrollado por el Ente Nacional de Obras hidráulicas de Saneamiento de Agua ENOSHA documento de "Floculación Capítulo 7" se menciona que el **gradiente de velocidad** en la floculación en el manto de lodos esta dado por:

$$G = (\rho \times g / \mu)^{1/2} \left(\frac{C}{1 - C} \right) \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) \times V_o \quad \text{ec. (29)}$$

$V_o = Q/A$ es la velocidad o carga de escurrimiento superficial ($m \cdot s^{-1}$) siendo A el área horizontal del clarificador y ρ_s es la densidad de los floculos ($kg \cdot m^{-3}$), ρ es la densidad del agua ($kg \cdot m^{-3}$), μ viscosidad en $Ns \cdot m^{-2}$, C es la concentración del manto de lodos.

Según esta ecuación el gradiente de velocidad solo depende de la concentración y de la densidad de los floculos, la cual aumenta con el uso de auxiliares de coagulación que dan peso a los floculos como son: polímeros, bentonita y mas recientemente la magnetita. Un incremento en la concentración tiende a

desestabilizar el manto de lodos, arrastrando flóculos hacia los filtros, esto puede solucionarse aumentando la densidad del manto con la utilización de un polímero.

Según el modelo de floculación desarrollado por Argaman y Kaufman (Físicos Norteamericanos) que expresa el mecanismo de colisión entre las partículas floculentas suspendidas en el agua en un fluido turbulento. Este modelo fue basado en la hipótesis de que el movimiento desordenado de tales partículas podría estar caracterizado por un coeficiente de difusión, el cual fue expresado en términos del espectro de energía del campo de turbulencia, desarrollando la siguiente ecuación de floculación para una unidad de flujo continuo, que se aplica por lo general en el tratamiento de agua utilizando los sistemas convencionales en los que intervienen los equipos electromecánicos para la floculación.

Ecuación (30)

$$\frac{n_1^0}{N_1^m} = \frac{(1 + K_A G T/m) i}{1 + K_B G^2 T/m \sum_{i=0}^{i=n-1} (1 + K_A G T/m) i}$$

Donde:

K_A : constante de aglomeración esta en función de las características del sistema de agitación y del tipo de floculador.

K_B : es la constante de ruptura expresada en s^{-1}

T : tiempo de retención (s)

G : gradiente de velocidad expresada en s^{-1}

n_1^0 : concentración inicial de partículas que ingresan a la cámara

N_1^m : concentración de partículas en la cámara final

El efecto del espectro de turbulencia esta expresado como el gradiente de velocidad, para un tiempo de retención dado la eficiencia se incrementa en forma casi lineal con el gradiente de velocidad hasta que éste alcanza un valor máximo, mas allá de cualquier cambio adicional resulta en una disminución de la eficiencia.

La mayor parte de los trabajos realizados con el objeto de verificar los factores que influyen en el transporte de las partículas, destacan:

- Impacto Inercial, durante el escurrimiento, las líneas de corriente divergen al estar cerca de los flóculos del medio filtrante, de modo que las partículas suspendidas con cantidad de movimiento suficiente para mantener su trayectoria colisionan con otros flóculos.
- Intercepción, las partículas pequeñas suspendidas son retenidas en el medio filtrante "manto de lodos" formado por flóculos más grandes y consistentes.
- Sedimentación, el efecto de gravedad sobre las partículas suspendidas sedimentan dentro de las pequeñas unidades de sedimentación, que en el caso del manto de lodos viene a ser los poros formados entre los flóculos.
- Difusión, las partículas suspendidas más pequeñas presentan un movimiento errático, como resultado del bombardeo intenso por las moléculas del agua, conocido como movimiento Browniano y es debido a la acción de la energía termodinámica.
- Acción Hidrodinámica, la Remoción de partículas floculentas de tamaño relativamente grande ($10\mu\text{m}$) es atribuida a la acción hidrodinámica, mostrada en la Fig. N° 13

La Comprensión de este mecanismo se facilita cuando se considera un escurrimiento donde el gradiente de velocidad es constante. Una partícula suspendida en un fluido que escurre en estas condiciones, estará sometida, como se muestra en la Fig. N° 14, a velocidades tangenciales variables en dirección perpendicular a la del escurrimiento.

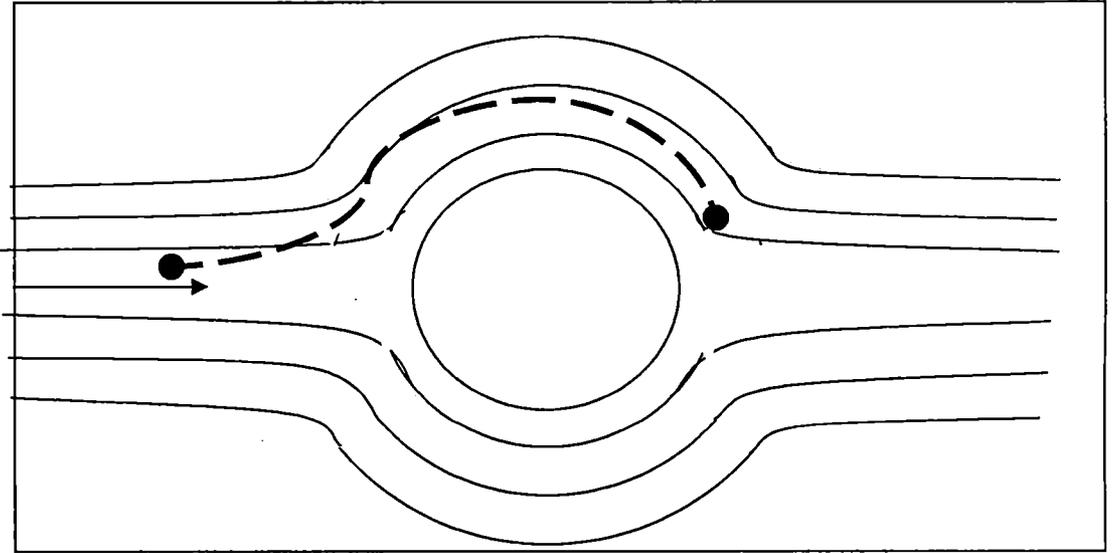


Fig. N° 13 Mecanismo de Acción Hidrodinámica

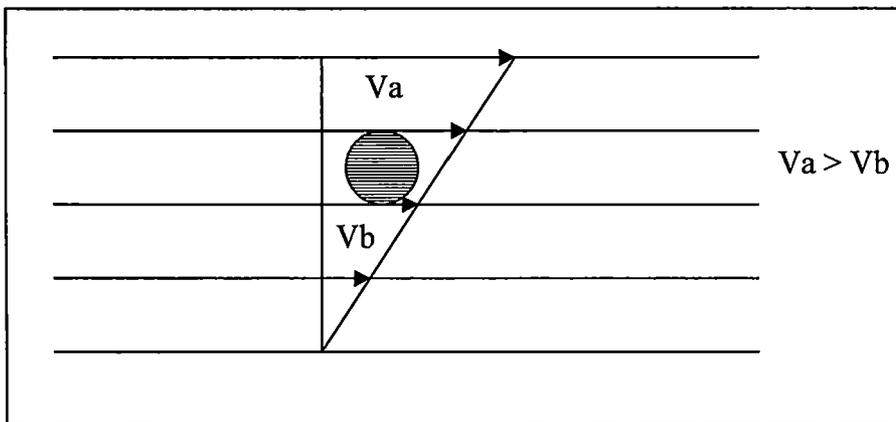


Fig. N° 14 Acción de la Tensión de Cizallamiento

La diferencia entre V_a y V_b tiende a hacer que la partícula gire, produciendo una diferencia de presión en dirección perpendicular al escurrimiento, haciendo que la partícula sea conducida a una región de velocidad más baja. A pesar de no tener exactamente las condiciones descritas anteriormente, en la partícula de la filtración, el fenómeno es análogo y es válido para explicar la remoción de partículas de un tamaño del orden de $10\ \mu\text{m}$.

2.4. Funcionamiento del manto de lodos

De acuerdo con la teoría desarrollada por Dégremont, el manto de lodos funciona como un medio filtrante al estado fluidizado, con los flocúlos como partículas que constituyen el medio poroso y que no es exactamente un lecho fluidizado con partículas de tamaño estables, sino mas bien es un lecho que permite que durante el paso ascendente tipo "filtración ascendente", la retención y desarrollo de los microcoágulos o microflocúlos procedentes de la coagulación que contienen diversos subproductos fisicoquímicos y biológicos, es decir que durante este paso se permiten su crecimiento y su desarrollo formando flocúlos de diferentes tamaño, peso y resistencia; que se aglomeran aumentando su cohesión entre ellos, a través del puente químico que permite una fácil separación o decantación.

Es de suma importancia comentar mas detalladamente la llamada "Teoría del Puente Químico" respecto a la habilidad de las moléculas poliméricas (macromoléculas naturales y sintéticas) que tienen en adherirse a la superficie del coloide en uno o mas sitios de adsorción con el resto de la molécula que se extiende dentro de la solución.

El segmento puede interactuar con espacios libres sobre otra partícula coloidal o eventualmente adsorberse en otro sitio sobre la superficie original.

"Cada molécula polimérica puede tener muchos grupos o segmentos que pueden ser potencialmente adsorbidos y que son relativamente libres de interacción mutua. Esto hace incrementar la capacidad de adsorción, incrementando el peso molecular y favoreciendo a la decantación Rápida", según lo descrito por R. Hurtado y G. Rivas Mijares en su libro **Nuevas tendencias de diseño en el tratamiento de aguas.**

Este crecimiento y aglomeración, se deben a las colisiones entre ellos por el efecto pulsante del decantador, asignado por la variación de velocidad ascendente y descendente y al pase del agua a través de los intersticios porosos del lecho fluidizado, el estado fluidizado es un estado intermedio entre el reposo y el transporte (arrastre); de esta manera los flocúlos aumentan su concentración

y donde los mecanismos de reacción secundaria de la coagulación aún continúan. Por esto no es necesario producir grandes flóculos al inicio, para realizar la separación mediante la decantación.

En este proceso los flóculos pequeños que ingresan por el fondo en **primer lugar** son arrastradas por el flujo y van juntándose con otros durante su ascenso y van uniéndose de forma que quedan unidos formando flóculos mas grandes; en **segundo lugar** chocan unas con otras incrementando su peso específico, tamaño y forma, y en **tercer lugar** estas se aglomeran, aumentando el volumen del manto de lodos; por lo tanto su concentración y altura comienzan a aumentar progresivamente hasta alcanzar la altura total (limitado por el borde de los concentradores), después del cual el exceso se va descargando a los concentradores desde donde son eliminados o extraídos por las válvulas de purga.

El incremento de volumen se presenta hasta adquirir un volumen tal que se disgregan por el esfuerzo cortante, o suspenden su ascenso y caen chocando con las que suben, presentándose un régimen de flujo turbulento en el manto de lodos, donde las partículas floculentas suben y bajan continuamente con un movimiento rotacional.

Dada la alta concentración de partículas floculentas que hay en el manto de lodos existe una mutua interferencia en la velocidad de sedimentación con que caen, manteniéndose suspendidas por la fuerza ascensional de fricción del flujo y la fuerza de gravedad, suspensión que se alcanza con el equilibrio hidráulico.

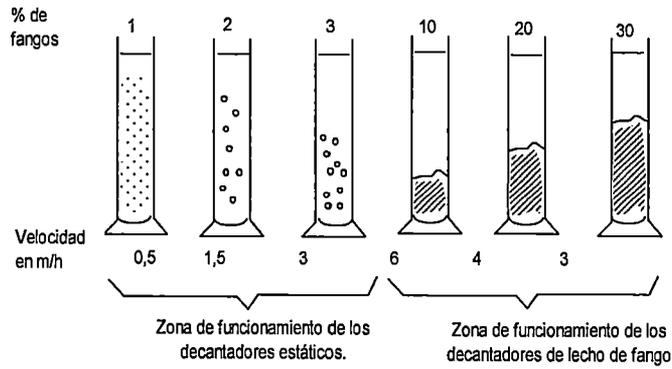
Por lo tanto el manto de lodos se comporta como un resorte que tiende a comprimirse bajo la acción de la gravedad (caída o sedimentación de flóculos), pero que se estira mas o menos bajo la acción de las fuerzas de rozamiento del agua (ascenso e interferencia de flóculos) sobre las partículas de lodos que constituyen este resorte y que aumentan naturalmente con la velocidad del agua, en estas condiciones las partículas floculentas no mantienen su peso, ni tamaño ni forma, estos cambian continuamente.

Una buena analogía es comparar el manto como un resorte (Fig. N° 16) donde la velocidad del agua corresponde al número de vueltas por centímetro. Si la velocidad de elevación o levantamiento es muy alta, el manto puede perder su cohesión, llegando a comportarse como un resorte que puede ser roto si la fuerza es muy grande o cuando se estira demasiado, por lo que se puede evitar adoptando una **velocidad conveniente**, es recomendable no incrementar más allá del 30% como máximo del caudal total del decantador, a fin de evitar alcanzar la velocidad de levantamiento definido como “velocidad superior del límite de fluidización”, ya que podría presentarse la pérdida del manto de lodos.

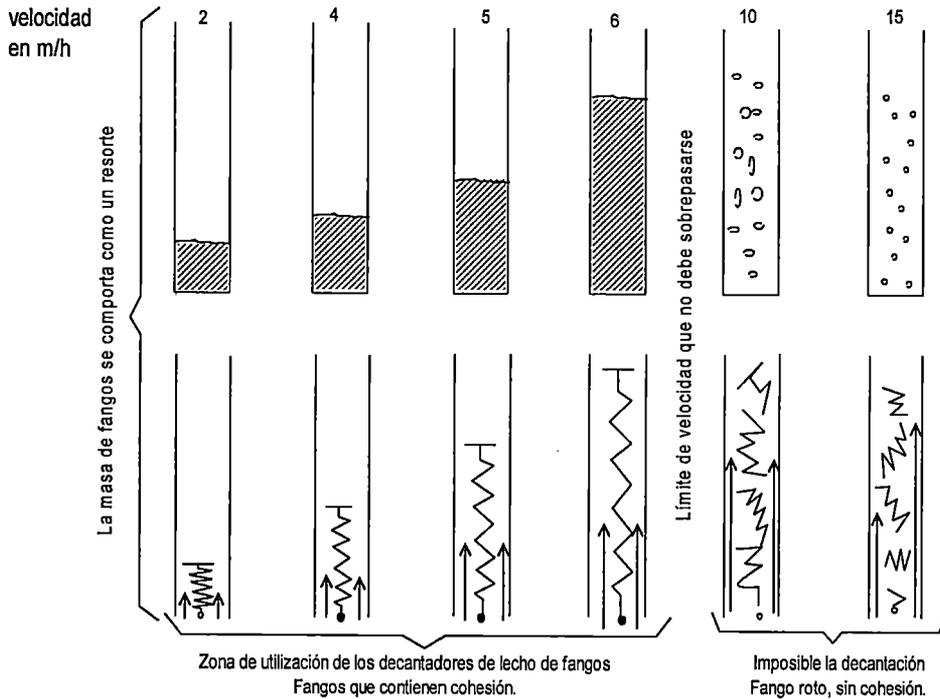
La concentración del manto de lodos puede disminuir por las siguientes causas: incremento brusco del flujo de agua (caudal de tratamiento), dosificación de coagulantes y/o polímeros que no satisfacen la desestabilización total de las partículas coloidales es decir valor diferente a la dosis óptima, variación del pH, temperatura, etc. la variación de la concentración del manto de lodos es inversamente proporcional a la variación del flujo.

En la figura N° 15 se muestra la variación de la velocidad de decantación en función de la concentración de lodos.

Fig. N° 15 Variación de la velocidad de decantación en función de la concentración de lodos



Comportamiento de un lecho de lodos sometidos a velocidades ascensionales crecientes.



Fuente: Manual de Tratamiento de Agua - Dégremont

La resistencia del "resorte" que en este caso representa al manto de lodos, puede ser mejorado por medio de la optimización de la calidad del floculo, para

lo cual, es necesario hay veces realizar combinaciones de coagulantes y/o floculantes tanto en cantidad, ajuste de la altura de agua en la campana y el caudal de tratamiento.

2.4.1. Velocidades en el manto de lodos ¹⁰

Durante el proceso de decantación, el agua entrampada entre los poros que forman las partículas floculentas, que asciende desplazada por los flóculos con una velocidad V_d en dirección opuesta a la velocidad de sedimentación V_s de caída de las partículas individuales definen la velocidad de interfase V_i . Por lo tanto la velocidad de asentamiento de la interfase V_i será igual a:

$$V_i = V_s - V_d = (h_1 - h_2) / t \text{ ec. (31)}$$

Entonces en el manto de lodos se deben considerar las siguientes velocidades:

- La velocidad ascensional del agua $V = Q/A$, en el que Q es el caudal con el que trabaja la unidad y A es el área superficial de la misma.
- La velocidad intersticial V_d del flujo que asciende por entre las partículas y que se expresa como $Q / p.A$ donde p es el porcentaje de área libre no ocupada por las partículas (porosidad). Por tanto $V_d = V/p$
- La velocidad de caída de las partículas individuales V_s considerada como si descendiera sola en un líquido en reposo sin interferencia de las otras. Se puede encontrar con la fórmula:

$$V_s = ((4/3 gd/C_D \times (\rho_s - \rho / \rho))^{1/2} \text{ ec. (32)}$$

$$V_s = 36 ((Ss-1) d/C_D)^{1/2}, \text{ con } Ss = \rho_s/\rho ; C_D = 24/NR \text{ ec. (33)}$$

¹⁰ Sedimentación – Diseño TEORÍA, DISEÑO Y CONTROL DE LOS PROCESOS DE CLARIFICACIÓN DEL AGUA

- La velocidad de caída de la interfase V_i , que es diferente a la velocidad de caída de las partículas individuales V_s . Teóricamente para la condición de equilibrio: $V_i - V = 0$ por lo tanto $V_i = V$, V_i es función de la concentración del manto.

Como

$$V = Q/A \quad \text{ec. (34)}$$

Reemplazando en (34)

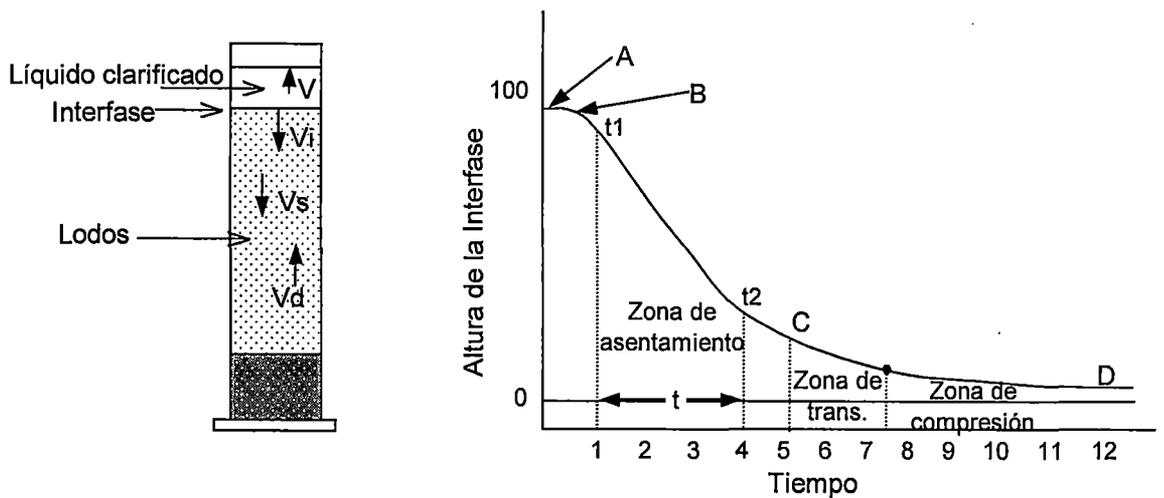
$$Q/A = (h_1 - h_2) / t$$

Por tanto

$$Q = (h_1 - h_2) / t \times A \quad \text{ec. (35)}$$

En la siguiente figura se representa las diferentes velocidades que se presentan en el manto de lodos.

Fig. N° 16 Velocidades en el Manto de Lodos



2.4.2. Fenómeno de Fluidización en el manto de lodos

Fenómeno explicado por el Ingeniero Químico M. F. Edeline, Profesor de la Facultad de Ciencias Agronómicas de Gembloux – Francia¹¹.

El estado fluidizado es un estado intermedio entre el reposo y transporte. En el manto de lodos las partículas que se encuentran en estado de equilibrio inestable las capas de lodo son atravesados por el agua coagulada en movimiento ascendente regular, que viene a ser el caudal que ingresa por el fondo del decantador.

Se observan 3 fases sucesivamente representadas en la figuras N° 17 y 18.

Esquema de fluidización: reposo, fluidización y transporte.

- ΔP : pérdida de carga del lecho de lodos
- h : altura de expansión
- Q : caudal (ascensional)

A caudal bajo el manto de lodos se mantiene en reposo, la pérdida de carga aumenta linealmente con el caudal, hasta un cierto valor de caudal con el que se alcanza el “límite de fluidización” en este momento se produce la descarga de agua de la campana de vacío, donde las partículas se separan unas de otras es decir se desordenan y entran en expansión mientras que la variación de la presión ΔP se mantiene constante, por ende el manto entra en expansión.

A medida que el caudal aumenta mas de lo requerido, se produce el transporte de partículas, por lo tanto el lecho de lodos deja de presentar una interfase definida o neta, produciéndose la ruptura del manto de lodos, por tanto las partículas floculentas son transportadas hidráulicamente hacia la superficie perdiéndose entonces las partículas floculentas del manto de lodos.

¹¹ La decantación y sedimentación – cap 3 Depuración Físicoquímica de las Aguas – F- Edeline 1992 Edición CEBEDOC

Fig. N° 17

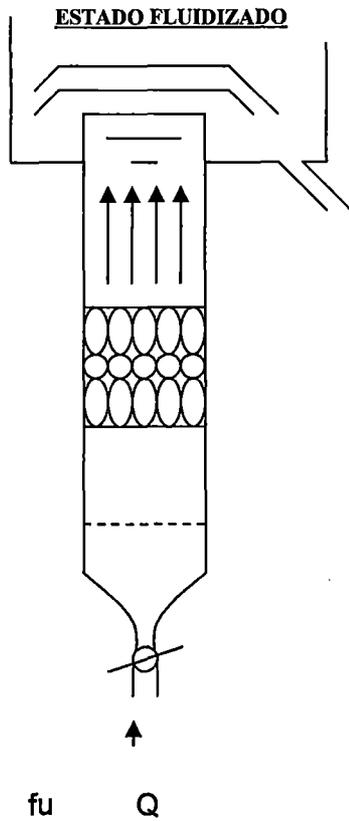
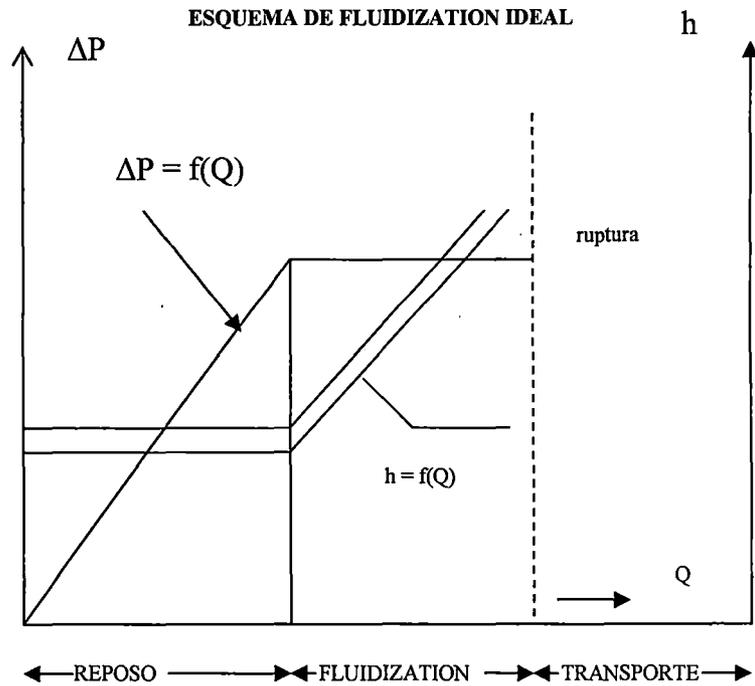


Fig. N° 18



En la operación del decantador las partículas floculentas no son esféricas ni están homo dispersos (igualmente dispersos), la irregularidad de la forma de estas partículas se puede caracterizar por un factor anguloso, de hecho que estos se compactan de manera que están bien unidos, que producen una pérdida de carga elevada que un manto de lodos con partículas de forma esférica equivalente.

La existencia de una variedad de diámetros, tamaños y pesos de las partículas que conforman el manto provoca la puesta en fluidización sucesiva de las partículas, desde los muy pequeños con poco peso hasta los más pesados y grandes.

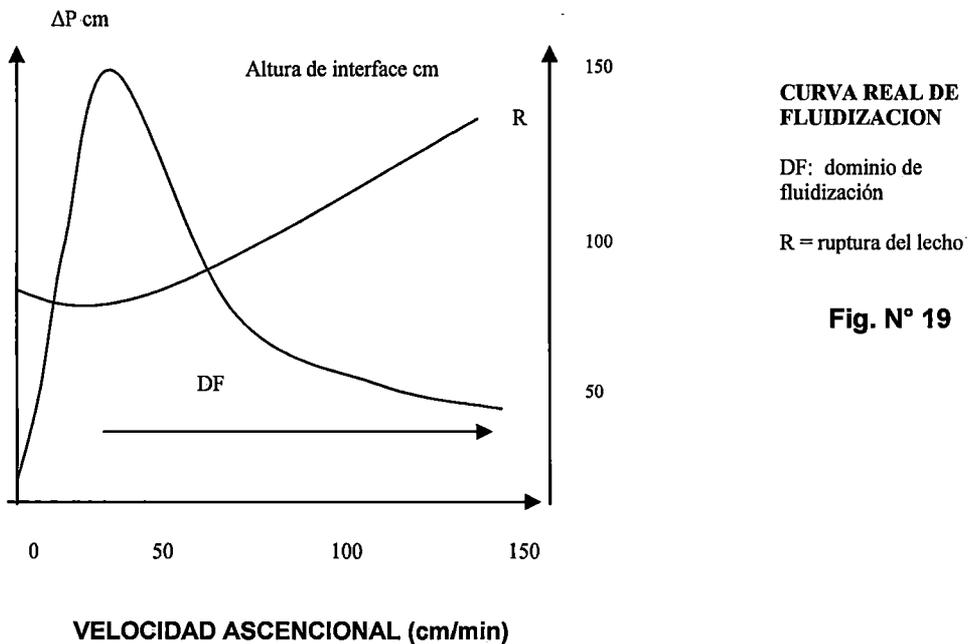
En el primer tramo ($Q < \text{limite}$) Fig. N° 19 en lecho fijo se puede aplicar la ecuación de ERGUN, donde el primer término corresponde a la viscosidad y la segunda a la energía cinética.

$$\frac{\Delta P}{h} = \frac{150\mu v (1 - \epsilon)^2}{d^2 \epsilon^3} + \frac{1.75 \rho L V^2 (1 - \epsilon)}{d \epsilon^3} \quad \text{ec. (36)}$$

La ecuación es válida para número de Reynolds Re (de 1 a 2000), en el rango de la fluidización, la pérdida de carga equilibra exactamente el peso aparente de las partículas en suspensión.

$$\frac{\Delta P}{h} = (1 - \epsilon) (\rho_s - \rho_L) \quad \text{ec. (37)}$$

Igualando las ecuaciones (36) y (37), a este punto corresponderá una porosidad mínima de fluidización $\epsilon = \epsilon_m$ y una velocidad mínima de fluidización $v = v_m$, obteniéndose una ecuación de segundo grado en v , es posible obtener v_m si ϵ_m es conocido, así como el diámetro de las partículas d y el peso específico ρ_L y ρ_s . Para las esferas o esferoides $\epsilon_m = \sim 0,4$



La velocidad máxima de fluidización v_M es la velocidad límite de caída de las partículas dentro del líquido en reposo (velocidad de sedimentación): si se le impone una velocidad ascensional del agua igual al del sentido opuesto, la partícula será acarreado con esta velocidad .

$$V_M = \sqrt{4/3 \text{gd}/f (\rho_s - \rho_L)/ \rho_L} \quad \text{ec. (38)}$$

Donde f es un factor ligado al número de Reynolds Re de escurrimiento.

Si $Re < 2$ entonces $f = 24/Re$ y si $Re > 500$ entonces $f = 0,44$

El lecho fluidizado es un medio muy homogéneo, donde predomina el gradiente de velocidad medio (G en s^{-1}) muy débil del orden de 4 a 40 s^{-1} y esta dado por la relación de Gregory ec.(39):

$$G = \{ 4c\Delta\rho g Q / \mu \eta h^2 \}^{1/2} \quad \text{ec. (39)}$$

Donde:

c : 2.5 S

S: concentración en vol. Sedimentado (s.d.)

ρ : peso específico (kg/m³)

h : espesor del lecho (m)

Q : caudal (m³/s)

μ : viscosidad (Ns/m²)

2.4.3. Calibración y Regulación del Sistema de Pulsación

El manto de lodos se mantiene en suspensión por las pulsaciones al que esta sometido durante su funcionamiento, para lo cual se requiere realizar la regulación del sistema de pulsaciones que comprende el llenado y descarga de agua en la campana de vacío, en determinados tiempos.

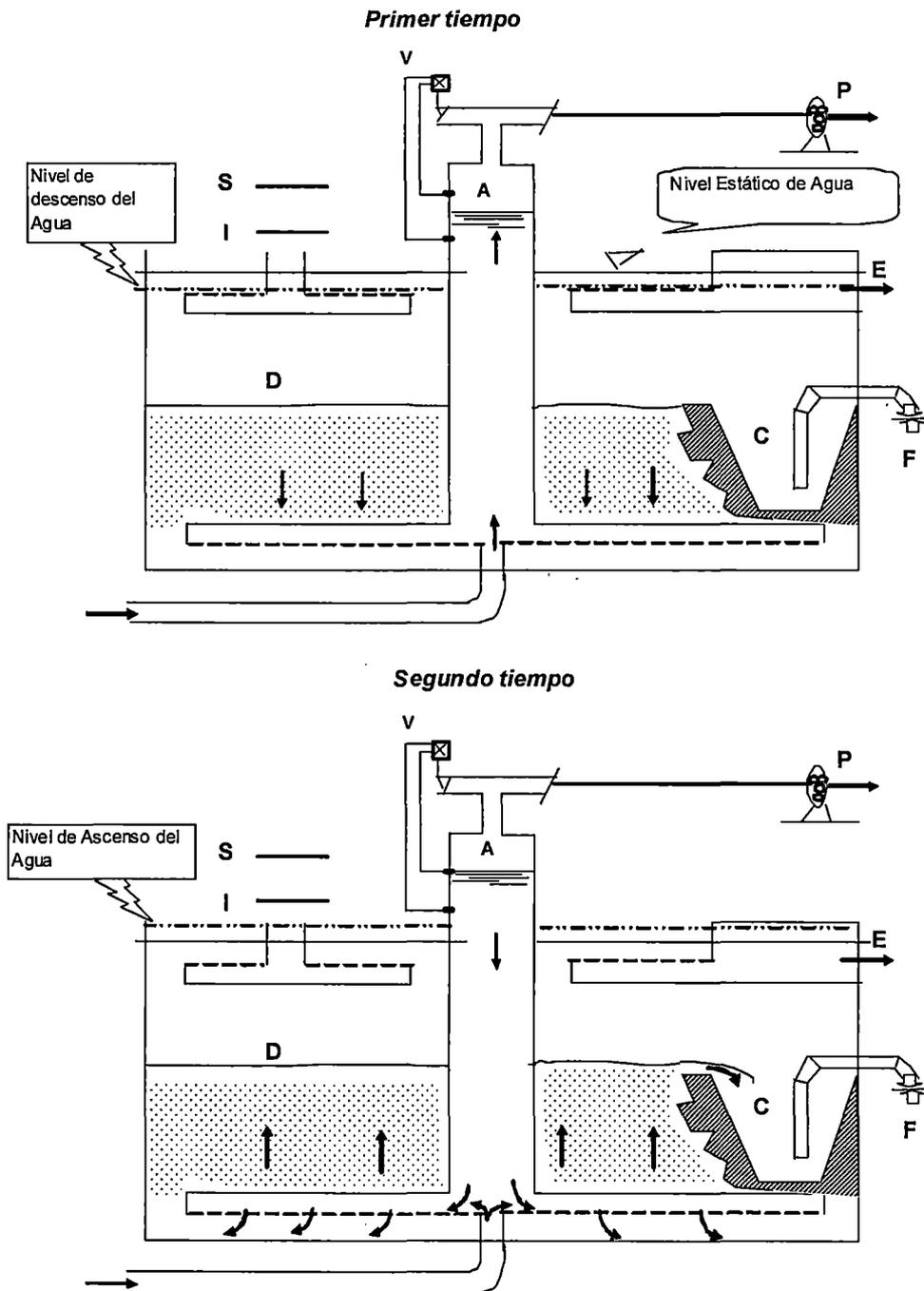
2.4.3.1. Calibración del Sistema de Pulsación del Decantador Pulsator.

Para calibrar el sistema de Pulsaciones se debe considerar el tiempo de llenado de la campana **1er tiempo** y el tiempo de vaciado o descarga de agua de la campana **2do tiempo** con estos se consiguen mantener en suspensión el manto e incrementar las concentraciones en las diferentes capas del manto, para separar las impurezas del agua. Fig. 20

Funcionamiento con la bomba de Vacío o Ventilador.- Consiste en hacer introducir el agua cruda con productos químicos a la campana (A), puesta en comunicación con el colector inferior del decantador, y aspirar el aire contenido dentro de la campana por medio de un equipo mecánico (P) que puede ser un ventilador o una bomba de vacío.

El caudal aspirado por (P) es inferior al caudal de agua cruda, una parte del cual es almacenado dentro de la campana desde donde es llevada continuamente al colector inferior del decantador. Mientras que el nivel de agua dentro de la campana alcanza un cierto valor, un dispositivo detector de nivel comanda la abertura de la válvula (V) de puesta en comunicación de la campana con la atmósfera.

Fig. N° 20 Funcionamiento de la Pulsación – Decantador Pulsator



2.4.3.2. Regulación del Sistema de Pulsaciones.

Durante la puesta en marcha del decantador

Se monitorea la formación de microflóculos, cuando se observa la presencia de estos, se debe poner en marcha **el sistema de pulsaciones**, que consiste en regular el sistema de pulsaciones:

- aspiración o extracción de aire de la campana de vacío, que corresponde al tiempo de llenado **T1** en seg, hasta alcanzar la altura de agua en la campana h_c .
- descarga de agua cuando se alcanza, por medio de la apertura de la válvula de puesta a la atmósfera o válvula rompe vacío, de accionamiento eléctrico, que corresponde al tiempo **T2**.

Durante la operación normal del decantador

Durante la operación normal, se verifica la regulación de pulsaciones por medio de los valores de **T1 y T2**, que son dependientes de la concentración del manto de lodos basados en las 2 siguientes condiciones:

- Sí la diferencia de la concentración del manto de lodos entre el nivel inferior (cerca a los deflectores) y el nivel superior (punto de la interfase sólido – líquido) es mayor a 10%, entonces es necesario reducir el tiempo de descarga **T2** entre 4 a 6 seg. a fin de producir una mayor dispersión en el fondo e incrementar la concentración en las capas superiores (por desplazamiento ascensional de la masa de lodos), con esto se evita que el manto en este punto se compacte y pierda la eficiencia de comportarse como un lecho en expansión.
- Sí la diferencia de la concentración del manto de lodos entre el nivel inferior y el nivel superior es menor a 10%, entonces es necesario aumentar el tiempo de descarga **T2** entre 4 a 6 seg. a fin de disminuir la velocidad de expansión e incrementar la concentración en el fondo del decantador, con esto se evita la pérdida del manto.

2.4.3.3. Efecto de la Regulación de Pulsaciones: Desplazamiento Vertical del Nivel de Agua y del Manto de Lodos en el Decantador

El agua en el decantador como consecuencia de las pulsaciones presenta variación con respecto al nivel estático.

$$h_1 = h_{\text{altura de expansión del manto de lodos}} \text{ y}$$

$$h_2 = h_{\text{altura de descenso manto de lodos}}$$

Sí $h_1 > h_2$ entonces es posible que se sobrepase la velocidad límite de fluidificación (velocidad de expansión), es decir que se produce el desprendimiento de flóculos del manto de lodos, por lo general sucede cuando la velocidad de ingreso al decantador es muy alto durante la descarga de agua de la campana de vacío h_c , lo que produce el rompimiento del manto de lodos, por tanto es necesario disminuir la velocidad de ingreso por medio de la reducción del caudal tratado seguido por la regulación del sistema de pulsaciones.

Sí $h_1 < h_2$ entonces significa que no hay desprendimiento de partículas floculentas, se debe aumentar el caudal de ingreso hasta aproximar el valor de "h" de desplazamiento (o expansión del manto de lodos) al valor de "h" de sedimentación o descenso. En este caso se produce, la compresión de las capas de manto de lodos en los diferentes niveles y por lo tanto es necesario regular la frecuencia de pulsaciones teniendo en cuenta la concentración del manto de lodos y las características de los flóculos, tal que la pulsación sea lo más rápido posible.

Según Eckenfelder y Eddi obtuvieron una correlación para la variación Δh de movimiento vertical del manto de lodos durante el descenso y durante la expansión debe ser menor o igual a 1.0 cm. dentro del cual se mantiene el manto en **equilibrio ideal**. Es recomendable que la variación Δh de movimiento vertical del manto de lodos durante el descenso y durante la expansión, sea menor igual a 1.0 cm, dentro del cual se mantiene el manto en equilibrio.

CAPITULO III

MÉTODOS Y MATERIALES

3.1. Método, Tipo y Nivel de la Investigación

La presente investigación hace uso de la metodología Cuantitativa, por cuanto utilizó el tratamiento estadístico y es del tipo Tecnológico del nivel Correlacional y Explicativo con diseño Experimental.

Es del tipo Tecnológico, por que está orientado a descubrir y conocer qué técnica es más eficaz o apropiado para producir cambios, en este caso, en la Operación del Decantador Pulsator, manipulando la variable independiente V.I. "Condición de Equilibrio Hidráulico" para diferentes caudales experimentados, en el que se observaron los resultados, en el funcionamiento del manto de lodos en diferentes momentos.

Según Santiago Valderrama Mendoza (2003:50) "El significado particular del experimento se refiere a un estudio de investigación en que se manipulan deliberadamente una o mas variables independientes (supuestas causas) para analizar las consecuencias que la manipulación tiene sobre una o mas variables dependientes (supuestos efectos) dentro de una situación de control para el investigador"

El nivel es correlacional y explicativa porque permiten relacionar la variable independiente V.I. con la variable dependiente V.D. y explicar dichos resultados. (Hernández. S. y Otros Metodología de la Investigación 1999 pág. 107).

Según Campbell y Stanly la investigación experimental puede ser del nivel explicativo y correlacional; siendo esto, aplicable para la presente investigación, por lo siguiente:

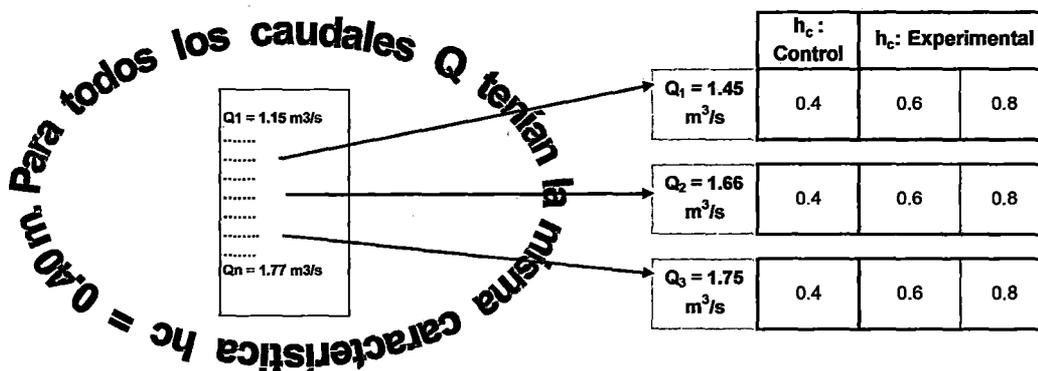
Primero, a través de la experimentación se buscó explicar el efecto que producen los valores asignados (manipulados en forma intencional) a la variable independiente "Condición de Equilibrio Hidráulico" por medio de los indicadores altura de agua en la campana h_c y caudales Q ; en el funcionamiento del manto de lodos; según Rafael Bisquerra Alzina (1998:66) en la investigación explicativa "el objetivo está en explicar el fenómeno. Llegar al conocimiento de las causas".

Segundo, porque permitió medir la relación que hay entre las variables independientes Q y h_c y la variable dependiente Optimización del Manto de Lodos; según Roberto Hernández Sampieri (1998:62) "Los estudios correlacionales tienen como propósito medir el grado de relación que existe entre la variables"

3.2. Población y Muestra

La población para el presente estudio esta determinado por todos los valores de caudales de decantador Q comprendidos en el rango de caudales definidos de acuerdo a la demanda horaria, que varían desde el valor mínimo de $1.15 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta el valor máximo de $1.77 \text{ m}^3/\text{s}$; y por todos los valores de la altura de agua en la campana h_c comprendidos entre 0.6 m. a 1.0m. variación definida en el Water Treatment Handbook Volume 2 de Dégremont SUEZ (2007: 845)

Cuadro 2 Población y Muestra



Para la muestra se seleccionó, de este conjunto de caudales, 3 valores (Q_1 , Q_2 , Q_3) totalmente al azar o "aleatoria" que significa que todos los caudales comprendidos entre el valor mínimo y el valor máximo tienen la misma probabilidad de integrar cada grupo. Igualmente los valores de h_c altura de agua en la campana de vacío, se seleccionaron al azar. Cuadro 2.

Los valores $Q_1 = 1.45 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_2 = 1.66 \text{ m}^3/\text{s}$ y $Q_3 = 1.75 \text{ m}^3/\text{s}$. constituyeron la Muestra del estudio, a cada uno de estos valores se asignó dos valores de altura de agua en la campana $h_c = 0.60 \text{ m}$ y $h_c = 0.80 \text{ m}$ valores obtenidos en forma aleatoria.

Por lo general, la rutina de la operación de los decantadores se realizaba con altura de agua constante en la campana del decantador $h_c = 0.40 \text{ m}$. para los diferentes caudales de tratamiento.

Estos valores agrupados para cada caudal Q constituyeron el grupo experimental, mientras que el grupo de control correspondió $h_c: 0.4 \text{ m}$. para los 3 caudales de tratamiento. En el siguiente cuadro 3 se muestran a los 6 grupos experimentales y 3 grupos de control.

Cuadro 3 Grupos de Control y Experimental

Q m³/s	Grupo	h_c m.
1.45	Control	0.4
	Experimental	0.6
	Experimental	0.8
1.66	Control	0.4
	Experimental	0.6
	Experimental	0.8
1.75	Control	0.4
	Experimental	0.6
	Experimental	0.8

3.3. Recolección y Procesamiento de Datos

3.3.1. Recolección de Datos

Los datos recolectados fueron para la variable dependiente “Optimización del Manto de lodos del decantador Pulsator” medidos en cada experimento para sus indicadores y realizados a través de la observación, medición, análisis y cálculo. Datos que se registraron en formularios diseñados por la Investigadora para cada indicador.

La secuencia de valores obtenidos, fueron los siguientes:

- Altura del manto de lodos H: m.
- Porcentaje de Concentración de lodos en el manto: %[lodos].
- Coeficiente de cohesión de lodos: K.
- Gradiente de velocidad G: s^{-1}
- Porcentaje de remoción de turbiedad : % Remoción de Turbiedad

3.3.2. Procesamiento de Datos

Primero: Tabulación de datos

La tabulación de datos se realizó en forma mecánica siguiendo el diseño del formulario establecido para cada indicador y subindicador de la variable dependiente de acuerdo con el experimento realizado, para cada combinación establecida, según el cuadro 4.

Segundo: se procesó los datos a través del análisis de varianza ANDEVA para realizar la contrastación con la hipótesis.

Cuadro 4

Combinaciones de Experimentos

$h_c \backslash Q$	$Q_1 = 1.45$ m^3/s	$Q_2 = 1.66$ m^3/s	$Q_3 = 1.75$ m^3/s
$h_{c1} = 0.4m.$	$Q_1 h_{c1}$	$Q_2 h_{c1}$	$Q_3 h_{c1}$
$h_{c2} = 0.6m.$	$Q_1 h_{c2}$	$Q_2 h_{c2}$	$Q_3 h_{c2}$
$h_{c3} = 0.8m.$	$Q_1 h_{c3}$	$Q_2 h_{c3}$	$Q_3 h_{c3}$

	Grupo de Control
	Grupo Experimental

Se puede observar las diferentes combinaciones con los que se realizaron los experimentos, manipulando los valores de la variable independiente "condición de equilibrio hidráulico": h_c y caudal Q (definidos como indicadores de esta variable).

3.4. Diseño de la Investigación

3.4.1. Secuencia de la investigación:

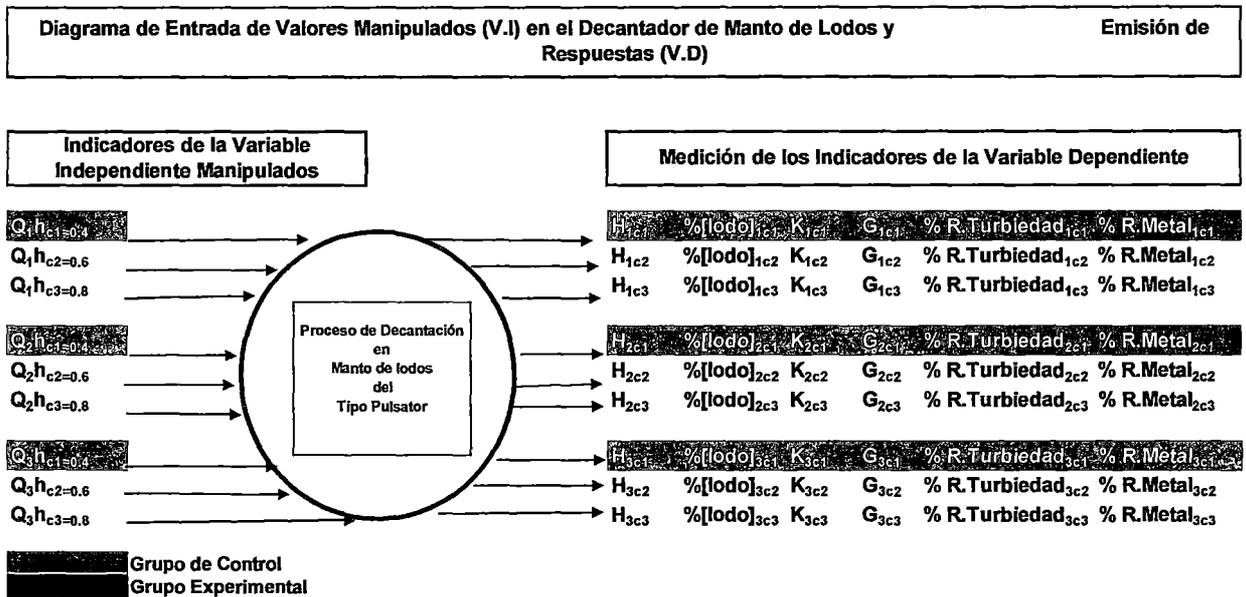
- Definir y verificar las combinaciones de los experimentos señalados a desarrollar según el cuadro 4. Así como el grupo de control, los 3 grupos de caudales en su estado inicial tuvieron similar $h_c = 0.40$ m. A los grupos experimentales se les expuso a la acción de la variable independiente alturas de agua de la campana $h_c = 0.6$ y $h_c = 0.8$ m. seleccionados, en tanto que el grupo de control permaneció igual con $h_c = 0.4$ m.

- Calibrar los equipos de medición de caudal.
- Medir la altura de agua en la campana de vacío h_c y realizar los ajustes correspondientes para los valores asignados.
- Preparar los equipos, materiales y otros necesarios para los ensayos y mediciones.
- Determinar y fijar las condiciones de dosis de los coagulantes de Cloruro Férrico y Sulfato de Aluminio de acuerdo a las características del agua a tratar, mediante los ensayos de pruebas de jarras.
- Realizar y fijar las mediciones de h_c y tiempos T_1 (tiempo de llenado de agua en la campana) y T_2 (tiempo de vaciado de agua de la campana) para realizar los cálculos de los volúmenes de agua de la campana y caudales de entrada al decantador durante el ciclo de las pulsaciones, determinados por $T_1 \times T_2$.
- Cálculo de velocidades de flujo y sedimentación durante el llenado y descarga de agua de la Campana de Vacío y otras velocidades con los datos obtenidos en los experimentos. Anexo 1.
- Operar los decantadores con las condiciones operativas asignadas para cada experimento.
- Establecer a priori la secuencia de extracción de lodos del decantador y luego regular de acuerdo a las mediciones y concentración del manto de lodos.
- Iniciar la toma de datos después de 4 horas de haber dado el inicio con el experimento (tiempo determinado para que las condiciones aplicadas se estabilicen), considerando la siguiente secuencia establecida en el punto 3.3.1. Recolección de datos.
- Analizar los resultados obtenidos para la variable dependiente "Optimización del Manto de Lodos del Decantador Pulsator" para el grupo de caudales de tratamiento seleccionados en el punto 3.2 Población y Muestra, donde para cada grupo de caudal se definió un grupo de control y dos grupos experimentales. Con el apoyo del siguiente diagrama "Entrada de Valores manipulados (V.I) en el

Decantador de Manto de Lodos y Emisión de Respuestas (V.D)” se realizó el análisis para demostrar la interrelación que hay entre la V.I. y la V.D. Cuadro 5.

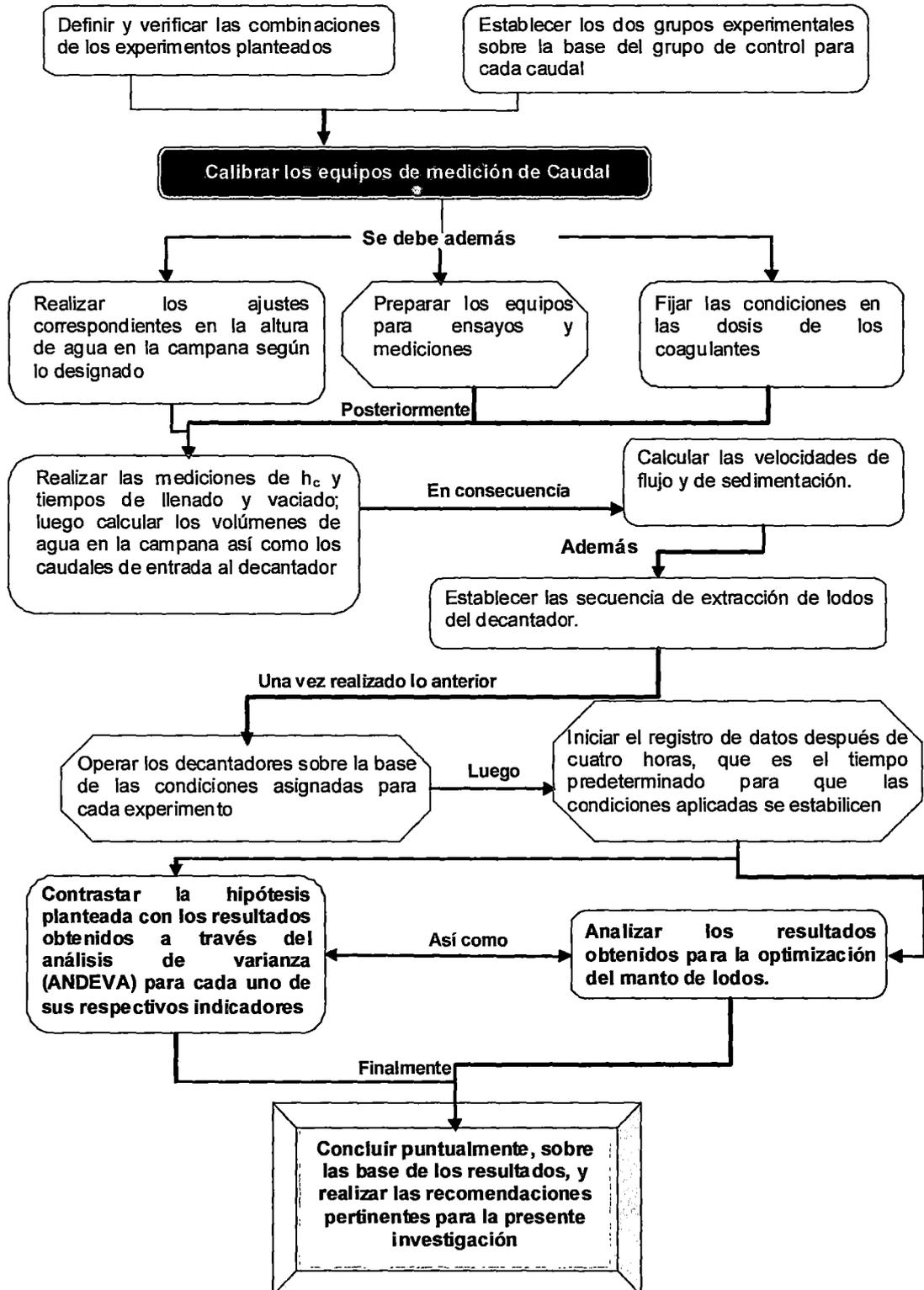
- Cabe resaltar que para cada prueba se realizó el ajuste del aforo o medición del caudal de tratamiento, regulación de las pulsaciones y dosis de coagulantes.

Cuadro 5



- Contrastar la hipótesis planteada con los resultados obtenidos empleando el análisis de varianza para los indicadores de medición propuestos para la variable dependiente.
- Obtener las principales conclusiones.
- Realizar las recomendaciones pertinentes para la presente investigación.

ESQUEMA N° 1 PROCEDIMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN



3.4.2. Diseño Experimental

Para la presente investigación se utilizó el **diseño experimental** con una variable independiente y una variable dependiente, este diseño es un proceso que supuso el control total de parte del Investigador de la relación entre las variables independientes y dependientes.

El diseño del experimento fue el indicado en el Cuadro 6 "Diseño Experimental"

Cuadro 6
Diseño Experimental

Variable Independiente		Observaciones (O) de Indicadores de la Variable Dependiente				
		H	%[Iodo]	K	G	% Remoción Turbiedad
		O1	O2	O3	O4	O5
RG₁ Q₁ = 1.45 m ³ /s	Grupo de Control RG₁ h_{c1} = 0.4	O1,1,1	O1,1,2	O1,1,3	O1,1,4	O1,1,5
	RG₁ h_{c2} = 0.6	O1,2,1	O1,2,2	O1,2,3	O1,2,4	O1,2,5
	RG₁ h_{c3} = 0.8	O1,3,1	O1,3,2	O1,3,3	O1,3,4	O1,3,5
RG₂ Q₂ = 1.66 m ³ /s	Grupo de Control RG₂ h_{c1} = 0.4	O2,1,1	O2,1,2	O2,1,3	O2,1,4	O2,1,5
	RG₂ h_{c2} = 0.6	O2,2,1	O2,2,2	O2,2,3	O2,2,4	O2,2,5
	RG₂ h_{c3} = 0.8	O2,3,1	O2,3,2	O2,3,3	O2,3,4	O2,3,5
RG₃ Q₃ = 1.75 m ³ /s	Grupo de Control RG₃ h_{c1} = 0.4	O3,1,1	O3,1,2	O3,1,3	O3,1,4	O3,1,5
	RG₃ h_{c2} = 0.6	O3,2,1	O3,2,2	O3,2,3	O3,2,4	O3,2,5
	RG₃ h_{c3} = 0.8	O3,3,1	O3,3,2	O3,3,3	O3,3,4	O3,3,5

donde:

- RG : asignación de grupos al azar
- O : observaciones (O1, altura del manto de lodos H; O2, porcentaje de concentración de lodos: %[lodos]; O3, coeficiente de cohesión de lodos: K; O4, gradiente de velocidad: G; O5, porcentaje de remoción de turbiedad).

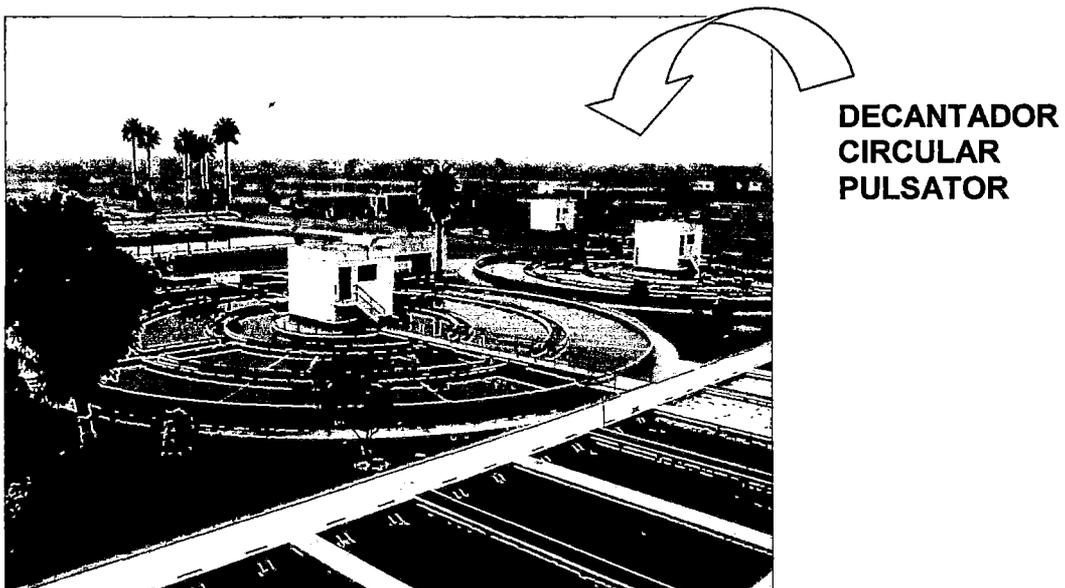
3.5. Materiales

3.5.1. Unidad de Análisis

Los ensayos y pruebas se realizaron en los decantadores Pulsator de Manto de Lodos de la Empresa de Agua de Lima – Perú, que cuenta con dos formas de decantador: circular y rectangular, siendo las pruebas realizadas en el decantador rectangular, para el cuál se describen las características de diseño. A continuación se muestran los dos decantadores.

3.5.1.1. Características de los decantadores Pulsator

Fig. N° 21

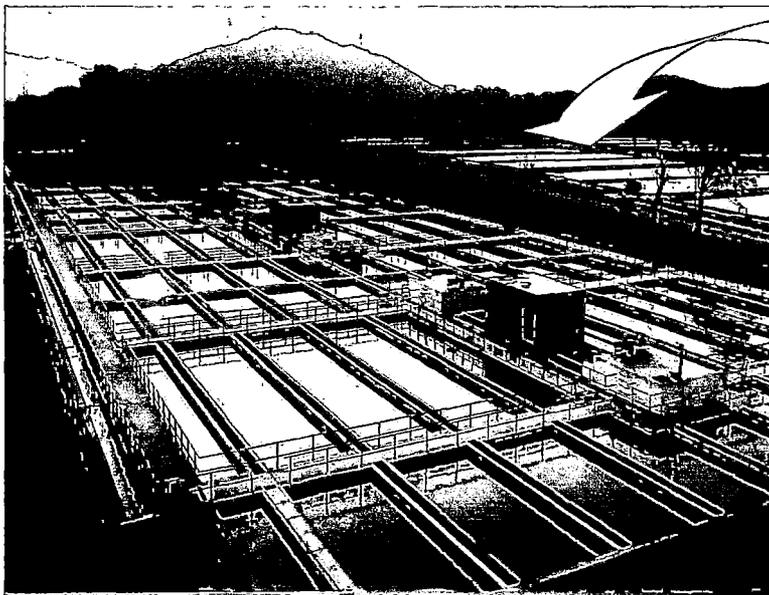


Fuente: Planta La Atarjea

Características de Diseño

- Caudal de diseño.	:	1.66 m ³ /s.
- Profundidad.	:	5.50 m.
- Área superficial del decantador	:	1405.8 m ²
- Área superficial campana de vacío.	:	12.64 m ²
- N° de campanas.	:	2
- Canal principal de recolección.	:	2 unidades.
- Canal secundario de recolección, cantidad.	:	2 unidades.
- Canaletes de recolección directa de agua	:	orificios circulares de 1" de diámetro y Rectangulares de 10 cm x 5 cm.
- Número de concentradores por unidad.	:	16 Tipo troncocónico

Fig. N° 22



**DECANTADOR
RECTANGULAR
PULSATOR**

Fuente: Planta La Atarjea

3.5.2. Recursos Utilizados

Los principales recursos utilizados en las experiencias realizadas fueron: insumos químicos (coagulantes: sulfato de aluminio y cloruro férrico), materiales, equipos y procedimientos, necesarios para la toma de muestra y para la medición de parámetros fisicoquímicos (turbiedad, pH, otros requeridos) y calibración y regulación de equipos.

3.5.2.1. Insumos Químicos: Coagulantes

a) Sulfato de Aluminio en Solución

Características Técnicas

- Fórmula Química : $\text{Al}_2 (\text{SO}_4)_3$
- Presentación : Solución
- Color : Pardo Amarillento
- Concentración de Óxido de Aluminio (% Al_2O_3) : 7,9 a 8,3
- Basicidad (% Al_2O_3 libre) : No mayor de 0,20
- Acidez (% H_2SO_4 libre) : No mayor de 0,20
- Fierro total (% $\text{Fe}_2 \text{O}_3$) : No mayor de 0,35
- Residuo Insoluble (%) : No mayor de 1,0%
- Densidad (gr/ c.c.) : 1,30 – 1,35

b) Cloruro Férrico

Características Técnicas

- Fórmula Química : FeCl_3
- Densidad : 1,40 g/cc – 1,45 g/cc
- Color : Pardo oscuro

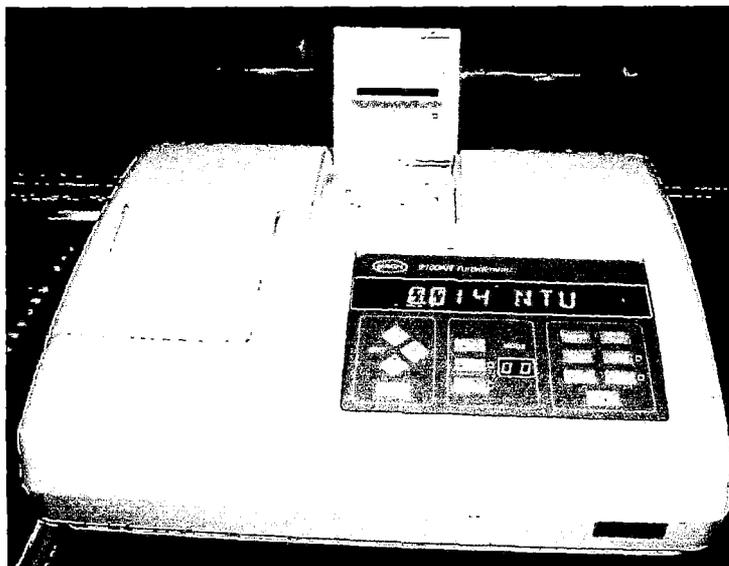
- Grado : Comercial
- Concentración de Cloruro Férrico (% Fe Cl₃) : 38% a 45%
- Concentración de Cloruro Ferroso (% Fe Cl₂) : No mayor de 0,5 %
- Acidez libre (% HCl) : No mayor de 0,5 %
- Residuo Insoluble : No mayor de 0,5 %
- Metales pesados Totales (Pb, Cd, Cu, Mn, Zn) expresados como Pb : no mayor de 0,01%
- pH (medido en solución al 1%) : 1,5 - 2

3.5.2.2. Equipos y Materiales

a) Turbidímetro

Características

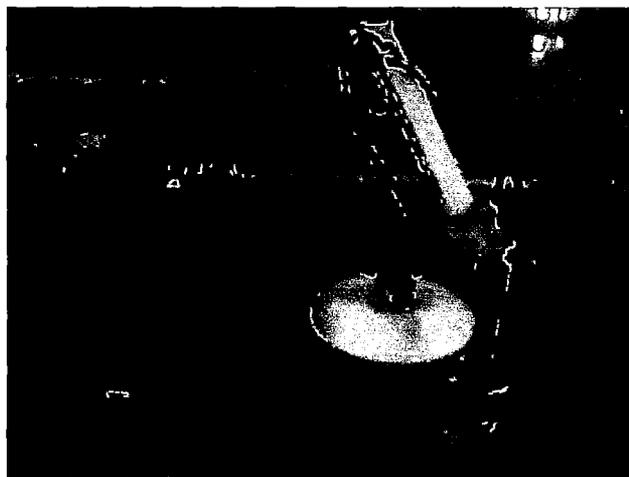
- Modelo : 2100AN
- Límite de Escala : +/- 5%
- Límite de Medición : 0 – 10000 NTU
- Marca : HACH

Fig. 23 Turbidímetro Digital

Fuente: Planta La Atarjea

b) pH-metro**Características**

- Modelo : 250 A
- Marca : ORION
- Rango de Variación : +/- 0.02
- Buffer de Medición : 4:00, 7:00 y 10:00

Fig. N° 24 pH-metro Digital

Fuente: Planta La Atarjea

c) Probeta Piloto de Decantador de Manto de Lodos**Características****Probeta**

- Diámetro : externo: 4cm. interno: 3,4 cm.
- Volumen : 250 ml.

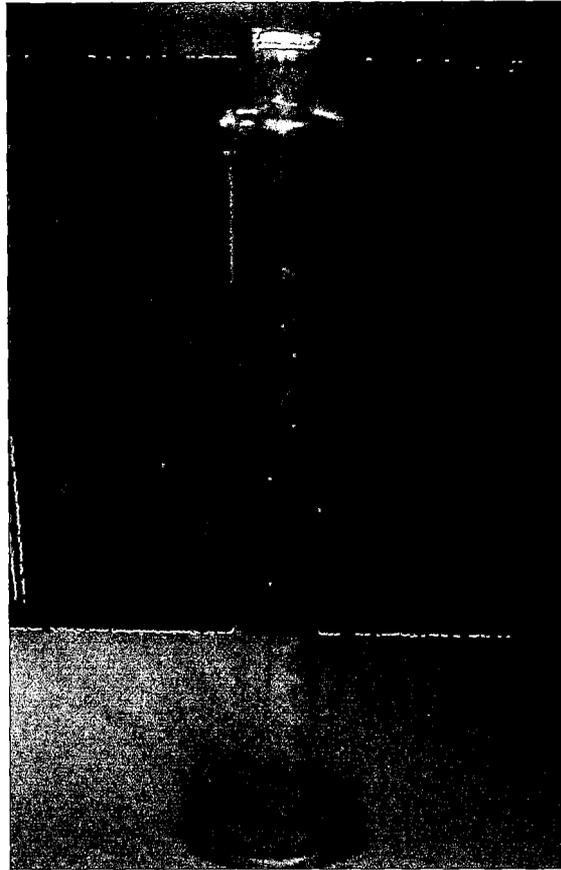
Campana “Embudo”

- Diámetro mayor (llenado) : externo: 2,7 cm. interno: 2,3 cm.
- Diámetro menor (descarga): externo: 0,65 cm. interno 0,55 cm.
- Longitud de descarga : 26,2 cm.

d) Varios

- Probetas de 50 ml. 100 ml. y 250 ml
- Extractor de lodos
- Jarras de 2 litros para el muestreo
- Cronómetro
- Vasos de Precipitado de 20 ml.y 250 ml.
- Fiolas de 1 litro y 100 ml.
- Titulador automático para medir alcalinidad
- Termómetro.

**Fig. N° 25 Probeta Piloto
Tipo Decantador de Manto de Lodos**



Fuente: SEDAPAL

3.5.3. Procedimientos Empleados: Técnicas Operativas y Analíticas.

3.5.3.1. Técnicas Operativas

a) Calibración de la altura de agua en la campana de vacío (h_c)

Procedimiento.

- Comprobar que a caudal máximo y mínimo las ranuras de recolección de agua decantada estén siempre sumergidas.
- Regulación de los topes del interruptor a flotador de tal manera que :

- En la campana el nivel máximo de agua h_c en tiempo de pulsaciones alcance la altura de agua asignada.
- Poner en Marcha el ventilador y regular la válvula de aspiración en la campana. Controlar el tiempo necesario para que el nivel alcance la altura asignada. Y regular la válvula manual situada en el circuito de puesta a la atmósfera.
- Medir la altura de descenso h_c en cada descarga de agua de la campana de vacío y multiplicar por el área neta, con el que se determina el volumen descargado; esto permite calcular el caudal total de ingreso al decantador.

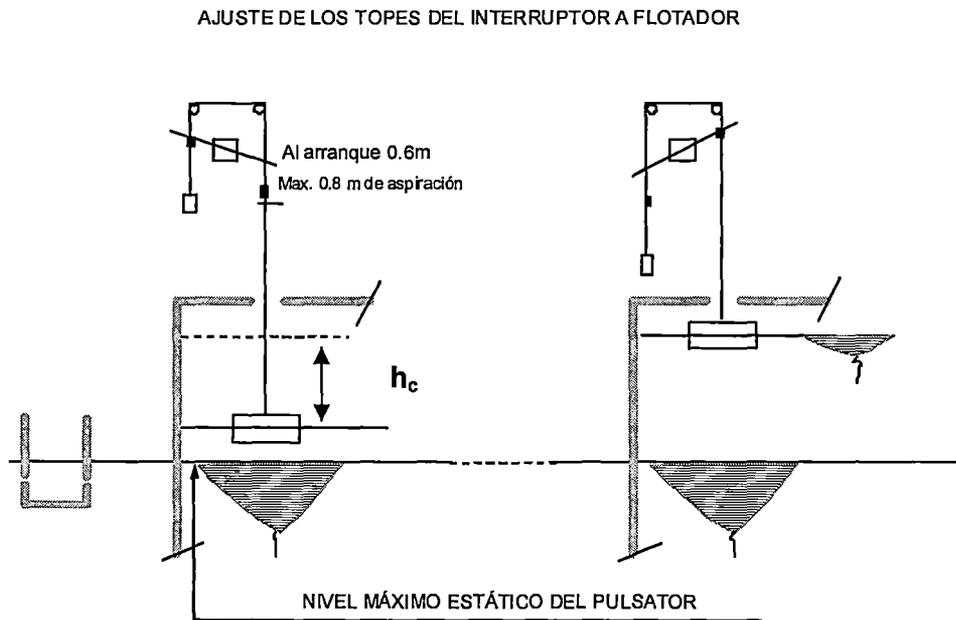


Fig. N° 26

b) Determinación del Porcentaje de Concentración de Lodos (%)

Procedimiento.

- Introducir el muestreador en el punto central del decantador (punto de extracción de muestra, Fig. N° 32) sujetando por la cuerda hasta cada una de las marcas, empezando a extraer:
 - 1ro. en la marca correspondiente a 2,5 m.
 - 2do. en la marca correspondiente a 3,0 m.
 - 3ro. en la marca correspondiente a 3,5 m.
 - 4to. en la marca correspondiente a 4,0 m.
- Mantener el muestreador en el punto a extraer por 2- 4 segundos.
- Jalar la cuerda para subir el muestreador.
- Vaciar la muestra tomada en el recipiente de 1l.
- Agitar la muestra extraída cuidando de no romper los floculos para homogenizar y luego vaciar en forma rápida a las probetas de 250 ml correspondiente al punto de extracción.
- Agitar la probeta para homogenizar la muestra, cerrando con la palma de la mano e invirtiendo sucesivamente la probeta, de abajo hacia arriba por diez segundos y luego moviendo en forma circular por diez segundos más.
- Colocar la probeta en una superficie plana y controlar el tiempo de sedimentación presionando el botón marcha del cronómetro.
- Dejar sedimentar por 5 minutos.
- Leer el volumen de lodo inmediatamente después de los 5 minutos.
- Calcular el porcentaje por medio de la siguiente formula, ejemplo de cálculo, para la primera profundidad de 2.50 m después de cinco minutos se tiene un volumen de lodo sedimentado de 10 ml. Por tanto el porcentaje volumétrico de concentración será:

$$\% \text{Concentración de lodos} = \frac{10\text{ml} \cdot 100\%}{250} = 4\%$$

c) Determinación del Coeficiente de Cohesión de Lodos (K)**Procedimiento.**

(Referencia "Manual Técnico del Agua – Dégreumont 1989, 1998 y 2007)

- Tomar muestras del manto de lodo a diferentes profundidades y luego obtener una mezcla.
- Medir 100 ml de agua decantada en una probeta graduada del decantador a evaluar, y vaciar en los vasos de 50 ml (cinco muestras, cada uno de 20 ml. De agua decantada).
- Verter la muestra de lodo al decantador en una probeta piloto de 250 ml.
- Homogenizar la muestra del lodo en el decantador probeta, cerrando con la palma de la mano e invirtiendo sucesivamente la probeta de abajo hacia arriba, por diez segundos y luego moviendo en forma circular por diez segundos más.
- Dejar sedimentar el lodo contenido en el decantador probeta piloto por un tiempo de 5 minutos.
- Leer el volumen de lodo sedimentado, si el volumen leído es menor de 100 ml. entonces descargar parte del sobrenadante y enrasar con el lodo extraído y repetir hasta obtener 100 ml. de lodo después de 5 minutos de sedimentación,.
- Inmediatamente después Introducir en el decantador probeta piloto el embudo prolongado.
- Por este embudo se introduce el agua decantada previamente medida, evitando en todo momento el arrastre de burbujas. El agua debe ser introducida en forma intermitente o discontinua, dejando que desborde el exceso de agua por la parte superior del decantador probeta.
- Con lo cual se consigue expandir el lodo, lo que determina las velocidades ascensionales del agua que corresponden a diferentes estados de expansión del lodo por ejemplo, para volúmenes de control entre 190 y 110 ml.
- Cuando el volumen de lodo se encuentre 10 ml. por debajo es decir en 180 ml., agregar rápidamente 20 ml. de agua decantada por el embudo del decantador.

- Observar la expansión del volumen de lodo en 10 ml. por encima del volumen de control es decir para este caso el volumen de expansión es de 20 ml. alcanzando el volumen que corresponde a 200 ml en la probeta decantador de 250 ml.
- Repetir este paso hasta completar con la descarga de los 100 ml. de agua decantada para el 1er volumen de control.
- Parar el cronómetro cuando después de haber adicionado todo el agua decantada, el volumen de lodo alcance el valor del volumen de control, en este caso 190 ml.
- Registrar el tiempo total en segundos de la descarga de los 100 ml. de agua decantada.
- Repetir los pasos anteriores para los demás volúmenes de control: 170 ml., 150 ml. 130 ml. y 110 ml.
- Realizar el gráfico volumen versus velocidad, y obtener el valor de K.

d) Regulación del Caudal de Tratamiento

Procedimiento.

Por accionamiento del dispositivo electrónico de las compuertas de captación de agua del decantador utilizando el automatismo existente a través del SCADA (Sistema de adquisición y control de datos).

3.5.3.2. Técnicas Analíticas

- a) Turbiedad,** la medición de este parámetro se realiza siguiendo el método N° 2130 "Método Nefelométrico" del Manual "Standard Methods" For the Examination of Water & Wastewater, 21st Edición – 2005, elaborado por American Public Health y American Water Work Association.
elaborado por American Public Health y American Water Work Association.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados obtenidos corresponden al diseño de las combinaciones de experimentos señalados en el cuadro 4 "Combinaciones de Experimentos" del capítulo III, cada experimento corresponde a los valores asignados a la variable independiente V.I. "Condición de Equilibrio Hidráulico como Factor Determinante" para el presente estudio fueron el caudal de tratamiento Q y altura de agua en la campana de vacío h_c , los experimentos fueron realizados para cada coagulante químico empleado en el tratamiento de aguas de la Planta de La Atarjea, Sulfato de Aluminio y Cloruro Férrico, las dosis empleadas de estos coagulantes fueron previamente establecidas y fijadas mediante los ensayos correspondientes en función a las características fisicoquímicas del agua a tratar. Las pruebas se realizaron durante los meses de estiaje (mayo – setiembre) donde las características del agua cruda se mantienen constantes en cuanto a turbiedad.

Las condiciones operativas para los experimentos fueron:

Condiciones de Operación

- Regulación de Pulsación: $T_1 = 30$ s. $T_2 = 15$ s.
- Turbiedad de entrada al decantador: 17 N.T.U. a 28 N.T.U.
- Coagulante:
 - o Sulfato de Aluminio, Dosis = 24 p.p.m.
 - o Cloruro Férrico, Dosis = 18 p.p.m.
- h_c : altura de agua en la campana del decantador variable

Los resultados obtenidos fueron para los indicadores de la variable dependiente V.D. "Optimización del Manto de Lodos del Decantador Pulsator"

- Altura del manto de lodos: H

- Concentración de lodos: %[lodos]
- Coeficiente de Cohesión de Lodos: K
- Gradientes de Velocidad en el manto de lodos: G
- Turbiedad Residual medido como: % Remoción de Turbiedad

Los valores encontrados para los coagulantes: Sulfato de Aluminio y Cloruro Férrico se observan en los cuadros diseñados para cada indicador que representan los valores de las series de mediciones, realizadas durante el desarrollo de los experimentos. Las tomas de muestras entre cada experimento fueron después de 4 horas de haber iniciado el nuevo experimento. Dichos experimentos fueron realizados entre los años 1998 y 2008, ya que se quiso verificar, a lo largo de ese lapso de tiempo, las tendencias obtenidas.

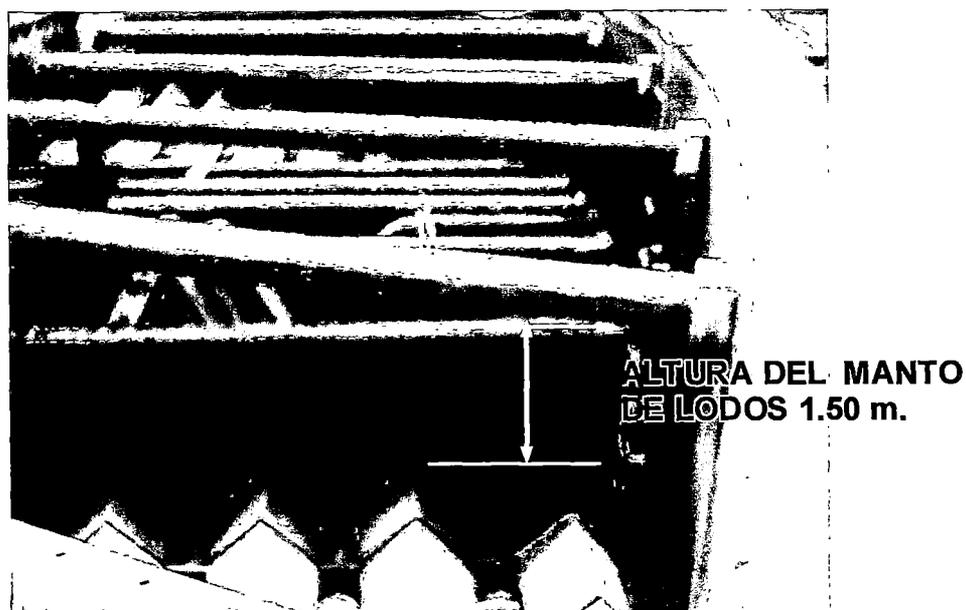
4. 1. Resultados

4.1.1. Altura del Manto de Lodos

De acuerdo al diseño de los decantadores en estudio, la altura total que el manto de lodos debe alcanzar es de 1.5 m. medidos entre el borde del concentrador de lodos y la parte superior de los deflectores. Como se muestra en la siguiente Fig. N° 27.

La medición de la altura del manto de lodos se realizó previa a la toma de muestras para la medición de la concentración de lodos en los diferentes niveles del manto; para cada experimento se realizaron 4 observaciones luego se obtuvo el valor promedio.

Fig. N° 27 Ubicación del Manto de Lodos



Fuente: Decantador Planta La Atarjea

Cuadro 7 Resultados de Mediciones de Altura del Manto de Lodos

Caudal: m ³ /s	Grupo	hc = m.	Altura del Manto de Lodos: H									
			Valores obtenidos con el Sulfato de Aluminio					Valores obtenidos con el Cloruro Férrico				
			H: m				Promedio	H: m				Promedio
Q ₁ = 1.45	Control	hc1: 0.4	0.38	0.55	0.55	0.5	0.50	0.47	0.55	0.45	0.52	0.5
	Experimental	hc2: 0.6	0.95	1.1	0.85	1.15	1.01	1.05	1	1.33	1.34	1.2
	Experimental	hc3: 0.8	1.3	1.5	1.3	1.4	1.38	1.6	1.5	1.5	1.4	1.5
Q ₂ = 1.66	Control	hc1: 0.4	0.93	1.1	1	0.97	1.0	1.32	1.27	1.25	1.3	1.3
	Experimental	hc2: 0.6	1.6	1.5	1.5	1.4	1.50	1.53	1.56	1.53	1.51	1.5
	Experimental	hc3: 0.8	1.45	1.53	1.49	1.53	1.50	1.52	1.54	1.47	1.48	1.5
Q ₃ = 1.75	Control	hc1: 0.4	0.97	1.1	0.93	0.96	1.00	1.5	1.5	1.49	1.52	1.5
	Experimental	hc2: 0.6	0.85	0.8	0.78	0.77	0.80	1.32	1.34	1.33	1.31	1.3
	Experimental	hc3: 0.8	0.68	0.7	0.69	0.72	0.70	1.2	1.2	1.3	1.2	1.2

Altura de agua en la campana: h_c

Grupo de Control

En general los resultados promedios que se observan en el cuadro 7 "Resultados de Mediciones de Altura del Manto de Lodos" para los coagulantes sulfato de aluminio y cloruro férrico, indican que, a mayor altura de agua en la campana h_c se presentó el incremento de la altura del manto de lodos H, que se

explica por una mayor velocidad de flujo V_o'' que permitió el desplazamiento del manto de lodos hacia los niveles superiores, debido al incremento de h_c con el que se alcanzó el caudal Q'' durante la descarga de agua de la campana. En el cuadro 8 se observan los diferentes valores de caudal de ingreso Q y velocidad de flujo V_o tanto en el llenado y descarga de agua de la campana, hacia el decantador. Los cálculos de los parámetros del cuadro 8 y los valores de velocidad de sedimentación del cuadro 9, están descritos en el anexo 2.

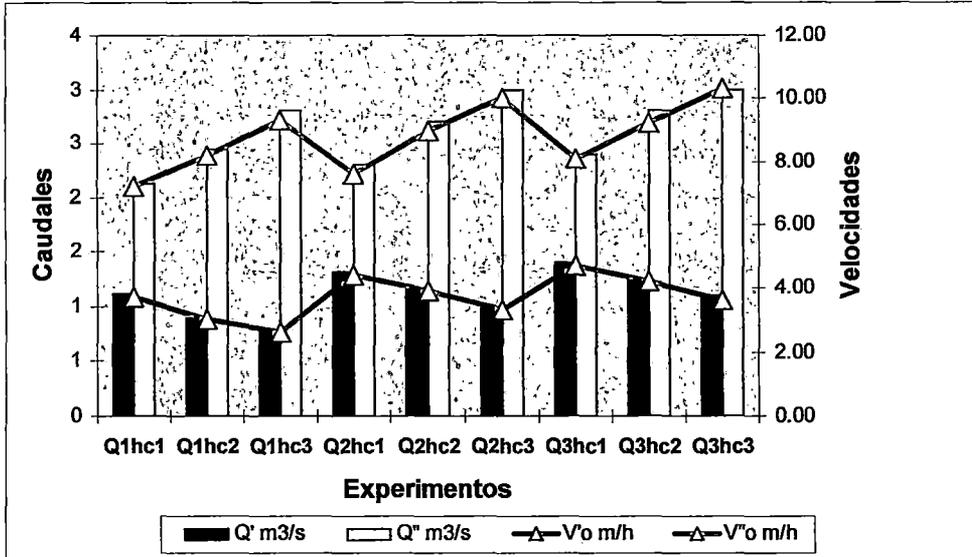
Cuadro 8 Caudal y Velocidad de Flujo durante el Llenado y Descarga para Diferentes Valores de Caudal y Altura de Agua en la Campana

Pulsación	Parámetros	hc: altura de agua en la campana m.								
		$Q_1 = 1.25 \text{ m}^3/\text{s}$			$Q_2 = 1.66 \text{ m}^3/\text{s}$			$Q_3 = 1.75 \text{ m}^3/\text{s}$		
		hc1: 0.4	hc2: 0.6	hc3: 0.8	hc1: 0.4	hc2: 0.6	hc3: 0.8	hc1: 0.4	hc2: 0.6	hc3: 0.8
$T_1 = 30 \text{ s. llenado}$	Q' m^3/s	1	0.9	0.78	1	1	0.99	1.4	1.25	1.1
	V_o' m/h	3.73	3.05	2.60	4.40	3.90	3.30	4.70	4.20	3.60
$T_2 = 15 \text{ s. Descarga}$	Q'' m^3/s	2.12	2.45	2.8	2.3	2.7	3	2.4	2.8	3
	V_o'' m/h	7.2	8.20	9.3	7.6	9.0	10	8.1	9.2	10.3

- Q' : Caudal de ingreso al decantador durante el llenado
 V_o' : Velocidad de flujo al ingreso del decantador durante el llenado
 Q'' : Caudal de ingreso al decantador durante la descarga
 V_o'' : Velocidad de flujo al ingreso del decantador durante la descarga

Gráfico 1

Caudal y Velocidad de Flujo durante el Llenado y Descarga de Agua de la Campana



En el cuadro 7, se observaron que, tanto para el grupo de control, como para los grupos experimentales, fijados para los caudales de $Q_1 = 1.45 \text{ m}^3/\text{s}$ y $Q_2 = 1.66 \text{ m}^3/\text{s}$, se produjo la relación directa entre el valor de la h_c con la altura H del manto, es decir a $>$ caudal Q y $>$ h_c , la altura del manto de lodos aumentó en forma progresiva.

Sin embargo para el caudal $Q_3 = 1.75 \text{ m}^3/\text{s}$, los valores obtenidos para los grupos experimentales, presentaron el efecto inverso, es decir que cuanto mas alto son los valores de h_c la altura H del manto de lodos comenzó a disminuir, como consecuencia de la pérdida de los lodos, al producirse un fuerte incremento de caudal durante la descarga de agua de la campana Q'' donde la velocidad de sedimentación interferida V''_{si} para estas condiciones superó el valor máximo de la velocidad de flujo V''_o que se presentó en el manto de lodos, para las alturas de $h_c = 0.6 \text{ m}$. y $h_c = 0.8 \text{ m}$. tal como se observan en los cuadros de velocidades. En este caso la velocidad V''_s superó el estado de fluidización

normal, correspondiente a la velocidad de sedimentación, produciéndose el estado de transporte de las partículas hacia la superficie del decantador.

Cuadro 9 Velocidades de Sedimentación Interferida del Manto de Lodos antes del Llenado y Después de la Descarga de Agua de la Campana

Coagulantes	Parámetros	Velocidad de Sedimentación Interferida: V_{s_i}								
		$Q_1 = 1.45 \text{ m}^3/\text{s}$			$Q_2 = 1.68 \text{ m}^3/\text{s}$			$Q_3 = 1.75 \text{ m}^3/\text{s}$		
		hc1: 0.4	hc2: 0.6	hc3: 0.8	hc1: 0.4	hc2: 0.6	hc3: 0.8	hc1: 0.4	hc2: 0.6	hc3: 0.8
C. Férrico	$V's \text{ m/h}$	5.9	6.1	6.56	6.7	7	7.4	7.2	7.5	8
S. Aluminio	$V's \text{ m/h}$	6.00	6.00	6.50	6.90	7.00	7.30	7.00	7.90	8.30
C. Férrico	$V''s \text{ m/h}$	10	12.5	15	10.6	13.4	15.6	11	14.1	16.2
S. Aluminio	$V''s \text{ m/h}$	9	12.00	14.7	10.6	13.0	15.6	11	13.5	15.9

$V's_i$: Velocidad de sedimentación interferida antes del llenado

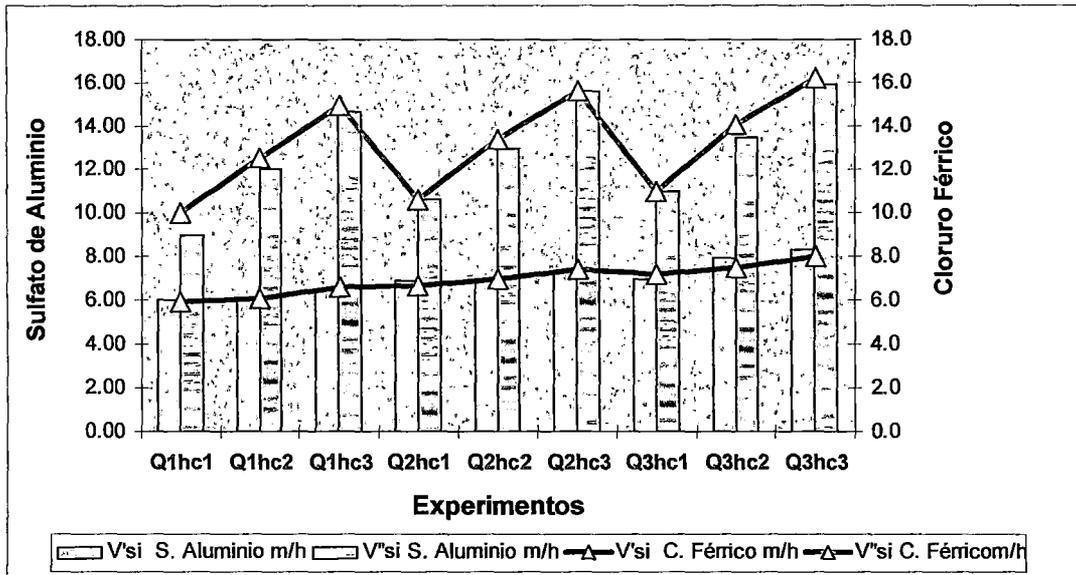
$V''s_i$: Velocidad de sedimentación después de la descarga

C. Férrico: Cloruro Férrico

S. Aluminio: Sulfato de Aluminio

Los resultados obtenidos para el grupo de control para los diferentes caudales, los valores de H en ningún caso alcanzaron el valor máximo de 1.5 m. puesto que la expansión del manto se realizó, solo en las capas inferiores no se propagó hasta la superficie demostrando que el manto de lodos funciona mas en el estado de reposo, que en el estado de fluidización normal; predominando la compresión del manto en vez de la expansión. En este caso los lodos caen, por gravedad a la base del decantador y se depositan como lodos acumulados, perdiéndose de esta manera los lodos como manto en suspensión.

Gráfico 2
Comparación de Velocidades de Sedimentación Interferida para Sulfato de Aluminio y Cloruro Férrico antes del Llenado y Después de la Descarga de Agua de la Campana

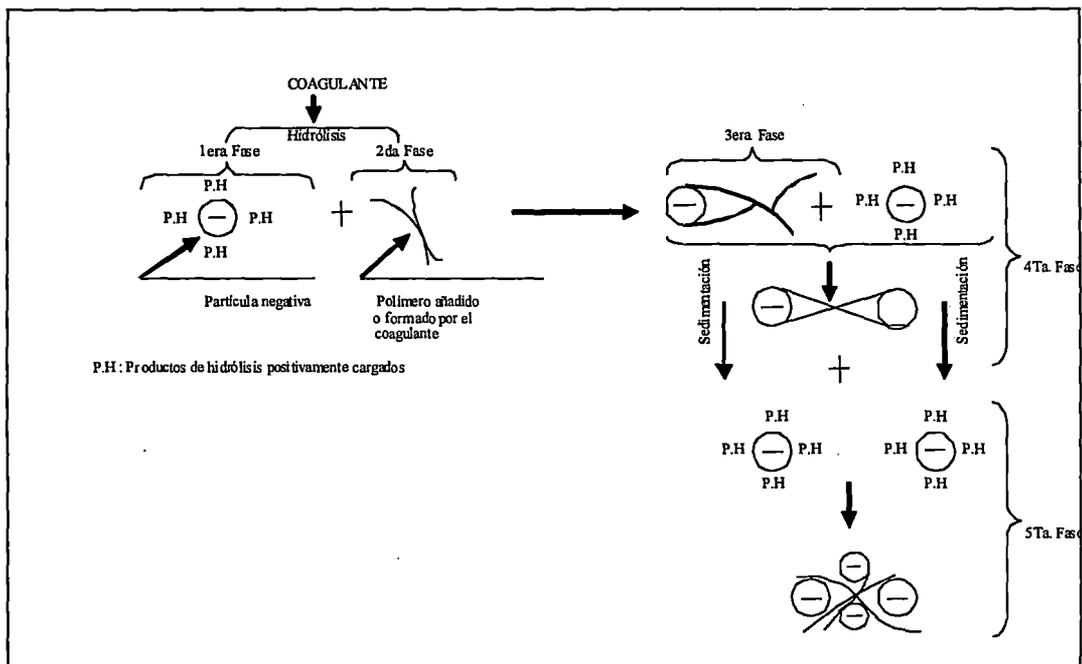


En el cuadro 7, se observa también que hay diferencias de alturas del manto H, entre las aplicaciones de los coagulantes, así, los valores de H obtenidos con el coagulante Sulfato de Aluminio son menores que el obtenido con el coagulante Cloruro Férrico, debido a las propiedades fisicoquímicas propias de cada uno de ellos, dónde el Cloruro Férrico produjo mayor cantidad de flóculos y que además favoreció a la aglomeración y estabilidad de los mismos en el manto, con bastante rapidez; por las condiciones hidráulicas aplicadas; a diferencia de los flóculos obtenidos con el Sulfato de Aluminio. Cabe destacar que cuando el caudal fue muy alto $Q_3 = 1.75 \text{ m}^3/\text{s}$, aún con la dosificación del Cloruro Férrico, se produjo el arrastre de los flóculos y por ende se perdió altura del manto de lodos. Aún así la pérdida fue menor que el que se produjo con el Sulfato de Aluminio.

4.1.2. Concentración del Manto de Lodos

La concentración de lodos en el manto esta expresado como la cantidad de flóculos que se encuentran aglomerados y en suspensión, gracias a la intermitencia de la descarga de agua en la campana de vacío h_c para cada caudal y por el efecto de las pulsaciones, efecto que se presenta en la zona del manto. Los Flóculos, se formaron por el desarrollo de los microfloculos formados durante el proceso de coagulación. Fig. N° 28

Fig. N° 28 Fases del Proceso de Coagulación - Floculación



Para la medición de concentración de lodos se tomaron muestras de lodos para los diferentes niveles o alturas del manto, medidos desde el borde del decantador hacia el fondo (Fig. N° 29), iniciándose las mediciones a 2.5 m. que corresponde a la parte superior del manto (interfase lodo-agua, limitado por el vertedero del concentrador de lodos) luego se procedió a tomar muestras cada 0.50 m. hasta alcanzar los 4.0 m., en el sentido opuesto al flujo, que corresponde a la parte inferior del manto, ubicado sobre la cresta de los deflectores. La presencia de lodos en los niveles superiores del manto tuvo relación directa con

la velocidad de flujo, durante la descarga de agua de la campana correspondiente al caudal que se esta tratando, así como de la velocidad de sedimentación interferida.



Los resultados que se muestran en los cuadros 10 y 11 "Concentración de Lodos" para el Sulfato de Aluminio y Cloruro Férrico, representan los valores promedios para los diferentes alturas de la serie se mediciones.

Cuadro 10

Manto de lodos H: m	CONCENTRACIÓN DE LODOS %[lodo]								
	SULFATO DE ALUMINIO								
	Q ₁ = 1.45 m ³ /s			Q ₂ = 1.66 m ³ /s			Q ₃ = 1.75 m ³ /s		
	hc1: 0.4	hc2: 0.6	hc3: 0.8	hc1: 0.4	hc2: 0.6	hc3: 0.8	hc1: 0.4	hc2: 0.6	hc3: 0.8
2.5		Trazas	6	Trazas	5.7	8.8	Trazas	6.4	3.6
3.0	Trazas	5.2	8.8	4.2	9.7	10.5	6	7.8	7.4
3.5	8.2	9.8	12.6	8.6	11.6	12.4	10.8	11.2	11.6
4.0	8.8	12	12.2	13.6	12.7	12.8	12.0	10.6	9.5
Promedio	8.5	9.0	10	9	10	11	9.6	9.0	8.0

h_c: altura de agua de la campana

	Grupo Control
	Grupo Experimental

Cuadro 11

Manto de lodos H: m	CONCENTRACIÓN DE LODOS %[lodo]								
	CLORURO FÉRRICO								
	$Q_1 = 1.45 \text{ m}^3/\text{s}$			$Q_2 = 1.66 \text{ m}^3/\text{s}$			$Q_3 = 1.75 \text{ m}^3/\text{s}$		
	hc1: 0.4	hc2: 0.6	hc3: 0.8	hc1: 0.4	hc2: 0.6	hc3: 0.8	hc1: 0.4	hc2: 0.6	hc3: 0.8
2.5	Trazas	Trazas	7.5	9.5	10.3	10.2	8.7	9.3	8.8
3.0	Trazas	6.4	10.7	10.0	12.5	10.8	9.6	9.4	9.9
3.5	7.2	10.6	13	11.7	14	12.5	12.5	9.7	10.3
4.0	9.8	13	13.5	12.9	14.5	13.4	13.0	9.5	9
Promedio	8.5	10.0	11.2	11.0	13	12	11.0	9.5	9.5

h_c : altura de agua de la campana

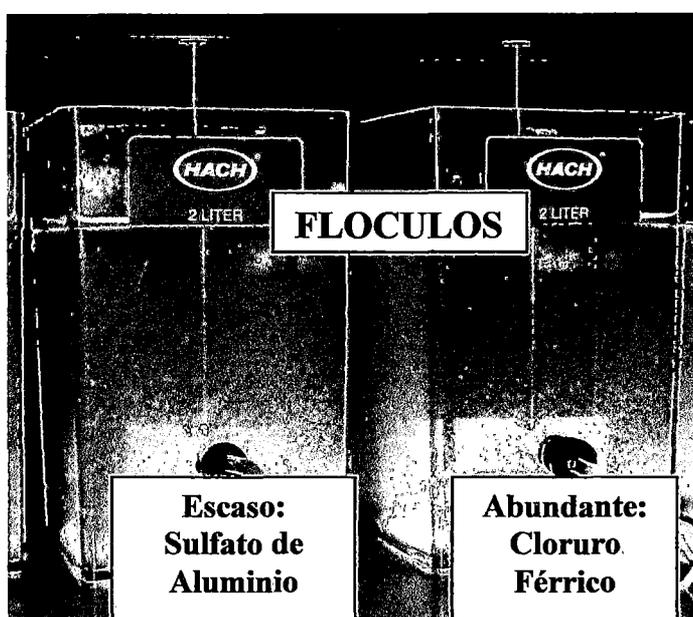
	Grupo Control
	Grupo Experimental

Para caudal $Q_1 = 1.45 \text{ m}^3/\text{s}$.- Para altura de agua en la campana $h_c = 0.40\text{m}$. para ambos coagulantes no se encontraron lodos en los niveles superiores del manto, correspondientes a $H = 2.5\text{m}$. y $H = 3.0\text{m}$. (medidos desde la parte superior hacia la base del decantador) debido a que el flujo de agua Q no fue lo suficiente para desplazar los lodos hacia la parte superior; por lo tanto, el manto de lodos tendió a sedimentar con mas facilidad, ya que la velocidad de sedimentación V_{si} fue bastante superior a la velocidad ascensional V_o . ver cuadro 9, predominando en este caso el estado de reposo, que dentro del esquema de "Fluidización" señalado por el Profesor Edeline en su texto "Depuración Fisicoquímica del Agua" el estado de reposo del manto de lodos viene a ser el inicio para la fluidización, fenómeno que ocurrió durante los experimentos solo en las capas inferiores del manto.

A través del accionamiento de las válvulas de fondo del decantador se observó que el manto de lodos había caído hasta la base, encontrándose más cantidad de lodos acumulados, cuando se empleó el Cloruro Férrico; lo cual fue, porque los flóculos formados con este coagulante eran abundantes y más pesados (mayor velocidad de sedimentación) que los obtenidos con Sulfato de Aluminio lo que se pudo observar en los ensayos "Jar -Test" para determinación de dosis de los coagulantes Fig. N° 30 y en las pruebas de concentración de lodos medidos durante los experimentos.

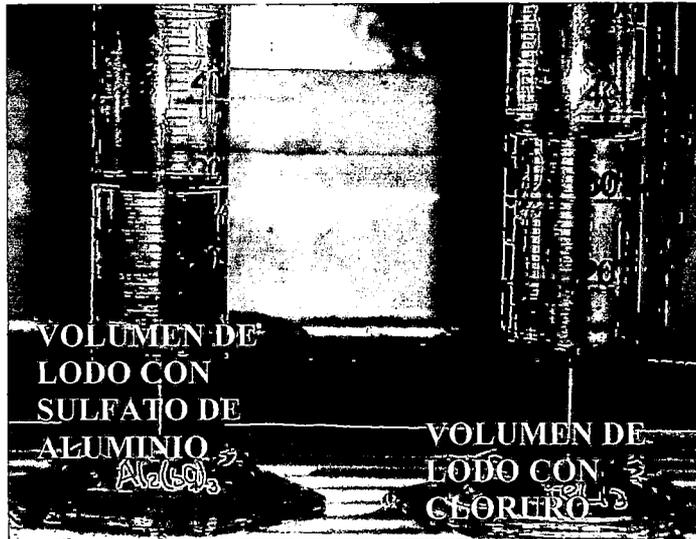
Y además el volumen de lodos generado con el Cloruro Férrico fue aproximado 30% más que el obtenido con el sulfato de aluminio para las mismas características del agua a tratar. Fig. 31

Fig. N° 30 Formación y Desarrollo de Flóculos



Esto trajo consigo, que en las capas inferiores correspondientes a $H = 3.5$ m. y $H = 4.0$ m. la concentración de flóculos se encontraban en cantidad abundante, la diferencia de resultados entre los coagulantes fue que las concentraciones medidas en estos niveles fueron superiores para el Cloruro Férrico que para el Sulfato de Aluminio, tal como se observan en los cuadros 10 y 11 respectivamente.

Fig. N° 31 Comparación de Volumen de Lodos Generados con los Coagulantes



A medida que la altura de agua en la campana aumentaba de valor, los lodos sedimentados tendieron a subir hacia los niveles superiores.

Para caudal $Q_2 = 1.66 \text{ m}^3/\text{s}$.- En este caso con el incremento de caudal y del volumen de agua de la campana de vacío V_c , para los valores de h_c asignados; los lodos acumulados en la base del decantador que aún no habían sido removidos hacia los niveles superiores, tuvieron la oportunidad de ocupar estos niveles, enriqueciéndose el manto de lodos tanto en concentración como en altura. De los valores registrados se observa la tendencia directa, que a mayor profundidad mayor concentración de lodos (Fig. 32).

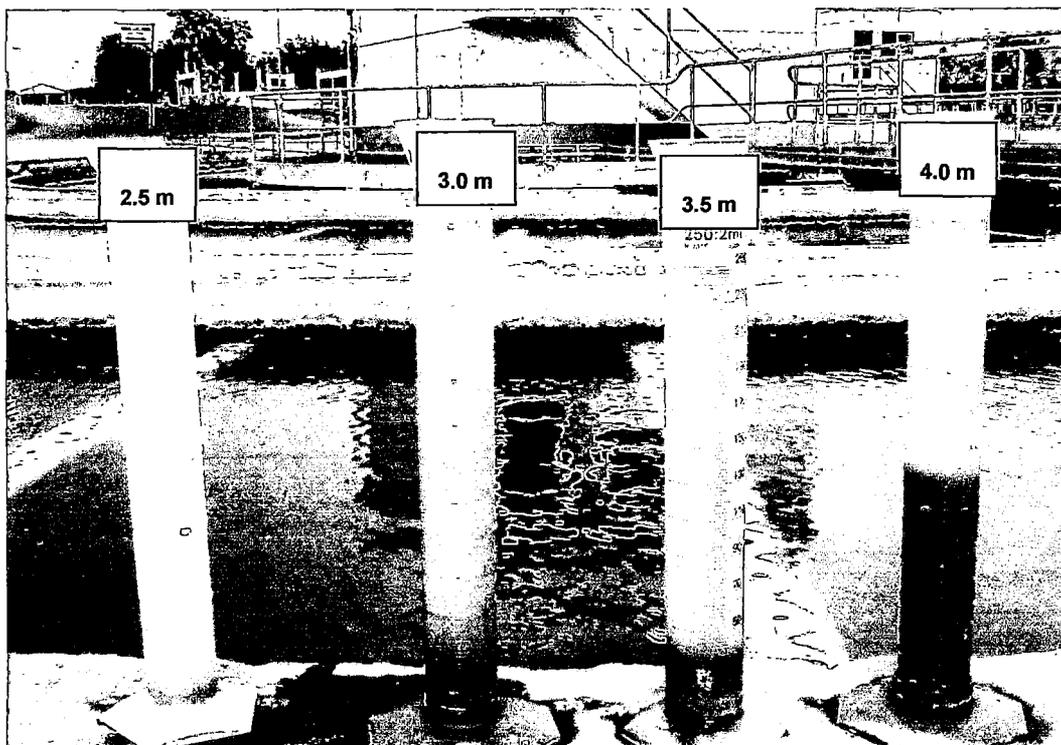


Fig. N° 32 Concentración de Lodos a diferentes Alturas del Manto

Fuente: Planta de La Atarjea

En este caso también se observó a través del accionamiento de las válvulas de fondo, que la presencia de lodos acumulados, después de haber realizado la experiencia con Q_2h_{c3} para cada coagulante, no se encontraban en cantidad significativa, de acuerdo a las mediciones de lodos descargados durante el accionamiento de las válvulas, lo que demostró que los lodos sedimentados ya se encontraban en suspensión al haber sido desplazados hacia los niveles superiores por acción de las velocidades de flujo.

Por lo tanto el manto de lodos, durante las descarga de agua al expandirse hacia los niveles superiores se fluidizaba, es decir que los flóculos para alcanzar este estado se separaban unas de otras para entrar en expansión, luego sedimentaban para entrar al estado de reposo.

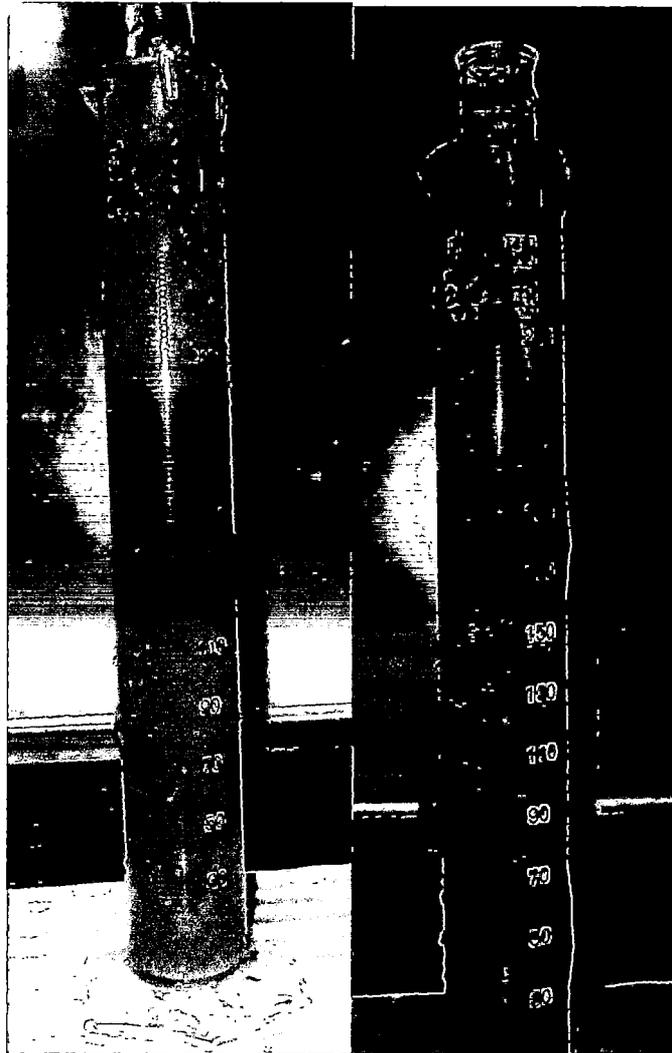
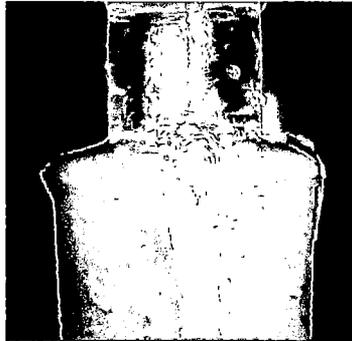
Para caudal $Q_3 = 1.75 \text{ m}^3/\text{s}$.- El manto de lodos se encontró en suspensión ocupando todos los niveles, solo el que correspondió al Sulfato de Aluminio para el experimento Q_3h_{c1} en el nivel $H = 2.5 \text{ m}$. presentó pequeñísimas cantidades de flocs a nivel de "trazas" que con los métodos para determinar la concentración

no eran posibles de ser medidos ya que requerían de mayor tiempo que lo indicado por el método para sedimentar o acumularse, (el volumen de lodos acumulado es el que se mide).

Para este caudal, en los cuadros de resultados 10 y 11, se observan también, que cuando se producen las descargas de agua de la campana correspondientes a los valores de h_c de 0.6m. y 0.8 m. los valores de la concentración de lodos disminuyeron en el nivel inferior del manto $H = 4.0$ m., siendo mas notorio para el obtenido con el sulfato de aluminio, medidos después de 8 horas.; durante estos experimentos se midieron en paralelo los valores de turbiedad a la salida del decantador, registrándose valores mas bajos del porcentaje de remoción de turbiedad (62% y 70% de porcentaje de remoción de turbiedad para el Sulfato de Aluminio y Cloruro Férrico respectivamente y correspondientes a los experimentos Q_3h_{c3} Cuadros 17 y 18) lo cual indicó la pérdida de flóculos del manto, por desprendimiento progresivo.

La continuidad del funcionamiento del manto para estas condiciones por tiempos prolongados superiores a las 8 horas (tiempo medido durante el experimento, se observó presencia abundante de flóculos en la superficie del decantador, pero aún se tenía el manto de lodos con concentración menor) presentaba la tendencia de producir la pérdida total del manto, por el arrastre masivo de los flóculos; experimentos realizados en la probeta piloto utilizando flujos equivalentes a los experimentados con este caudal han producido desprendimientos de flóculos, siendo arrastrados por la velocidad de flujo hacia la superficie. Fig. N° 33.

Fig. N° 33 R rompimiento del Manto de Lodos y Arrastre de Flóculos a la Salida del Decantador



Simulación de Pérdida del Manto de Lodos y Transporte de Flóculos a la Salida del Decantador con Caudal Elevado - Decantador Piloto Tipo Probeta

Fig. N° 34 Fondo de Decantador sin Manto

Simulado en Decantador Piloto Tipo Probeta por Caudal Elevado

4.1.3. Coeficiente de Cohesión

Los valores del coeficiente de cohesión de lodos K indican las características de la cohesión de los flóculos del manto, que corresponden a los diferentes estados de expansión - sedimentación que se han producido con los diferentes valores de las h_c descargadas durante cada ciclo de las pulsaciones.

Se pudo verificar las características reales de los flóculos formados con los coagulantes empleados, teniendo en cuenta la variación de la turbiedad del agua de ingreso al decantador en el rango indicado, en las **Condiciones de Operación** señalados al inicio de este capítulo.

Para un manto de lodos bien constituidos de sedimentación rápida después de la expansión, el coeficiente puede alcanzar valores en el rango de $K = 0.8$ a 1.2 .

Cuadro 12

Caudal: m ³ /s	Grupo	hc = m.	Coeficiente de Cohesión de Lodos: K									
			Valores obtenidos con el Sulfato de Aluminio					Valores obtenidos con el Cloruro Férrico				
			K				Promedio	K				Promedio
Q ₁ = 1.45	Control	hc1: 0.4	0.65	0.62	0.6	0.55	0.6	0.77	0.75	0.73	0.76	0.75
	Experimental	hc2: 0.6	0.75	0.72	0.7	0.75	0.73	0.78	0.82	0.8	0.8	0.8
	Experimental	hc3: 0.8	0.78	0.76	0.78	0.79	0.78	0.86	0.87	0.87	0.84	0.86
Q ₂ = 1.66	Control	hc1: 0.4	0.79	0.8	0.8	0.75	0.80	0.81	0.79	0.78	0.82	0.8
	Experimental	hc2: 0.6	0.83	0.85	0.85	0.85	0.85	0.98	1.03	0.98	0.99	1.0
	Experimental	hc3: 0.8	0.85	0.86	0.86	0.87	0.86	0.95	0.93	0.89	0.91	0.92
Q ₃ = 1.75	Control	hc1: 0.4	0.81	0.82	0.82	0.81	0.82	0.86	0.86	0.87	0.86	0.86
	Experimental	hc2: 0.6	0.84	0.84	0.85	0.84	0.84	0.83	0.84	0.84	0.84	0.84
	Experimental	hc3: 0.8	0.81	0.8	0.81	0.81	0.81	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85

Altura de agua en la campana: h_c

Grupo de Control

Los valores obtenidos están registrados en el cuadro 12, durante el desarrollo de los experimentos se observaron, que el comportamiento de los flóculos durante la expansión del manto, producido por la descarga de agua de la campana, refleja:

- Que los flóculos formados con Sulfato de Aluminio y Cloruro Férrico para los valores de caudal y h_c experimentados; se caracterizaron por ser frágiles y ricos en agua (esponjoso) Fig. N° 35 para los experimentos obtenidos con Q₁h_{c1}, Q₁h_{c2}, y Q₁h_{c3} con ambos coagulantes, sin embargo a medida que aumentaba el valor de h_c, los valores obtenidos fueron más cercanos al límite inferior del rango, siendo el más bajo el obtenido para el Sulfato de Aluminio.
- Los flóculos producidos presentaban características de ser frágiles, esto se debió principalmente porque la velocidad de flujo V^o correspondientes a estos experimentos fue el más bajo o el más alto, en ambos casos la fragilidad se debió, **primero** a la falta de expansión del manto funcionando en este caso con predominio del estado de reposo o compresión (produciendo floculación incompleta) y en estas circunstancias los flóculos no interactuaron con la energía cinética necesaria que les permitiera colisionar y producir su aglomeración para una buena constitución del manto; por ser la velocidad de flujo V^o el más bajo, NALCO, en su libro **Manual del Agua T-1** menciona que "el

proceso de coagulación y floculación se logra, por lo general, añadiendo coagulantes químicos y aplicando la energía de mezclado requeridos” en este caso la energía de mezclado proveniente de la energía cinética no fue lo suficiente.

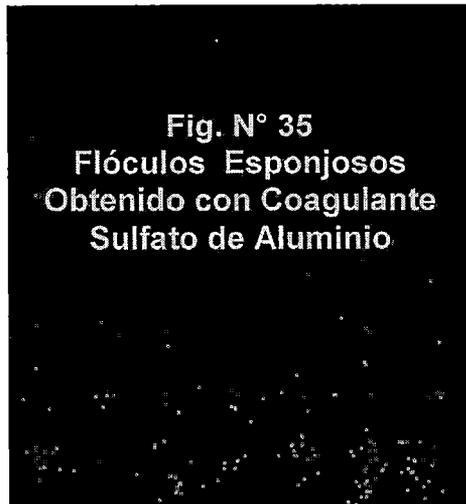


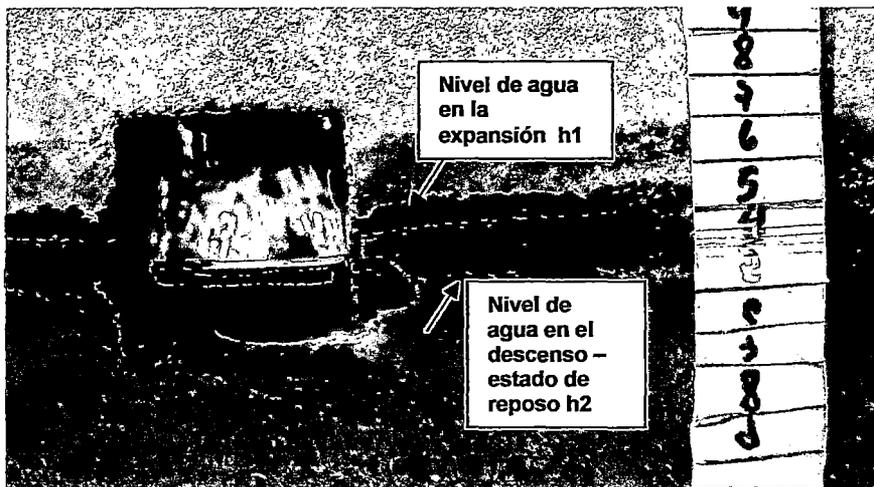
Fig. N° 35
Flóculos Esponjosos
Obtenido con Coagulante
Sulfato de Aluminio

- Y **segundo**, cuando la velocidad de flujo V''_0 fue mas alto, el manto de lodos superó el límite máximo de expansión o fluidización, produciendo el desprendimiento de los flóculos entre si y se produjo arrastre del manto de lodos hacia la parte superior, pasando el manto de lodos del estado fluidizado al estado de transporte en estas circunstancias después de haber cesado la expansión los flóculos no pudieron sedimentar en conjunto ya que se encontraban muy dispersos.
- Que la relación de las alturas de desplazamientos ascendente y descendente del manto, medidos en el decantador (Fig. N° 36) y registrados en el cuadro 13 “Altura de Desplazamiento del Manto de Lodos”, mostraron que a menor caudal y menor altura de agua en la campana, la expansión es la mas baja y cuando el caudal fue mas alto con valor mas grande de h_c la expansión fue muy grande, es en este momento que los flóculos se desprendieron y dispersaron dificultando su

sedimentación no obstante que la altura de descenso del agua en el decantador fue grande, no habiéndose presentado el equilibrio hidráulico para mantener el manto de lodos en suspensión después de la expansión.

Fig. N° 36

Variación de nivel de agua en el decantador por efecto pulsante



Cuadro 13

Altura de Desplazamiento del Manto de Lodos Δh

Q: m ³ /s	Grupo	hc : m	Sulfato de Aluminio			Cloruro Férrico		
			h ₁	h ₂	$\Delta h = h_2 - h_1$	h ₁	h ₂	$\Delta h = h_2 - h_1$
Q ₁ : 1.45	Control	hc1: 0.4	0.8	1.55	0.75	0.84	1.6	0.76
	Experimental	hc2: 0.6	0.95	1.65	0.7	0.95	1.65	0.7
	Experimental	hc3: 0.8	1.15	1.98	0.83	1.15	2.05	0.9
Q ₁ : 1.66	Control	hc1: 0.4	1.18	2.05	0.87	1.18	2.1	0.92
	Experimental	hc2: 0.6	1.4	2.4	1	1.38	2.4	1.02
	Experimental	hc3: 0.8	1.5	2.6	1.1	1.52	2.65	1.13
Q ₁ : 1.75	Control	hc1: 0.4	1.48	2.5	1.02	1.52	2.6	1.08
	Experimental	hc2: 0.6	1.54	2.7	1.16	1.56	2.7	1.14
	Experimental	hc3: 0.8	1.58	2.9	1.32	1.63	3	1.37

h₁: altura de expansión en cm.

h₂: altura de compresión en cm.

Δh : variación de niveles debe ser menor igual a 1.0 cm. según Eckenfelder y Eddi.

- Que cuando los flóculos tenían colisiones mas frecuentes, aumentaban de tamaño y peso cuya sedimentación era fácil, fenómeno que ocurría también como producto de las reacciones secundarias catalizadas por las interacciones entre los flóculos producidos por la energía disipada proveniente de la descarga y llenado de agua de la campana de vacío durante las pulsaciones, reacciones que también se presentaban debido a la alta concentración de iones de los metales Aluminio y Hierro de los coagulantes, existentes (medidos) en el manto de lodos. Conforme se incrementó el caudal y los valores de h_c los valores de K obtenidos permanecieron dentro del rango de valores de K.

Cuadro 14 Contenido de Aluminio y Hierro en el Manto de Lodos

COAGULANTE	Contenido de Aluminio (mg/l)		
	Entrada	Decantada	Acumulacion
Sulfato de Aluminio	0.73	0.13	0.6
	0.73	0.115	0.6
	0.73	0.173	0.6
	0.74	0.158	0.6
	0.73	0.037	0.7
COAGULANTE	Contenido de Hierro (mg/l)		
	Entrada	Decantada	Acumulacion
Cloruro Férrico	0.793	0.417	0.376
	0.793	0.106	0.689
	0.793	0.121	0.672
	0.794	0.086	0.708
	0.807	0.066	0.741
	0.804	0.049	0.756

Acumulación en Manto de Lodos

- Al igual que en la determinación de los indicadores de altura y concentración de lodos, se produjo la desaglomeración y ruptura de los flóculos, cuando se continuó incrementando el caudal Q y la h_c rompiéndose la estructura de aglomeración, debido al incremento de la fricción del agua con los flóculos: Kaufman y al, (Físico Investigador de Norte América, Procesos de Coagulación y Floculación) identificaron dos formas de ruptura de los flóculos *“por erosión de las partículas primarias de la superficie de los flóculos y por fractura del flóculo propiamente*

dicho, formando un grupo de aglomerados floculentos de menor tamaño. Para comprender mejor el mecanismo de fragmentación de los flóculos debe distinguirse dos modos de acción hidrodinámica, de acuerdo con el tamaño de flóculos será mayor o menor que la microescala de la turbulencia, siendo mas significativa para flóculos de mayor tamaño y esta en función de la disipación de la energía por unidad de masa del fluido y del coeficiente de viscosidad dinámica”

- Que como consecuencia de la desaglomeración de los flóculos se produjo el arrastre de estos, hacia la parte superior del decantador, lo cuál se manifestó por la abundancia de flóculos visibles en la superficie del decantador, saliendo en el agua decantada. La salida de agua con exceso de flóculos fragmentados o “rotos” desmejoró la calidad del agua medido como Turbiedad, cuyo valor fue más alto que el que se obtuvo hasta antes del rompimiento.

Para estos experimentos el valor mas bajo del coeficiente de cohesión K fue el que correspondió a la combinación de experimentos $Q_1 h_{c1}$ para ambos coagulantes; incrementándose conforme aumentaban los valores h_c hasta alcanzar los valores de K en el rango de 0.8 a 1.2. El coagulante Cloruro Férrico en este caso presentó valores en este rango de valores casi en todos menos el indicado para $Q_1 h_{c1}$.

4.1.4. Gradiente de Velocidad

De las observaciones efectuadas en los experimentos realizados en la probeta piloto, durante la expansión, los flóculos se desordenaron y comenzaron a chocar unas con otras, para luego aglomerarse y aumentar la concentración de lodos.

Para la determinación del gradiente de velocidad en el manto de lodos se utilizó la ecuación de Camp, ec. (28) señalados en el punto 2.2.2.3. - f “Factores que permiten la Formación y Funcionamiento del Manto de Lodos”

Ecuación de Camp: $G = \sqrt{[\gamma h_f / t_r \mu]}$

Según esta ecuación el gradiente de velocidad depende del peso específico del agua, la pérdida de carga, viscosidad y tiempo de retención. La pérdida de carga que se presentó en el manto de lodos se calculó utilizando la ecuación de Pouseuille para medios filtrantes porosos (anexo 2).

Cuadro 15

Manto de lodos H: m	Gradiente de Velocidad: G								
	SULFATO DE ALUMINIO								
	Q ₁ = 1.45 m ³ /s			Q ₂ = 1.66 m ³ /s			Q ₃ = 1.75 m ³ /s		
	hc1: 0.4	hc2: 0.6	hc3: 0.8	hc1: 0.4	hc2: 0.6	hc3: 0.8	hc1: 0.4	hc2: 0.6	hc3: 0.8
2.5	Trazas	Trazas	2.4		3.5	4.3		2	2.7
3.0	Trazas	3.2	3.8	2.0	4.3	4.5	2.95	4.4	5.1
3.5	3	4.7	5.66	4.4	5.18	6	5.75	7.9	6
4.0	4.0	5	6.36	5.3	6.85	6.2	6.2	7.5	5.5
Promedio	3.5	4.3	4.6	3.9	5	5.3	5.0	5.5	4.8

h_c: altura de agua de la campana

	Grupo Control
	Grupo Experimental

Cuadro 16

Manto de lodos H: m	Gradiente de Velocidad: G								
	CLORURO FÉRRICO								
	Q ₁ = 1.45 m ³ /s			Q ₂ = 1.66 m ³ /s			Q ₃ = 1.75 m ³ /s		
	hc1: 0.4	hc2: 0.6	hc3: 0.8	hc1: 0.4	hc2: 0.6	hc3: 0.8	hc1: 0.4	hc2: 0.6	hc3: 0.8
2.5	Trazas		2.9	3.5	4.3	5.4	4	4.6	5.5
3.0	Trazas	3.4	3.7	4.6	5.6	5.8	6.2	6.3	6.7
3.5	4.2	4.6	7.3	5.8	7.3	7.4	7.3	7.5	6.5
4.0	4.8	5.8	7.8	6.5	7.8	8	8.2	7.3	7.6
Promedio	4.5	4.6	5.4	5.1	6.3	6.7	6.4	6.4	6.6

h_c: altura de agua de la campana

	Grupo Control
	Grupo Experimental

En los cuadros 15 y 16, se presentan los resultados de los cálculos obtenidos de los gradientes de velocidad G , efectuados para cada capa o nivel del manto de lodos encontrados, durante las mediciones de las alturas H y concentración de lodos como % [lodos], de los valores de Gradientes de Velocidad obtenidos para ambos coagulantes, se observaron:

- Que existe una correlación directa con la altura de agua en la campana, a excepción de los experimentos que correspondió al Sulfato de Aluminio, en la combinación Q_3h_{c3} ; los valores de gradiente de velocidad mas bajos encontrados fueron para la interfase agua – lodos, donde termina la altura del manto, así para los experimentos de las combinaciones Q_1h_{c1} y Q_1h_{c2} para ambos coagulantes.
- Que hay una correlación también con los valores de porcentajes de concentración de lodos, siendo a mayor concentración de lodos mayor gradiente de velocidad, debido a que la energía disipada, expresado en el valor de su pérdida de carga fue el mas alto al atravesar el agua por el nivel de mayor concentración.
- También se observó que a medida que la altura de agua en la campana aumentaba, los valores de los gradientes de velocidad también aumentaron en las capas superiores del manto en forma progresiva debido al enriquecimiento de la concentración de lodos en estos niveles.
- Sin embargo cuando la altura de agua en la campana fue el mas alto para el caudal mas alto, combinación Q_3h_{c3} se observó que el gradiente de velocidad en los niveles inferiores del manto se mantenían mas altos de lo requerido, lo que produjo el rompimiento de los flóculos, fragmentándolos en pequeños tamaños con menor densidad, siendo estos fácilmente transportados a la superficie del decantador, por la alta turbulencia que se presentó durante la descarga de agua, disminuyendo la concentración de lodos por aumento de la velocidad ascensional V''_o , que desplazó el manto hacia la superficie.
- Que el incremento del gradiente de velocidad produjo la fragmentación de los flóculos, Según Camp y Stein los fragmentos de

flóculos se presentan debido al esfuerzo cortante por las fuerzas de cizallamiento, que es *“la fuerza interna que desarrolla un cuerpo como respuesta a una fuerza cortante y que es tangencial a la superficie sobre la que actúa, el coeficiente de fricción se encuentra relacionado con la capacidad del medio a fluir es decir con la viscosidad. Si se aplica una fuerza de cizallamiento a una de las capas del fluido, por unidad de área, el rozamiento entre las distintas capas establece un gradiente de velocidad du/dz con que se mueve cada capa”*

4.1.5. Remoción de Turbiedad

El porcentaje de remoción de turbiedad, en plantas de tratamiento de agua con fines de consumo humano determina la eficiencia de los procesos, en este caso se refiere al proceso de **Decantación** realizado en los decantadores del tipo Pulsator, en el que se realiza el proceso de decantación de las partículas floculentas, formadas en el manto de lodos.

La turbiedad es el parámetro operacional principal utilizado para medir las eficiencias en cada etapa del proceso, es un indicador que facilita la toma de decisiones a utilizar, es a través de este indicador que se realizan las correcciones o mejoras en los procesos que son requeridos así como los ajustes o implementaciones de otras condiciones. Si bien es cierto que es necesario conocer también la remoción de otros componentes del agua sobre todo del tipo de parámetros fisicoquímicos, el conocimiento del valor de la turbiedad residual, permite a priori evaluar la calidad del agua decantada en relación al contenido de otras impurezas, así, si la turbiedad del agua decantada presenta un valor bajo es muy probable que el contenido fisicoquímico también lo sea por ejemplo, los iones de los metales que se encuentran adheridas a su superficie bajo la forma de hidróxidos de los metales correspondientes a los coagulantes utilizados, así como también el contenido biológico, ya que los flóculos son su medio de soporte y de transporte de algunos microorganismos biológicos.

Para cada experimento diseñado, la obtención de los resultados se realizó a través de las mediciones en paralelo de los valores de turbiedad en el agua cruda o agua a tratar (antes de la adición de los coagulantes, medido en la entrada del decantador) y de la turbiedad del agua a la salida del decantador Pulsator, conocido como "Turbiedad Decantada", con estos valores se calculó el **Porcentaje de Remoción de Turbiedad**.

Por tanto, cuando el valor de la turbiedad del agua medido a la salida del decantador fue bajo, entonces el porcentaje de remoción fue grande y viceversa, que cuando la turbiedad del agua decantada fue alta.

En promedio, para los Sistemas de Plantas de Tratamiento de Agua de Tecnología Convencional la eficiencia de remoción de la turbiedad en el proceso de **Sedimentación** en promedio es considerado 60% medido como Porcentaje de Remoción de Turbiedad; superior a este valor es considerado como satisfactorio para los Sistemas de Tratamiento de Tecnología de Patente, como es el decantador Pulsator de Manto de Lodos, de la revisión de trabajos de evaluación para los Sistemas con Tecnología de Decantadores de Manto de Lodos se considera como satisfactorio 70% de porcentaje de remoción de turbiedad, para valores de turbiedad baja para el agua de entrada al decantador menor igual a 30 N.T.U. (establecidos de acuerdo a experiencias realizadas); sin embargo cuando los valores de turbiedad de entrada aumentan, el porcentaje de remoción de turbiedad también aumenta.

Las experiencias se realizaron para aguas de baja turbiedad tal como se indica en las condiciones de operación al inicio de este capítulo, turbiedad que se presentó durante los meses de mayo a setiembre en el periodo de estiaje.

Para los experimentos se fijó como valor límite deseable de turbiedad en el agua decantada de 5 N.T.U. (la turbiedad del agua decantada no tiene ningún límite, depende de las características del diseño de las Plantas de Agua, de las condiciones operativas, del conocimiento de la operación, etc.) Considerando la tecnología del siguiente proceso que es filtración, donde la turbiedad se reduce hasta obtener valores más bajos.

Es importante señalar que los experimentos fueron diseñados para ser realizados solo con los coagulantes Sulfato de Aluminio y Cloruro Férrico (por lo general el tratamiento de agua en la Planta utiliza actualmente el polímero catiónico en forma combinada con el coagulante).

Los valores obtenidos con estos coagulantes se encuentran en los cuadros 17 y 18 respectivamente, en cada cuadro están los valores promedios de los porcentajes de remoción y los valores de turbiedad residual medidos a la salida del decantador, que corresponden a los resultados de la serie de experimentos; cuyos datos se encuentran en el anexo 3.

Cuadro 17

Valores Promedios: Sulfato de Aluminio

h_c \ Q	Porcentajes de Remoción de Turbiedad: %			Turbiedad: Salida del Decantador NTU		
	Q ₁ = 1.45 m ³ /s	Q ₂ = 1.66 m ³ /s	Q ₃ = 1.75 m ³ /s	Q ₁ = 1.45 m ³ /s	Q ₂ = 1.66 m ³ /s	Q ₃ = 1.75 m ³ /s
$h_{c1} = 0.4m.$	61	77	72	8.6	5	6.2
$h_{c2} = 0.6m.$	66	81	66	7.5	4.2	7.5
$h_{c3} = 0.8m.$	72	78	62	6.2	4.9	8.4

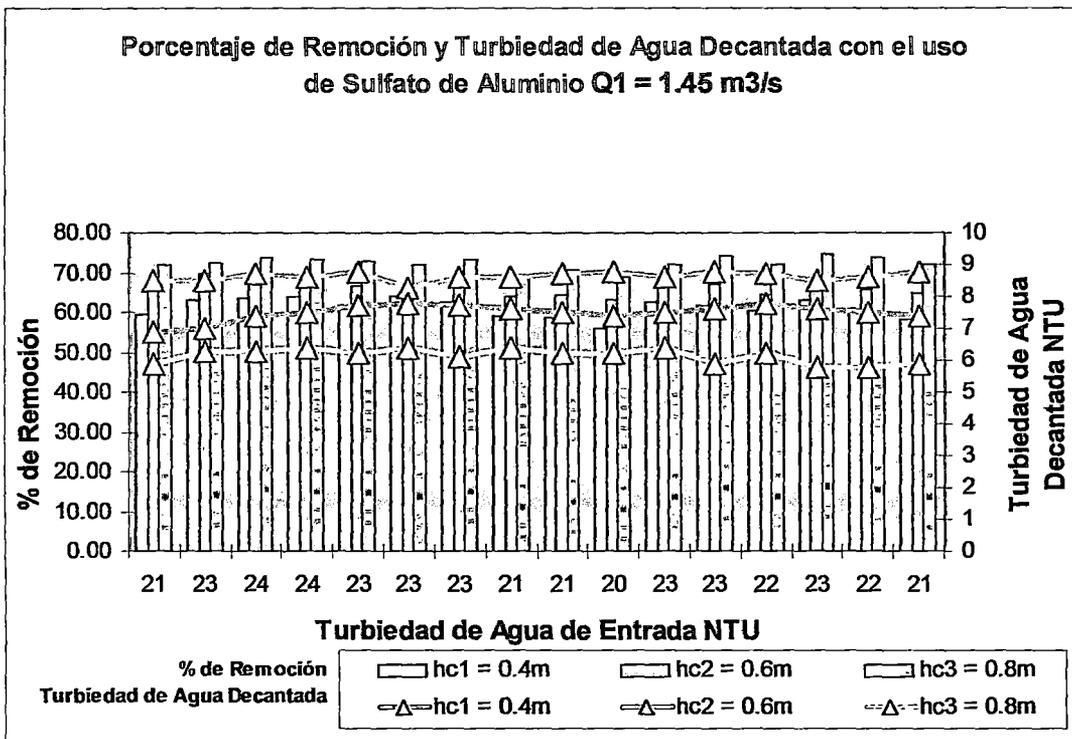
	Grupo de Control
	Grupo Experimental

Del resultado de las combinaciones de experimentos realizados con el Coagulante **Sulfato de Aluminio**, en el cuadro 17, se observan que los valores de porcentaje de remoción de turbiedad máximo alcanzados del conjunto de mediciones efectuadas fue 81 % para la combinación correspondiente a Q₂h_{c2}, sin embargo, valores de porcentajes de remoción promedio por encima del 70% se obtuvieron entre los experimentos Q₁h_{c3} a Q₃h_{c1} igualmente en este rango de

experimentos se observaron que los valores de turbiedad a la salida de los decantadores comenzaron a disminuir en forma significativa, siendo los valores mas bajos, aquellos que se obtuvieron en el rango de experimentos obtenidos entre Q_2h_{c1} a Q_2h_{c3} valores menor o igual a 5N.T.U.

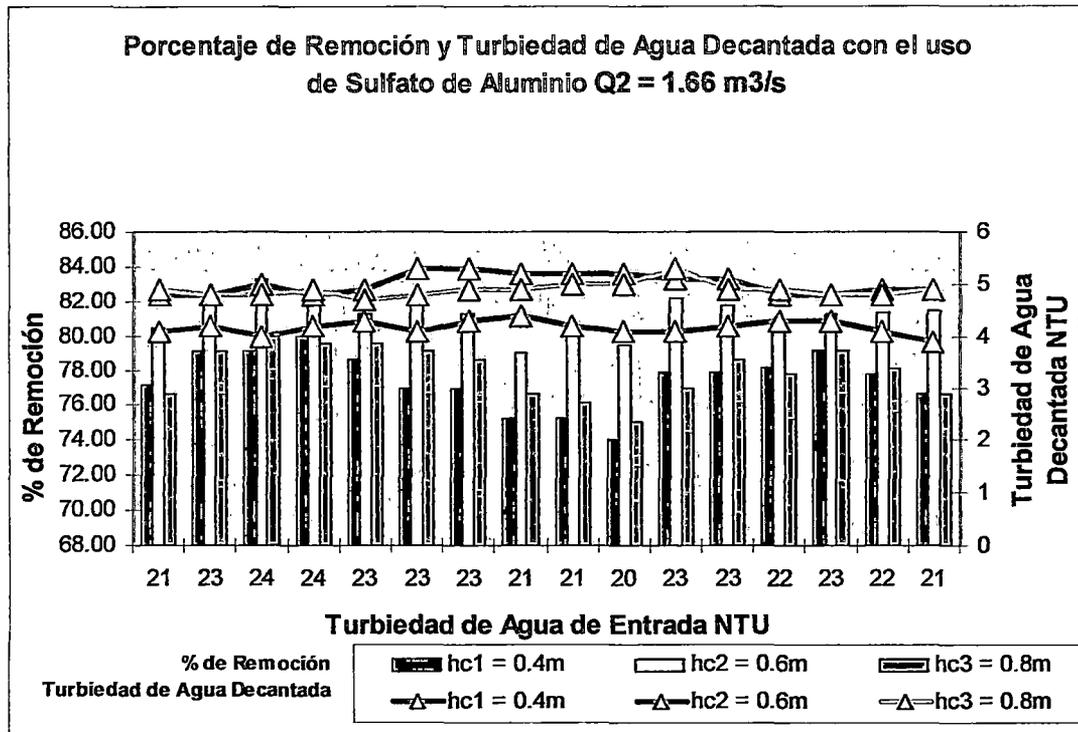
En los siguientes gráficos se observan las tendencias de los valores tanto del Porcentaje de Remoción como la Turbiedad del Agua Decantada, para cada combinación de experimentos, obtenidos con la dosificación del Sulfato de Aluminio.

Gráfico 3



Para el valor de caudal $Q_1 = 1.45 \text{ m}^3/\text{s}$, el mayor porcentaje de Remoción de Turbiedad se consiguió para altura de agua en la campana $h_{c3} = 0.80 \text{ m.}$, siendo superior a los valores de $h_{c1} = 0.40 \text{ m.}$ y $h_{c2} = 0.6 \text{ m.}$, la misma tendencia se presentaron para los valores de Turbiedad del agua decantada.

Gráfico 4



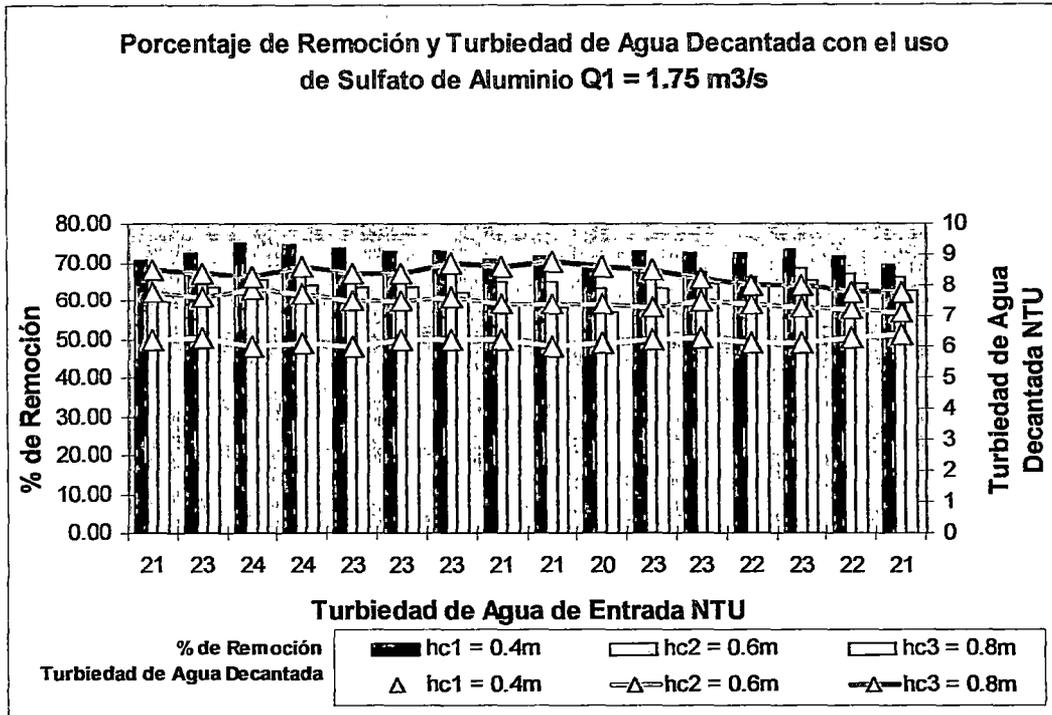
Para el valor de caudal $Q_2 = 1.66 \text{ m}^3/\text{s}$, el mayor porcentaje de Remoción de Turbiedad se consiguió para altura de agua en la campana $h_{c2} = 0.60 \text{ m.}$, siendo superior a los valores de $h_{c1} = 0.40 \text{ m.}$ y $h_{c3} = 0.8 \text{ m.}$

Con respecto a los valores de Turbiedad del agua decantada, se observan valores superiores para $h_{c1} = 0.40 \text{ m.}$ y $h_{c3} = 0.8 \text{ m.}$,

- Para $h_{c1} = 0.40 \text{ m.}$ la floculación fue insuficiente, porque los valores de gradiente de velocidad y concentración de lodos fueron bajos.
- Para $h_{c3} = 0.8 \text{ m.}$, fue debido al desprendimiento de los flóculos por expansión por encima del límite, lo que provocó el rompimiento de los flóculos y ascenso rápido hacia la salida del decantador, con lo que se vio incrementada el valor de turbiedad residual.

El valor de turbiedad que corresponde a $h_{c2} = 0.60 \text{ m.}$, fue mas bajo. Tal como se observan también en el cuadro 17.

Gráfico 5



Para el valor de caudal $Q_3 = 1.75 \text{ m}^3/\text{s}$, el mayor porcentaje de Remoción de Turbiedad se consiguió para altura de agua en la campana $h_{c1} = 0.40 \text{ m}$., siendo superior a los valores de $h_{c2} = 0.60 \text{ m}$. y $h_{c3} = 0.8 \text{ m}$., la misma tendencia se presentaron para los valores de Turbiedad del agua decantada, cuanto mas alto el valor de h_c mas alto fue el valor de turbiedad residual en este caso por la fragmentación de los flóculos por la excesiva velocidad de flujo V^o .

Cuadro 18

Valores Promedios: Cloruro Férrico

$h_c \backslash Q$	Porcentajes de Remoción de Turbiedad: %			Turbiedad: Salida del Decantador NTU		
	$Q_1 = 1.45$ m^3/s	$Q_2 = 1.66$ m^3/s	$Q_3 = 1.75$ m^3/s	$Q_1 = 1.45$ m^3/s	$Q_2 = 1.66$ m^3/s	$Q_3 = 1.75$ m^3/s
$h_{c1} = 0.4m.$	69	80	75	7	4.5	5.6
$h_{c2} = 0.6m.$	70	85	71	6.7	3.3	6.4
$h_{c3} = 0.8m.$	73	80	70	6	4.4	6.7

Grupo de Control
 Grupo Experimental

Los resultados de las combinaciones de experimentos realizados con el Coagulante Cloruro Férrico, se presentan en el cuadro 18, se observan que los valores de porcentaje de remoción de turbiedad alcanzada son superiores al del Sulfato de Aluminio.

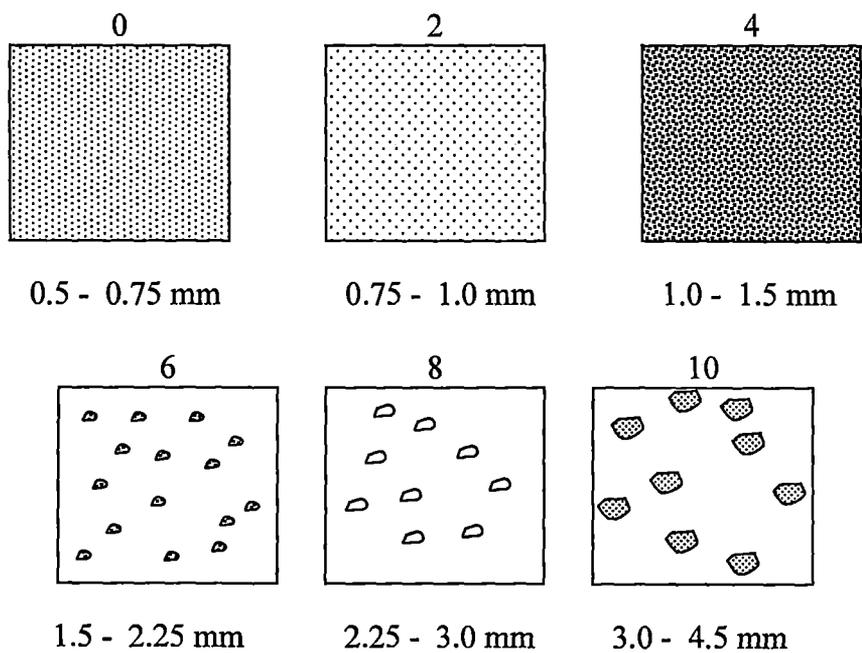
Del conjunto de mediciones efectuadas (anexo 3) el valor mas alto de porcentaje fue 85 % para la combinación correspondiente a $Q_2 h_{c2}$, se observa también que no siempre el valor del porcentaje de remoción alto representa la turbiedad residual baja al igual que en los experimentos obtenidos con el Sulfato de Aluminio, ya que es necesario tener en cuenta el valor de la turbiedad del agua de entrada al decantador.

Valores de porcentajes de remoción promedio (mayor e igual) \geq a 70% se obtuvieron entre los experimentos $Q_1 h_{c2}$ a $Q_3 h_{c3}$ igualmente en este rango se observaron que los valores de turbiedad a la salida de los decantadores comenzaron a disminuir en forma significativa, siendo los valores mas bajos, valores menores o igual a 5N.T.U., aquellos que se obtuvieron con los experimentos realizados entre $Q_2 h_{c1}$ a $Q_2 h_{c3}$.

No obstante el incremento del caudal y de la altura de agua en la campana, los flóculos no se desprendieron o rompieron con facilidad, como fue con el

coagulante Sulfato de Aluminio; esto se puede deber a las características propias de los flóculos formados con el Cloruro Férrico, que al momento de la realización de los experimentos presentaban características de ser flóculos más resistentes más grande y compacto (no era esponjoso) y pesados (sedimentan con facilidad). La medición del tamaño de los flóculos se realizó teniendo en cuenta el Índice de Willcomb

Fig. N° 37 Tamaño de Partículas Floculentas Índice de Willcomb

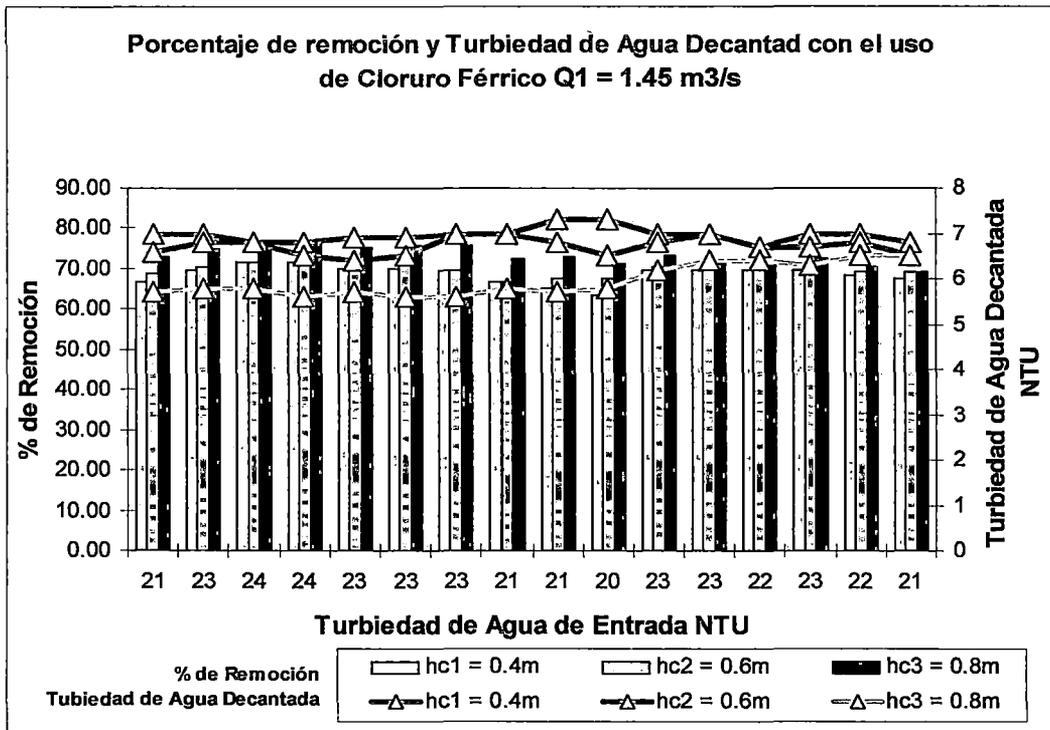


Índice de Floculación de Willcomb:

Número del Índice	Descripción
0	Floc Coloidal. Ningún signo de aglutinación.
2	Visible. Floc muy pequeño, casi imperceptible para un observador no entrenado.
4	Disperso. Floc bien formado de aspecto esponjoso bien distribuido (Sedimenta muy lentamente o no sedimenta).
6	Claro. Floc de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud.
8	Bueno. Floc que se deposita fácil pero no completamente.
10	Excelente. Floc que se deposita totalmente dejando el agua cristalina.

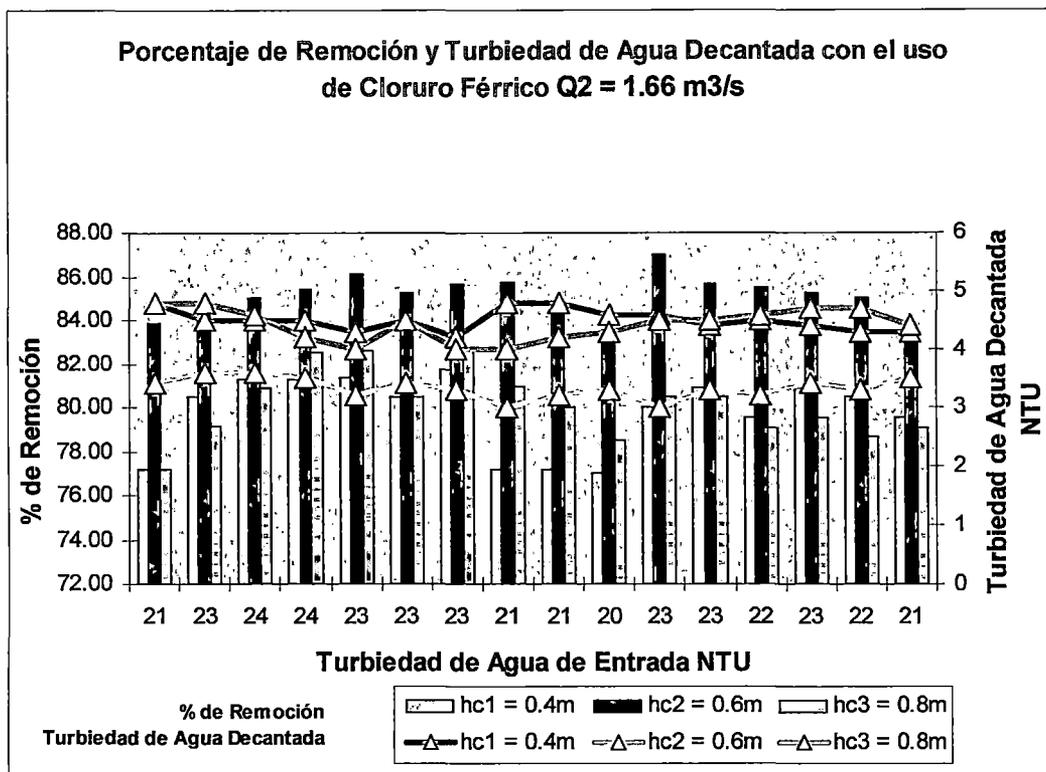
En los siguientes gráficos se observan las tendencias de los valores tanto del Porcentaje de Remoción como la Turbiedad del Agua Decantada, para cada combinación de experimentos, obtenidos con la dosificación del Cloruro Férrico.

Gráfico 6



Al igual para el coagulante Sulfato de Aluminio, para el valor de caudal $Q_1 = 1.45 \text{ m}^3/\text{s}$, el mayor porcentaje de Remoción de Turbiedad se consiguió para altura de agua en la campana $h_{c3} = 0.80 \text{ m.}$, siendo superior a los valores de $h_{c1} = 0.40 \text{ m.}$ y $h_{c2} = 0.6 \text{ m.}$, la misma tendencia se presentaron para los valores de Turbiedad del agua decantada.

Gráfico 7



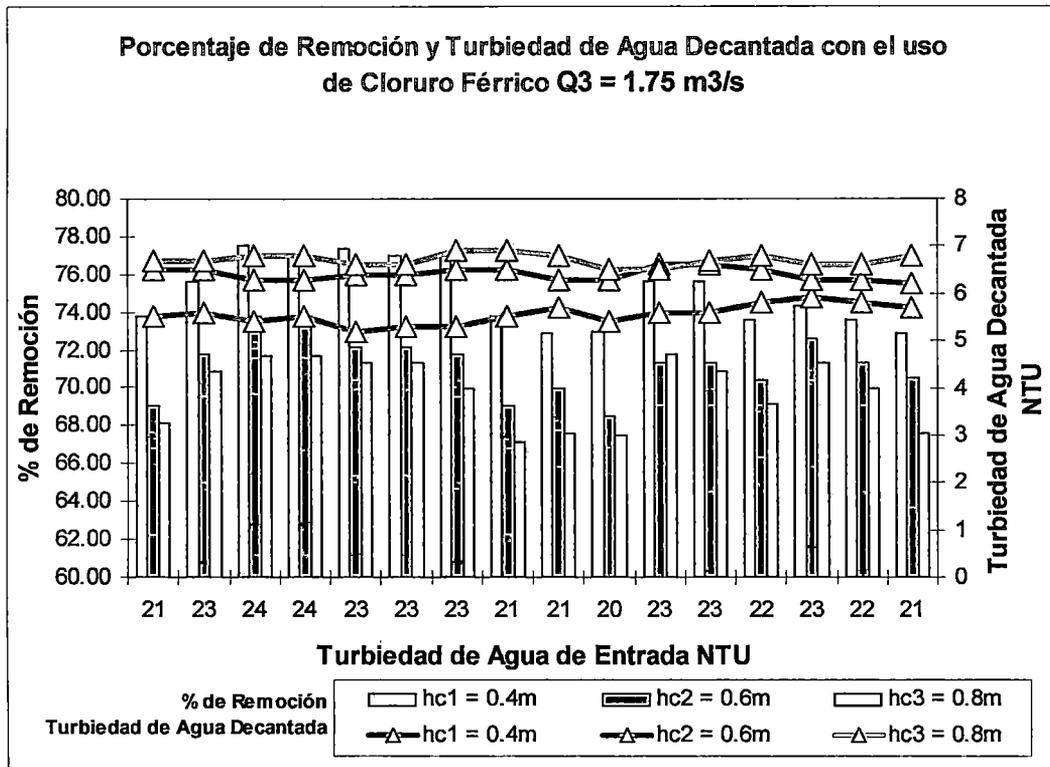
Para el valor de caudal $Q_2 = 1.66 \text{ m}^3/\text{s}$, el mayor porcentaje de Remoción de Turbiedad se consiguió para altura de agua en la campana $h_{c2} = 0.60 \text{ m.}$, siendo superior a los valores de $h_{c1} = 0.40 \text{ m.}$ y $h_{c3} = 0.8 \text{ m.}$

Con respecto a los valores de Turbiedad del agua decantada, se observan valores mas altos para $h_{c1} = 0.40 \text{ m.}$ y $h_{c3} = 0.8 \text{ m.}$, para $h_{c1} = 0.40$ los valores de gradiente de velocidad y concentración de lodos obtenidos son bajos (cuadros 11 y 16), por lo que la floculación no fue lo óptimo para la concentración de lodos existentes para esta condición, además de no contar con la altura suficiente de manto de lodos para desarrollar los microfloculos provenientes de la coagulación y promover su retención; estancándose en el tamaño pequeño los floculos, donde también el valor de gradiente de velocidad G tampoco ayudó a mantener el mecanismo de transporte requerido para la colisión entre ellos.

Para $h_{c3} = 0.8$ m., la turbiedad elevada fue debido al desprendimiento de los flóculos por incremento de la expansión, aumentando el valor de turbiedad residual a la salida del decantador.

Los valores de turbiedad residual que correspondieron a $h_{c1} = 0.40$ m., $h_{c2} = 0.60$ m., $h_{c3} = 0.80$ m., fueron los mas bajos del conjunto de experimento, en este caso el rango de turbiedad residual mas bajo se presentó en un rango mas amplio y no puntual como lo fue con el Sulfato de Aluminio. Tal como se observan también en el cuadro 18.

Gráfico 8



Para el valor de caudal $Q_3 = 1.75$ m³/s, el mayor porcentaje de Remoción de Turbiedad se consiguió para altura de agua en la campana $h_{c1} = 0.40$ m., siendo superior a los valores de $h_{c2} = 0.60$ m. y $h_{c3} = 0.80$ m., la misma tendencia se presentaron para los valores de Turbiedad del agua decantada, cuanto mas alto el valor de h_c mas alto fue el valor de turbiedad residual en este caso se presentó también por la fragmentación de los flóculos por la excesiva velocidad de flujo $V''o$.

4.2. Análisis Estadístico

Con la finalidad de confirmar o rechazar la Hipótesis planteada: “Condición de Equilibrio Hidráulico es un factor determinante para la Optimización del Manto de Lodos del Decantador Pulsator” se realizó el análisis de varianza **ANDEVA**, sobre la base de los resultados observados para cada indicador de la variable dependiente “Optimización del Manto de Lodos del Decantador Pulsator” y así como para descartar o aceptar definitivamente la hipótesis nula, en la cual la Condición de Equilibrio Hidráulico es indiferente para la optimización del manto de lodos de acuerdo a lo planteado.

La variable dependiente medida en sus dos dimensiones (funcionamiento del manto de lodos y calidad de agua decantada en cuanto a turbiedad) y a través de sus respectivos indicadores fueron analizados para cada caudal de tratamiento y para las 3 alturas de agua en la campana h_c , luego de realizar el procedimiento convencional del ANDEVA se obtuvo el valor de contraste F_c con el cual se enfocó el análisis.

Asimismo, el ANDEVA, que por sus siglas en inglés ANOVA (Analysis of Variance), permitirá conocer si, en efecto, los tratamientos influyeron sobre la variable dependiente, o si predominaron factores extraños denominados error o ruido, de acuerdo a lo señalado por Douglas Montgomery y George Runger en su libro “Probabilidad y Estadística Aplicada a la Ingeniería”.

George Snedecor junto a Fisher, ambos Matemáticos y Estadísticos Norteamericanos, determinaron una tabla F para un nivel de seguridad mayor o igual al 95%, conocido también como **Distribución F** (anexo 4), realizándose los siguientes pasos para su determinación:

- Determinación del valor de t (número de niveles de tratamiento). Para todos los indicadores medidos, se consideraron las combinaciones realizadas del caudal Q con la alturas de agua en campana h_c indicados en el cuadro 4 del capítulo III Métodos y Materiales. Por lo tanto $t = 3$.

- Determinación el valor de n (número de observaciones por cada nivel de tratamiento). Es decir, cuántas observaciones se realizó por cada altura de agua en la campana h_c y por cada experimento.
- Determinación el valor de N (número total de observaciones). Se refiere a la suma de todas las observaciones por cada nivel de tratamiento.
- Finalmente, se calculó las coordenadas de la tabla de valores F :
 $t - 1$ y $N - t$

En concreto, existen dos requerimientos que el valor de contraste F_c debe cumplir para validar la hipótesis:

- Debe ser mayor o igual a 1, de ser así significa que el manto de lodos se ha visto influenciado por la condición de equilibrio hidráulico. Caso contrario no es un factor determinante en la optimización del manto de lodos.
- Debe ser mayor o igual al valor F designado según la **Distribución F** de Seguridad Probabilística de George Snedecor, si cumple con esta condición se tendrá la seguridad de su influencia al 95%; adicionalmente, es pertinente señalar que a mayor valor de contraste mayor influencia de la variable independiente "Condición de Equilibrio Hidráulico" sobre la variable dependiente "Optimización del Manto de Lodos".

Objetivamente se ha analizado los indicadores del funcionamiento del manto de lodos y el indicador en la calidad de agua decantada. Los indicadores, los cuales se conocen también como fuentes de variación, son el reflejo de la variable dependiente siendo el más importante el porcentaje de remoción de la turbiedad en el agua decantada.

4.2.1. Altura del Manto de Lodos

Con los resultados del cuadro N° 7 "Resultados de Mediciones de Altura de Manto de Lodos: H", se realizó el análisis de varianza, para este indicador se realizó 4 observaciones por cada nivel de tratamiento, consiguiendo, en total, la cantidad de 12 observaciones por caudal de tratamiento.

Los cuadros 19 y 20 resumen los valores clave del análisis de varianza para cada una de las fuentes de variación y para los coagulantes Sulfato de Aluminio y Cloruro Férrico.

Para el Coagulante Sulfato de Aluminio

Cuadro 19

ANÁLISIS DE VARIANZA Altura del Manto de Lodos H: Sulfato de Aluminio						
Fuente de Variación	Q ₁ = 1.45 m ³ /s		Q ₂ = 1.66 m ³ /s		Q ₃ = 1.75 m ³ /s	
	Suma de Cuadrados	Media Cuadrática	Suma de Cuadrados	Media Cuadrática	Suma de Cuadrados	Media Cuadrática
Tratamientos	1.6	0.8	0.6	0.3	0.2	0.09
Error	0.1	0.01	0.04	0.003	0.02	0.002
Total	1.7		0.64		0.22	
Valor de Contraste: F _c	68		81		49	

Los valores de contraste F_c obtenidos para el Sulfato de Aluminio, fueron:

Para Q₁ = 1.45 m³/s, F_c = 68

Para Q₂ = 1.66 m³/s F_c = 81 y

Para Q₃ = 1.75 m³/s F_c = 49

Colocándolos en orden decreciente se tiene:

$$81 > 68 > 49$$

$$F_c Q_2 > F_c Q_1 > F_c Q_3$$

En todos los casos los valores de contraste F_c son mayores a 1, lo que quiere decir que los valores de los tratamientos asignados (combinación de experimentos $Q_n h_{cn}$) influenciaron directamente en la variable dependiente.

Por otro lado los resultados significan, que para el caudal de $1.66 \text{ m}^3/\text{s}$ el manto de lodos en cuanto a su altura es el mas óptimo se ha visto más influenciado por la condición de equilibrio hidráulico en comparación con el caudal de $1.45 \text{ m}^3/\text{s}$ y aun más que al caudal de $1.75 \text{ m}^3/\text{s}$, y esto se vió reflejado en un mayor nivel de altura del manto de lodos en Q_2 .

Para el Coagulante Cloruro Férrico

Cuadro 20

ANALISIS DE VARIANZA Altura de Manto de Lodos H: Cloruro Férrico						
Fuente de Variación	$Q_1 = 1.45 \text{ m}^3/\text{s}$		$Q_2 = 1.66 \text{ m}^3/\text{s}$		$Q_3 = 1.75 \text{ m}^3/\text{s}$	
	Suma de Cuadrados	Media Cuadrática	Suma de Cuadrados	Media Cuadrática	Suma de Cuadrados	Media Cuadrática
Tratamientos	2.1	1	0.15	0.07	0.2	0.08
Error	0.1	0.01	0.007	0.0008	0.008	0.0009
Total	2.2		0.16		0.21	
Valor de Contraste: F_c	76		88		84	

Los valores de contraste F_c obtenidos para el Cloruro Férrico, fueron:

Para $Q_1 = 1.45 \text{ m}^3/\text{s}$, $F_c = 76$

Para $Q_2 = 1.66 \text{ m}^3/\text{s}$ $F_c = 88$ y

Para $Q_3 = 1.75 \text{ m}^3/\text{s}$ $F_c = 84$

Colocándolos en orden decreciente se tiene:

$$88 > 84 > 76$$

$$F_c Q_2 > F_c Q_3 > F_c Q_1$$

Para el Cloruro Férrico, los valores de contraste F_c igualmente son mayores que 1, las diferencias de los valores F_c obtenidos entre los caudales ya no son tan marcadas (como en los obtenidos con el Sulfato de Aluminio) lo que además se evidencia en las alturas H del manto obtenidos, que son bastante próximos en sus valores (entre 1.3 a 1.5, cuadro 7).

Al realizar una comparación entre los coagulantes se observa mayor influencia de la Condición de Equilibrio Hidráulico sobre la Optimización del Manto de Lodos para el caso del **Cloruro Férrico**, para el indicador H altura del manto de lodos; por consiguiente, los niveles de altura del manto de lodos alcanzados fueron los máximos valores, así:

$$F_c Q_2 \text{ Cloruro Férrico} > F_c Q_3 \text{ Cloruro Férrico}$$

$$F_c Q_2 \text{ Sulfato de Aluminio} > F_c Q_1 \text{ Cloruro Férrico}$$

$$F_c Q_1 \text{ Sulfato de Aluminio} > F_c Q_3 \text{ Sulfato de Aluminio}$$

Ahora bien para validar si realmente la Condición de Equilibrio Hidráulico influyó en la altura del manto de lodos H , que se acepta sólo, si la estadística asegura que tiene por lo menos un 95% de probabilidad de serlo efectivamente; esto se estableció determinando así, el valor F de Snedecor, de la Tabla de Valores F para un Nivel de Seguridad (Nivel de Confianza) de 95%:

t: número de tratamientos	3
N: número total de observaciones	12
n: observaciones por nivel de tratamiento	4

$t - 1 = 2$
$N - t = 9$

$$F = 4.26$$

El valor que toma F es de 4.26, que comparando con los valores de contraste F_c obtenidos, F_c es mayor que F en todos los tratamientos, los que revelan nuevamente que existe una considerable influencia de la Condición de Equilibrio Hidráulico (V.I) con 95% de probabilidad, sobre la Optimización del Manto de Lodos.

En este caso la condición de equilibrio hidráulico, al optimizar el manto de lodos en el decantador Pulsator, influyó directamente en la altura del manto de lodos H: indicador fundamental del funcionamiento en el manto de lodos.

4.2.2. Concentración del Manto de Lodos

Una buena concentración de manto de lodos es similar a decir un manto de lodos optimizado; en otras palabras, la concentración de lodos es directamente proporcional a la optimización del manto de lodos. Para este indicador se realizaron 4 observaciones por cada nivel de tratamiento; en total, la cantidad de 12 observaciones por caudal de tratamiento. Determinamos así el valor F de Snedecor:

t: número de tratamientos	3
N: número total de observaciones	12
n: observaciones por nivel de tratamiento	4

$$\frac{t-1}{N-t} = \frac{2}{9}$$

$$F = \quad 4.26$$

El valor que toma F es de 4.26, con los resultados descritos en el cuadro 21 se realizó su respectivo ANDEVA.

Cuadro 21

Caudal: m ³ /s	Grupo	hc = m.	Porcentaje de Concentración de Lodos %[lodos]									
			Valores obtenidos con el Sulfato de Aluminio					Valores obtenidos con el Cloruro Férrico				
			%[lodo]				Promedio	%[lodo]				Promedio
Q ₁ = 1.45	Control	hc1: 0.4	8.2	8.8	8.3	8.7	8.8	8.2	8.8	8.3	8.7	8.5
	Experimental	hc2: 0.6	9.6	8.9	8.8	9.5	9	9.6	10.3	10.3	9.7	10.0
	Experimental	hc3: 0.8	10.2	10.3	10.4	10.7	10	11.6	10.9	11.5	10.7	11.2
Q ₂ = 1.66	Control	hc1: 0.4	8.5	8.7	9.1	9	9	11.1	10.9	10.7	11.3	11.0
	Experimental	hc2: 0.6	9.9	10.4	9.7	9.4	10	12.6	12.7	12.2	12.5	13
	Experimental	hc3: 0.8	11.1	10.7	10.8	11.3	11.0	12	12.2	11.9	11.9	12.0
Q ₃ = 1.75	Control	hc1: 0.4	9.4	9.7	9.5	9.6	9.6	10.8	11.2	10.7	11.3	11.0
	Experimental	hc2: 0.6	8.7	9.2	9.4	8.8	9	9.8	9.3	9.4	9.6	9.5
	Experimental	hc3: 0.8	8.2	8.2	7.8	7.8	8.0	9.3	9.5	9.5	9.7	9.5

Altura de agua en la campana: h_c

Grupo de Control

Para el coagulante Sulfato de Aluminio**Cuadro 22**

ANÁLISIS DE VARIANZA Concentración de Lodos %[lodos] : Sulfato de Aluminio						
Fuente de Variación	Q ₁ = 1.45 m ³ /s		Q ₂ = 1.66 m ³ /s		Q ₃ = 1.75 m ³ /s	
	Suma de Cuadrados	Media Cuadrática	Suma de Cuadrados	Media Cuadrática	Suma de Cuadrados	Media Cuadrática
Tratamientos	7.40	3.70	9.30	4.60	5.30	2.60
Error	0.9	0.10	1	0.10	0.5	0.07
Total	8.3		10.3		5.8	
Valor de Contraste: F _c	37		42		40	

Los valores de contraste F_c obtenidos fueron:Para Q₁ = 1.45 m³/s, F_c = 37Para Q₂ = 1.66 m³/s F_c = 42 yPara Q₃ = 1.75 m³/s F_c = 40

En orden decreciente tenemos:

$$42 > 40 > 37$$

$$F_c Q_2 > F_c Q_3 > F_c Q_1$$

Los resultados se repiten y significan, nuevamente, que para el caudal $Q_2 = 1.66 \text{ m}^3/\text{s}$ la condición de equilibrio hidráulico ha operado mejor presentando mejores resultados en los indicadores: mayores valores para el porcentaje de concentración de lodos en Q_2 , luego Q_3 y después Q_1

Para el Coagulante Cloruro Férrico

Cuadro 23

ANALISIS DE VARIANZA Concentración de Lodos %[lodos] : Cloruro Férrico						
Fuente de Variación	$Q_1 = 1.45 \text{ m}^3/\text{s}$		$Q_2 = 1.66 \text{ m}^3/\text{s}$		$Q_3 = 1.75 \text{ m}^3/\text{s}$	
	Suma de Cuadrados	Media Cuadrática	Suma de Cuadrados	Media Cuadrática	Suma de Cuadrados	Media Cuadrática
Tratamientos	14.4	7.2	4.7	2.3	6	3
Error	1.3	0.1	0.4	0.04	0.5	0.06
Total	15.7		5.1		6.5	
Valor de Contraste: F_c	51		53		52	

Los valores de contraste F_c obtenidos fueron:

Para $Q_1 = 1.45 \text{ m}^3/\text{s}$, $F_c = 51$

Para $Q_2 = 1.66 \text{ m}^3/\text{s}$ $F_c = 53$

Para $Q_3 = 1.75 \text{ m}^3/\text{s}$ $F_c = 52$

$$F_c Q_2 > F_c Q_3 > F_c Q_1$$

$$53 > 52 > 51$$

Los valores de contraste F_c en todos los casos son superiores a 1, entonces existe una considerable influencia de la Condición de Equilibrio Hidráulico sobre la Concentración de lodos %[lodos], otro indicador importante para la Optimización del Manto de Lodos, además que comparando con $F = 4.26$, los valores de contraste F_c son superiores a F en todos los casos, por lo tanto la hipótesis planteada se confirma para este indicador con un 95% de probabilidad.

Ahora con la comparación entre los coagulantes se observa, nuevamente, que la condición de equilibrio hidráulico opera mejor con el segundo coagulante: Cloruro Férrico; esto se refleja, naturalmente, en los valores registrados del Porcentaje de Concentración de Lodos: que se alcanzó valores alrededor de 12.6% - 12.7% cuadro 21.

Es así como la tendencia favorable al Cloruro Férrico se presenta nuevamente, tenemos entonces:

$$F_c Q_2 \text{ Cloruro Férrico} > F_c Q_2 \text{ Sulfato de Aluminio}$$

$$F_c Q_3 \text{ Cloruro Férrico} > F_c Q_3 \text{ Sulfato de Aluminio}$$

$$F_c Q_1 \text{ Cloruro Férrico} > F_c Q_1 \text{ Sulfato de Aluminio}$$

4.2.3. Coeficiente de Cohesión K

Con los resultados del "Coeficiente de Cohesión de Lodos para el Sulfato de Aluminio y Cloruro Férrico" registrados en el cuadro 12, se realizó el ANDEVA

Para este indicador se realizaron 4 observaciones por cada nivel de tratamiento; en total, la cantidad de 12 observaciones por caudal de tratamiento. Determinamos así el valor F de Snedecor:

t: número de tratamientos	3
N: número total de observaciones	12
n: observaciones por nivel de tratamiento	4

$t_1 = 2$
$N = 9$

$$F = \boxed{} \quad 4.26$$

El valor que tomó F es de 4.26, a continuación se presentan los resultados del ANDEVA para cada coagulante.

Para el Sulfato de Aluminio**Cuadro 24**

ANALISIS DE VARIANZA Coeficiente de Cohesión de Lodos K : Sulfato de Aluminio						
Fuente de Variación	Q ₁ = 1.45 m ³ /s		Q ₂ = 1.66 m ³ /s		Q ₃ = 1.75 m ³ /s	
	Suma de Cuadrados	Media Cuadrática	Suma de Cuadrados	Media Cuadrática	Suma de Cuadrados	Media Cuadrática
Tratamientos	0.06	0.03	0.01	0.005	0.003	0.001
Error	0.008	0.0008	0	0	0	0
Total	0.07		0.01		0.003	
Valor de Contraste: F _c	38		70		49	

Los valores de F_c calculados son:

Para Q₁ = 1.45 m³/s, F_c = 38

Para Q₂ = 1.66 m³/s F_c = 70 y

Para Q₃ = 1.75 m³/s F_c = 49

Ordenando en forma decreciente:

$$70 > 49 > 38$$

$$F_c Q_2 > F_c Q_3 > F_c Q_1$$

Los resultados significan, que para el caudal de 1.66 m³/s el manto de lodos se ha visto más influenciado por la condición de equilibrio hidráulico en comparación con el caudal de 1.45 m³/s e incluso más con el caudal de 1.75 m³/s, y esto se ve reflejado en un mayor valor para el coeficiente de cohesión de lodos en Q₂.

Para el Coagulante Cloruro Férrico**Cuadro 25**

ANALISIS DE VARIANZA Coeficiente de Cohesión de Lodos K : Cloruro Férrico						
Fuente de Variación	Q ₁ = 1.45 m ³ /s		Q ₂ = 1.66 m ³ /s		Q ₃ = 1.75 m ³ /s	
	Suma de Cuadrados	Media Cuadrática	Suma de Cuadrados	Media Cuadrática	Suma de Cuadrados	Media Cuadrática
Tratamientos	0.02	0.01	0.08	0.04	0.001	0.001
Error	0	0	0.005	0	0	0
Total	0.02		0.085		0.001	
Valor de Contraste: F _c	46		74		61	

Los valores de F_c calculados son:

Para Q₁ = 1.45 m³/s, F_c = 46

Para Q₂ = 1.66 m³/s F_c = 74 y

Para Q₃ = 1.75 m³/s F_c = 61

La interpretación es similar: se observa mayor influencia de la variable independiente sobre la optimización del manto de lodos en el Q₂, así:

$$74 > 61 > 46$$

$$F_c Q_2 > F_c Q_3 > F_c Q_1$$

Por lo tanto,

Los valores de contraste F_c obtenidos para todos los tratamientos fueron mayores que 1 revelando así que la hipótesis planteada es confirmada, que existe una considerable influencia de la Condición de Equilibrio Hidráulico sobre el coeficiente de cohesión de lodos K que influye sobre la Optimización del Manto de Lodos.

Comparando el valor de F igual a 4.26, con los valores de contraste F_c obtenidos, se observaron que los valores F_c son mayores que F, en todos los tratamientos, los que indican nuevamente que existe una considerable influencia

de la Condición de Equilibrio Hidráulico (V.I) con 95% de probabilidad, sobre la Optimización del Manto de Lodos, a través de una mayor cohesión entre los lodos que es sinónimo de un manto de lodos optimizado; entonces, la condición de equilibrio hidráulico influyó directamente en el coeficiente de cohesión de lodos K: indicador que también es fundamental en el funcionamiento del manto de lodos.

Ahora al realizar una comparación entre los coagulantes se observa, nuevamente mayor influencia de la Condición de Equilibrio Hidráulico sobre la Optimización del Manto de Lodos para el caso del **Cloruro Férrico**; es así que los coeficientes de cohesión entre los lodos alcanzan grandes valores como 0.98, 0.99 e incluso hasta 1.05 cuadro 12.

Es así como la tendencia favorable al Cloruro Férrico se presenta nuevamente, entonces se tiene:

$$F_c Q_2 \text{ Cloruro Férrico} > F_c Q_2 \text{ Sulfato de Aluminio}$$

$$F_c Q_3 \text{ Cloruro Férrico} > F_c Q_3 \text{ Sulfato de Aluminio}$$

$$F_c Q_1 \text{ Cloruro Férrico} > F_c Q_1 \text{ Sulfato de Aluminio}$$

4.2.4. Gradiente de Velocidad G

El análisis de varianza para el gradiente de velocidad G, tanto para el coagulante Sulfato de Aluminio y Cloruro Férrico, se realizó utilizando los valores del cuadro 26. Estos valores son los que determinaron el rango óptimo donde la floculación se desarrolló favoreciendo la formación y desarrollo de los flóculos en el manto de lodos.

t: número de tratamientos	3
N: número total de observaciones	12
n: observaciones por nivel de tratamiento	4

t = 2	F =	4.26
N = 9		

Cuadro 26

Caudal: m ³ /s	Grupo	hc = m.	Gradiente de Velocidad: G									
			Valores obtenidos con el Sulfato de Aluminio					Valores obtenidos con el Cloruro Férrico				
			G: s-1				Promedio	G: s-1				Promedio
Q ₁ = 1.45	Control	hc1: 0.4	3.2	3.4	3.5	3.4	3.4	4.25	4.6	4.65	4.5	4.5
	Experimental	hc2: 0.6	3.7	4	4.4	4.94	4.3	4.5	4.83	4.38	4.5	4.6
	Experimental	hc3: 0.8	4.7	4.6	4.4	4.5	4.6	5.2	5.2	5.5	5.6	5.4
Q ₂ = 1.66	Control	hc1: 0.4	3.35	3.5	4.13	4.71	3.9	4.9	5.3	6.1	4.8	5.1
	Experimental	hc2: 0.6	4.8	5.3	4.9	5.1	5.0	6.3	6.5	5.7	6.8	6.3
	Experimental	hc3: 0.8	5.3	5.4	5.2	5.2	5.3	6.6	6.8	6.7	6.7	6.7
Q ₃ = 1.75	Control	hc1: 0.4	4.9	4.75	5	5.25	5.0	6.45	6.4	6.32	6.3	6.4
	Experimental	hc2: 0.6	5.3	5.4	5.7	5.5	5.5	6.4	6.4	6.35	6.45	6.4
	Experimental	hc3: 0.8	4.7	5.1	4.8	4.6	4.8	6.6	6.7	6.4	6.8	6.6

Altura de agua en la campana: h_c

Grupo de Control

Para el Coagulante Sulfato de Aluminio

Cuadro 27

ANALISIS DE VARIANZA Gradiente de Velocidad G : Sulfato de Aluminio						
Fuente de Variación	Q ₁ = 1.45 m ³ /s		Q ₂ = 1.66 m ³ /s		Q ₃ = 1.75 m ³ /s	
	Suma de Cuadrados	Media Cuadrática	Suma de Cuadrados	Media Cuadrática	Suma de Cuadrados	Media Cuadrática
Tratamientos	3	1.5	4.2	2	1	0.5
Error	1	0.1	1.3	0.2	0.3	0.04
Total	4		5.5		1.3	
Valor de Contraste: F _c	14		13		12	

Los valores de contraste F_c calculados son:Para Q₁ = 1.45 m³/s, F_c = 14Para Q₂ = 1.66 m³/s F_c = 13 yPara Q₃ = 1.75 m³/s F_c = 12

Ordenando en forma decreciente:

$$14 > 13 > 12$$

$$F_c Q_1 > F_c Q_2 > F_c Q_3$$

Para el Coagulante Cloruro Férrico**Cuadro 28**

ANALISIS DE VARIANZA Gradiente de Velocidad G : Cloruro Férrico						
Fuente de Variación	Q ₁ = 1.45 m ³ /s		Q ₂ = 1.66 m ³ /s		Q ₃ = 1.75 m ³ /s	
	Suma de Cuadrados	Media Cuadrática	Suma de Cuadrados	Media Cuadrática	Suma de Cuadrados	Media Cuadrática
Tratamientos	2	1	5.6	2.8	0.15	0.1
Error	0.2	0.03	1	0.1	0.1	0.01
Total	2.2		6.6		0.25	
Valor de Contraste: F _c	31		27		7	

Los valores de F_c calculados son:

Para Q₁ = 1.45 m³/s, F_c = 31

Para Q₂ = 1.66 m³/s F_c = 27 y

Para Q₃ = 1.75 m³/s F_c = 7

$$31 > 27 > 7$$

$$F_c Q_1 > F_c Q_2 > F_c Q_3$$

En todos los experimentos el valor de contraste F_c fue mayor a 1, por tanto la condición de equilibrio hidráulico ha influido también en este caso al manto de lodos en la formación y desarrollo de los microflóculos.

Comparando el valor de F_c con F, en todos los casos F_c mayor que F, por lo tanto la variable independiente del experimento es con 95% de probabilidad efectivamente el que influyó sobre la variable dependiente.

Ahora con la comparación entre los coagulantes se observa, nuevamente, que la condición de equilibrio hidráulico opera mejor con el segundo coagulante: Cloruro Férrico. Es así como la tendencia favorable al Cloruro Férrico se presenta nuevamente.

Los valores de F_c para este indicador y para todos los experimentos presentaron valores muy semejantes, sin embargo se puede interpretar como una relación inversa, en comparación con los valores de gradiente obtenidos, así para:

- Valor de contraste F_c mas alto, correspondió a valores de gradiente de velocidad más bajos, por lo tanto, valores de G insuficientes para realizar la floculación en el manto de lodos, produciendo flóculos pequeños y con baja densidad.
- Valor de contraste F_c intermedio, se observó incremento de los valores de G cuadro 27, con los cuáles se produjo mayor concentración de lodos cuadros 10 y 11.
- Valor de F_c más bajo, el G siguió aumentando (hasta que sobrepasó el límite de mantener los flóculos en el manto), pero la concentración de lodos disminuyó, debido al desprendimiento y transporte de los flóculos hacia la salida del decantador por incremento de la velocidad de flujo durante la descarga de agua, por lo tanto la concentración de lodos disminuyó, tal como se observaron en los experimentos (cuadros 10 y 11)

4.2.5. Remoción de Turbiedad %

El ANDEVA para este caso se realizó en función del Porcentaje de Remoción de Turbiedad para ambos coagulantes.

El porcentaje de remoción de turbiedad es el indicador que refleja la calidad de agua decantada, es consecuencia inmediata del funcionamiento del manto de lodos, para el análisis de varianza se analizó mediante tres observaciones n por cada nivel de tratamiento, en total el número de observaciones totales N es igual a 9; así se determinó que el valor F de Snedecor es 5.14 obtenido de la Tabla de Valores Para un Nivel de Seguridad (Nivel de Confianza) de 95%

Cuadro 29

Caudal: m ³ /s	Grupo	hc = m.	Porcentaje de Remoción de Turbiedad: %							
			Valores obtenidos con el Sulfato de Aluminio				Valores obtenidos con el Cloruro Férrico			
			%		Promedio		%		Promedio	
Q ₁ = 1.45	Control	hc1:0.4	61.5	60.6	60.5	61	69	69.2	69.3	69
	Experimental	hc2: 0.6	66.5	65.7	65.6	66	70.1	70.2	70.5	70
	Experimental	hc3: 0.8	72.7	71.4	71.4	72	72.9	72.6	73.1	73
Q ₂ = 1.66	Control	hc1:0.4	76.9	77	77.1	77	79.9	79.6	80.2	80
	Experimental	hc2: 0.6	81.2	80.9	81.4	81	84.9	84.7	85.1	85
	Experimental	hc3: 0.8	77.9	78.2	78.3	78	80.4	80.1	79.9	80
Q ₃ = 1.75	Control	hc1:0.4	71.6	71.5	72.4	72	75.2	74.9	75.4	75
	Experimental	hc2: 0.6	65.5	65.6	66.4	66	71.3	71.2	70.9	71
	Experimental	hc3: 0.8	61.6	61.6	62.5	62	69.7	69.8	70.3	70

Altura de agua en la campana: h_c Grupo de Control

t: número de tratamientos	3
N: número total de observaciones	9
n: observaciones por nivel de tratamiento	3

t = 1 = 2
N = t = 6

F = 5.14

Para el Coagulante Sulfato de Aluminio

Cuadro 30

ANALISIS DE VARIANZA Porcentaje de Remoción de Turbiedad % : Sulfato de Aluminio

Fuente de Variación	Q ₁ = 1.45 m ³ /s		Q ₂ = 1.66 m ³ /s		Q ₃ = 1.75 m ³ /s	
	Suma de Cuadrados	Media Cuadrática	Suma de Cuadrados	Media Cuadrática	Suma de Cuadrados	Media Cuadrática
Tratamientos	180.7	90.4	27.8	14	150.1	75
Error	2.2	0.4	0.2	0.01	1.5	0.25
Total	182.9		28		151.6	
Valor de Contraste: F _c	244		358		298	

Los valores de F_c calculados son:

Para $Q_1 = 1.45 \text{ m}^3/\text{s}$, $F_c = 244$

Para $Q_2 = 1.66 \text{ m}^3/\text{s}$ $F_c = 358$

Para $Q_3 = 1.75 \text{ m}^3/\text{s}$ $F_c = 298$

$$358 > 298 > 244$$

$$F_c Q_2 > F_c Q_3 > F_c Q_1$$

Para el Coagulante Cloruro Férrico

Cuadro 31

ANALISIS DE VARIANZA Porcentaje de Remoción de Turbiedad % : Cloruro Férrico						
Fuente de Variación	$Q_1 = 1.45 \text{ m}^3/\text{s}$		$Q_2 = 1.66 \text{ m}^3/\text{s}$		$Q_3 = 1.75 \text{ m}^3/\text{s}$	
	Suma de Cuadrados	Media Cuadrática	Suma de Cuadrados	Media Cuadrática	Suma de Cuadrados	Media Cuadrática
Tratamientos	21.7	11	47.2	24	45	23
Error	0.3	0.04	0.4	0.06	0.5	0.07
Total	22		47.2		45.5	
Valor de Contraste: F_c	250		371		322	

Los valores de contraste F_c obtenidos son:

Para $Q_1 = 1.45 \text{ m}^3/\text{s}$, $F_c = 250$

Para $Q_2 = 1.66 \text{ m}^3/\text{s}$, $F_c = 371$ y

Para $Q_3 = 1.75 \text{ m}^3/\text{s}$, $F_c = 322$

Así se tiene que entre los experimentos se obtuvo

$$371 > 322 > 250$$

$$F_c Q_2 > F_c Q_3 > F_c Q_1$$

Todos los valores de contraste F_c son mayores a 1 y mayores a $F = 5.14$, siendo la interpretación la misma, para los coagulantes Sulfato de Aluminio y Cloruro Férrico, por lo tanto la variable independiente del experimento "Condición de

Equilibrio Hidráulico” es con 95% de probabilidad que influyó sobre el valor que toma la variable dependiente “Optimización del Manto de Lodos” medido en este caso por el porcentaje de remoción de la turbiedad.

El mayor porcentaje de remoción de turbiedad se consiguió para las condiciones de operación del decantador con valores de Q_2 con variaciones de h_c para los 2 coagulantes.

Concretamente, la tendencia se mantiene de la misma forma, al realizar una comparación entre los coagulantes se observa mayor influencia de la Condición de Equilibrio Hidráulico sobre la Optimización del Manto de Lodos para el caso del **Cloruro Férrico**; por consiguiente, los niveles de turbiedad para Q_2 se ven notoriamente bajos (anexo 3). Siendo:

$$F_c Q_2 \text{ Cloruro Férrico} > F_c Q_2 \text{ Sulfato de Aluminio}$$

$$F_c Q_3 \text{ Cloruro Férrico} > F_c Q_3 \text{ Sulfato de Aluminio}$$

$$F_c Q_1 \text{ Cloruro Férrico} > F_c Q_1 \text{ Sulfato de Aluminio}$$

Tras haber realizado el ANOVA se encontró que los tres caudales se ven influenciados notablemente por la condición de equilibrio hidráulico a través del indicador del porcentaje de remoción de la turbiedad. Además, se presentan marcadas diferencias tanto entre los diferentes caudales como entre los coagulantes. A mayor valor de contraste mayor es la influencia de la variable independiente, y esto de ser así permite un alto porcentaje de remoción de la turbiedad de agua decantada.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos para los valores de los indicadores de la variable dependiente “Optimización del Manto de Lodos”, durante la realización de los experimentos y del análisis correspondiente, de acuerdo con las tendencias que los análisis de varianza proporcionaron, se concluye principalmente que, cuando se realizó la operación de los decantadores de Manto de Lodos del Tipo Pulsator, haciendo variar las condiciones hidráulicas del caudal de ingreso al decantador Q (caudal de tratamiento) y la altura de agua en la campana de vacío h_c , el manto de lodos y la calidad del agua decantada a la salida del decantador presentaron variaciones en su comportamiento, medidos a través de los valores de los indicadores establecidos en el diseño de los experimentos para el presente estudio; observándose mutua relación existente entre ellos. El cuadro 32 presenta el resumen de los resultados para cada indicador.

Cuadro 32

Resumen Comparativo de Indicadores de Condición de Equilibrio Hidráulico y Optimización del Manto de Lodos Obtenidos para el Grupo de Control y Grupo Experimental con Coagulantes Sulfato de Aluminio y Cloruro Férrico

Variable Independiente			Observaciones (O) de Indicadores de la Variable Dependiente									
			O1: H (m)		O2: K		O3: %lodos		O4: C (s-1)		O5: %Remoción Turbiedad	
			Sulfato de Aluminio	Cloruro Férrico	Sulfato de Aluminio	Cloruro Férrico	Sulfato de Aluminio	Cloruro Férrico	Sulfato de Aluminio	Cloruro Férrico	Sulfato de Aluminio	Cloruro Férrico
RG ₁ Q ₁ = 1.45 m ³ /s	Control	RG ₁ h _{c1} = 0.4	0.5	0.5	0.6	0.75	8.5	8.5	3.4	4.5	61	69
	RG ₁	h _{c2} = 0.6	1	1.2	0.73	0.8	9	10	4.3	4.6	66	70
	RG ₁	h _{c3} = 0.8	1.38	1.5	0.78	0.86	10	11.2	4.6	5.4	72	73
RG ₂ Q ₂ = 1.66 m ³ /s	Control	RG ₂ h _{c1} = 0.4	1	1.3	0.8	0.8	9	11	3.9	5.1	77	80
	RG ₂	h _{c2} = 0.6	1.5	1.5	0.85	1	10	13	5	6.3	81	85
	RG ₂	h _{c3} = 0.8	1.5	1.5	0.86	0.92	11	12	5.3	6.7	78	80
RG ₃ Q ₃ = 1.75 m ³ /s	Control	RG ₃ h _{c1} = 0.4	1	1.5	0.82	0.86	9.6	11	5	6.4	72	75
	RG ₃	h _{c2} = 0.6	0.8	1.3	0.84	0.84	9	9.5	5.5	6.4	66	71
	RG ₃	h _{c3} = 0.8	0.7	1.2	0.81	0.85	8	9.5	4.8	6.6	62	70

5.1. Conclusiones

Para cada uno de los grupos de caudales Q con variación de h_c y para los indicadores elegidos, que representan la optimización del manto de lodos, existe una relación directa en la variación de sus resultados. Conforme iban aumentando los valores de Q y h_c los efectos, ya sean positivos o negativos, que producían las condiciones hidráulicas sobre los valores de los indicadores de la variable dependiente fueron muy notorios y rápidamente identificados a través de las observaciones de las pruebas, mediciones y/o cálculos realizados.

Por lo que la manipulación de las variables hidráulicas sí produjo un cambio en el manto de lodos. En ninguno de los experimentos se observó que los valores obtenidos eran los mismos y, además, no se mantenían constantes; lo que representó, que dicha variación no era indiferente al comportamiento del manto de lodos.

De esta manera la hipótesis nula H_0 planteada es descartada, ya que los valores obtenidos entre los grupos de control y grupos experimentales no fueron iguales, la hipótesis nula manifestaba que la operación de los decantadores haciendo variar las condiciones hidráulicas no modificaba el comportamiento del manto de lodos; **aceptándose entonces como válida la hipótesis planteada** ya que esta, si señalaba la existencia de la diferencia de los resultados entre estos grupos, es decir que la variación de las condiciones hidráulicas si modificaba el comportamiento del manto de lodos, siendo entonces esta variación, un factor determinante para la optimización del manto de lodos.

La determinación de la validez de la hipótesis planteada se evidenció a través del análisis objetivo de los indicadores de la variable dependiente "Optimización del Manto de Lodos", cuyos resultados han sido el reflejo de la manipulación realizada a la variable independiente "Condición de equilibrio Hidráulico", esta validez ha sido demostrado por el análisis de varianza, donde la variable independiente de la investigación fue con un 95% de probabilidad, efectivamente el que influyó sobre el valor que tomó la variable dependiente a través de sus indicadores, esto ha permitido identificar la causa principal del

efecto objeto de estudio, por lo tanto con los experimentos realizados se ha comprobado la hipótesis inicialmente planteada.

Encontrándose para cada uno de los indicadores de la variable dependiente lo siguiente:

5.1.1. Con respecto a la Altura del Manto de Lodos: H

- ❖ ***Que a medida que el valor de la altura de agua en la campana h_c aumentaba con cada caudal de tratamiento, la altura del manto de lodos también aumentaba por desplazamiento hacia los niveles superiores de ubicación del manto de lodos diseñados para este decantador.*** Esto se vio favorecido por el aumento de la expansión del manto de lodos, que sucedió como consecuencia del incremento de la velocidad de flujo V'' durante la descarga de agua de la campana de vacío del decantador. Asimismo, los floculos del manto al entrar en expansión alcanzaron posiciones más altas en los experimentos.

Para el grupo de experimentos RG_1 inicialmente las expansiones se producían solo en las capas inferiores, no se propagaban hasta los niveles superiores; demostrando así, que el manto de lodos funcionaba más en el estado de reposo, por tener una menor altura de expansión y una mayor altura de compresión (cuadro 13) donde los lodos caían muy rápido por gravedad a la base del decantador y se depositaban como lodos acumulados; perdiéndose, de esta manera, los lodos como manto en suspensión. El manto de lodos en estas condiciones, no era favorable para la floculación de las partículas, ya que operaba más en el estado de reposo. El efecto de incremento de altura se pudo observar para los grupos de experimentos que comprendieron a RG_1 y RG_2 del diseño de experimentos, realizados tanto para el coagulante Sulfato de Aluminio y para el coagulante Cloruro Férrico.

- ❖ **Que no todos los incrementos de velocidad de flujo durante la descarga de agua de la campana V"o favorecieron al aumento de la altura H del manto de lodos;** ya que a medida que las expansiones eran cada vez más altas y frecuentes los flóculos se iban separando, entre sí, cada vez más hasta llegar al punto en el que el manto se estiraba o expandía tanto que hizo que la cohesión existente entre los flóculos se perdiera, no pudiendo caer o sedimentar en conjunto, sino todo lo contrario estos fueron arrastrados masivamente por la misma velocidad de flujo hacia la superficie del decantador con lo cual perdieron su altura por disminución de la concentración, este efecto fue observado después de haber alcanzado la altura de 1.5 m. Solo para el caso de aplicación del coagulante Cloruro Férrico (correspondiente al experimento RG_3h_{c1}) la altura del manto se mantuvo igual, pero para las demás combinaciones con este coagulante surgió la misma tendencia que para el Sulfato de Aluminio.
- ❖ **La altura del manto de lodos constituye el tamaño del floculador hidráulico en el que se produce la floculación,** la altura del manto desempeñó un rol importante dentro de la tasa de floculación de partículas, en función de la distancia (trayecto ascendente en el manto) recorrida, de la carga superficial, del gradiente de velocidad G y de la concentración de lodos. La mayor altura del manto de lodos permitió mayor desarrollo de los flóculos y mayor remoción de las impurezas del agua, atrapados en los flóculos, también permitió mayor retención de los flóculos muy pequeños, ya que a medida que atravesaban el manto de lodos, estos se fortalecían (mas duros y consistentes) y soportaban mejor a las fuerzas de cizallamiento que producían su rompimiento, asegurándose un adecuado crecimiento de los flóculos admitidos por la parte inferior del manto por coalescencia, lo que exigió una cierta velocidad vertical mínima (velocidad de flujo) ya que la aglomeración entre los flóculos se produjo a cierto ritmo y las partículas resultantes fueron las mas grandes y pesadas que las partículas iniciales; observándose estos efectos con el grupo de experimentos RG_2h_{c2} (Q_2h_{c2})

y RG_2h_{c3} (Q_2h_{c3}), con el aporte de nuevas partículas coaguladas traídas por el agua el manto tendió a aumentar su altura y concentración

5.1.2. Con respecto a la Concentración del Manto de Lodos: % [lodos]

- ❖ ***Que la concentración de lodos a diferentes profundidades del manto de lodos también fue influenciado por las variables hidráulicas.*** siendo el resultado principal de la influencia, el transporte de lodos hacia los niveles superiores, fue así que cuando hubo mayor concentración de lodos en el nivel inferior del manto de lodos (caso que se presentó en los experimentos correspondientes al grupo RG_1 para ambos coagulantes utilizados) se logró aumentar la concentración en los niveles superiores, como consecuencia del incremento del desplazamiento vertical del manto, desde el fondo hacia los niveles superiores. Aprovechándose de esta manera en desplazar todos los lodos existentes, depositados en el fondo del decantador a la zona del manto de lodos y hacerlo funcionar como una verdadera unidad de floculación, donde los flóculos presentaron movimiento "ad random" (al azar) dentro de la secuencia de funcionamiento del estado fluidizado al estado de reposo, en estas condiciones los flóculos tuvieron más espacio para desarrollarse modificando sus propiedades de tamaño y densidad, que fueron aumentados.
- ❖ ***Que la concentración de lodos tuvo relación directa con la altura del manto de lodos;*** esto es, cuanto más alto el manto, los lodos alcanzaron niveles superiores aumentando su concentración en estos niveles, pero que, a medida que el caudal y la altura de agua en la campana iban aumentando cada vez más, la concentración de lodos en el nivel inferior del manto de lodos comenzaba a disminuir; demostrando así que ***existe un valor límite de condición hidráulica que no debería excederse*** (referidos a la velocidad de flujo en la descarga de agua de la campana V''_o); ya que de lo contrario se presentaría la tendencia a perder la concentración de lodos en el fondo del decantador y por ende en el manto de lodos. El valor límite determinado según los resultados para el

coagulante Sulfato de Aluminio fue el que correspondió al grupo de experimento RG_2h_{c3} y para el Cloruro Férrico fue el que correspondió hasta el grupo de RG_3h_{c1} , valores de velocidad de flujo por encima de los valores que corresponden a estos grupos, produjo desplazamientos muy elevados del manto de lodos, debilitando su estructura de cohesión, rompimiento del manto y finalmente deterioro de la turbiedad en el decantador medido a la salida del mismo.

- ❖ ***Que la cantidad de lodos producido con el coagulante Cloruro Férrico eran más abundantes***, éstos están caracterizados por ser más grandes, más consistentes, y de fácil sedimentación, presentando mayor resistencia al desprendimiento incluso cuando se aplicaron caudales por encima de $Q_2 = 1.66 \text{ m}^3/\text{s}$ por ciertos periodos.

5.1.3. Con respecto al Coeficiente de Cohesión de Lodos: K

- ❖ ***Que la secuencia continua del funcionamiento del manto de lodos, pasando del estado fluidizado al estado de reposo en forma sucesiva, fue directamente relacionado con las variaciones de los valores asignados a las variables hidráulicas***, fue a través del efecto que estas variaciones producían, los flóculos resultaban ser frágiles o consistentes; es decir, que presentaban una menor o mayor cohesión entre ellos, después del ciclo de expansión – sedimentación, para los grupos de los experimentos realizados con RG_1 los valores del coeficiente de cohesión alcanzaron valores por debajo del límite inferior del rango deseado $0.8 \leq K \leq 1.2$ debido a que no se produjo buena colisión entre los flóculos por insuficiente energía cinética, proporcionado por la velocidad de flujo V''_o , no produciéndose los contactos más frecuentemente y con mayor intensidad; por lo tanto el manto de lodos existente estaba constituido por flóculos ligeros (menos densos), ricos en agua (esponjosos) y frágiles, los cuáles también fueron las causas de que la concentración de lodos no aumentara en los niveles superiores del manto, ya que los flóculos de menor densidad no fueron atrapados en el

manto, siendo fácilmente transportados por el flujo de agua hacia la salida del decantador, en consecuencia se presentó turbiedad elevada a la salida del decantador, lo que ocasionó también la disminución del % de Remoción de Turbiedad.

- ❖ ***Que los valores obtenidos en los experimentos con los grupos de los experimentos RG_2 y RG_3 se encontraron por encima del valor límite inferior alcanzando en algunos casos bastante proximidad al valor del límite superior,*** especialmente cuando el coagulante aplicado fue el Cloruro Férrico. Sin embargo, aún cuando los valores de K se encontraban dentro del rango deseado, se presentó la disminución de la concentración de lodos como consecuencia del incremento de la fricción por aumento del roce del agua con las partículas floculentas, provocado por una alta velocidad de flujo con respecto al caudal $Q_3 = 1.75 \text{ m}^3/\text{s}$. Efecto que se observó, sobre todo, en el manto de lodos producido con el Sulfato de Aluminio (produce flóculos esponjosos y muy pequeños).

5.1.4. Con respecto al Gradiente de Velocidad: G

- ❖ ***Los gradientes de velocidad en el manto de lodos se presentaron con una secuencia escalona,*** es decir los valores más altos correspondían al fondo del decantador (nivel inferior del manto): disminuyendo su valor a medida que la concentración de lodos disminuía y conforme el flujo ascendía en el decantador, cuadro 15.
- ❖ ***Que los gradientes de velocidad G al ser obtenidos en función de la concentración de lodos para cada altura disponible, reflejaron:***
 - La existencia de ciertos límites de condiciones hidráulicas, demostrado por la variación del caudal Q y altura de agua en la campana h_c durante la descarga, dentro de los cuáles se propició la floculación óptima de las partículas provenientes de la coagulación, favoreciendo el incremento de la altura del manto de lodos H, cohesión de flóculos K después de la expansión - sedimentación y

aumento de la concentración de lodos en los diferentes niveles del manto; suficiente para mantener el manto de lodos en suspensión continua, siendo el límite de variación aceptable determinado para los grupos de experimentos correspondiente para $RG_2h_{c(1 a 3)}$ y el más óptimo fue el que correspondió al grupo de experimento RG_2h_{c2} (Q_2h_{c2}).

- Los resultados de gradientes de velocidad obtenidos entre los experimentos de los grupos RG_1 (Q_1h_c en sus 3 valores) para ambos coagulantes fueron los mas bajos, no desarrollándose buena floculación al ser los valores de intensidad de agitación o colisión entre los flóculos muy bajos, y los resultados obtenidos para los grupos de los experimentos RG_3 , fueron altos, que provocaron el rompimiento de los flóculos es decir que estos valores superaron los requerimientos de la floculación en la altura disponible del manto presentándose el rompimiento de los flóculos.

5.1.5. Con respecto a la Remoción de Turbiedad: % de Remoción de Turbiedad

- ❖ ***Que la remoción de la turbiedad en el decantador esta directamente relacionado con las características del manto de lodos, en cada uno de los experimentos realizados***, cuanto menos fue el valor de la turbiedad a la salida del decantador, el porcentaje de remoción de turbiedad fue mayor, esto se presentó para las condiciones en que los valores de los indicadores de la variable dependiente consiguieron resultados satisfactorios para cada uno de ellos, referidos a la altura de manto de lodos ($H = 1.5$ m.), concentración de lodos (%[L] en todos los niveles, mayor y menor concentración de lodos en los niveles inferior y superior respectivamente), coeficiente de cohesión de lodos (el valor de K comprendido dentro del rango) y gradiente de velocidad (valores de G que no produzcan el desprendimiento ni arrastre de los flóculos y tampoco el rompimiento del manto de lodos) en forma escalonada, siendo mas alto en el nivel inferior del manto y mas bajo en el nivel

superior del manto, para evitar la pérdida de los flóculos; funcionando el manto de lodos en las mejores condiciones hidráulicas de caudal Q , altura de agua h_c , velocidad de sedimentación V''_s y velocidad de flujo V''_o requeridas, que favorecieron a una buena floculación de las partículas, consiguiéndose la mayor retención de las impurezas del agua en los flóculos que conformaban el manto de lodos. De los resultados obtenidos se observó que porcentajes de remoción superiores al 75% se presentó para los grupos RG_2 con cada uno de los 3 valores de h_c , habiéndose alcanzado el mayor porcentaje de remoción de turbiedad con el grupo $RG_{2h_{c2}}$ ($Q_{2h_{c2}}$, 1.66 m³/s y $h_c = 0.6$ m.) para ambos coagulantes, siendo para el Cloruro Férrico el valor mas alto igual a 85% y para el Sulfato de Aluminio igual a 81% (para los valores con los que se experimentó), estos resultados demostraron mayor influencia de la Condición de Equilibrio hidráulico sobre la "Optimización del Manto de Lodos" es decir que los valores de los tratamientos asignados a la variable independiente influenciaron mejor a la variable dependiente, con 95% de probabilidad de acuerdo al análisis de varianza realizados para cada indicador.

- ❖ ***Que el porcentaje de remoción de turbiedad determina la eficiencia del decantador***, el cálculo del porcentaje de remoción de turbiedad se realizó sobre la base de la turbiedad residual obtenida como resultado de la decantación de las partículas floculentas en el manto de lodos y la turbiedad en el agua de ingreso al decantador; este porcentaje de remoción definió en forma rápida la eficiencia del decantador, fue a través de este valor que a priori se pudo determinar que las remoción de las demás impurezas fisicoquímicas y algunas biológicas también habían sido eliminados al quedar atrapados en los flóculos formados que contenían diversos subproductos fisicoquímicos y biológicos.

5.1.6. Con Respecto a la Operación de los decantadores Pulsator de Manto de Lodos, siguiendo las recomendaciones bajo las condiciones Óptimas, presenta ventajas importantes en los siguientes aspectos:

5.1.6.1. Calidad de Agua.- se registraron valores más bajos de turbiedad a la salida del decantador, lo que contribuyó directamente con el funcionamiento del siguiente proceso de tratamiento de agua "filtración" que se reflejó en:

a. Tiempos prolongados de funcionamiento de los filtros, se observó el aumento hasta en 25% del tiempo, por lo tanto hubo disminución de las frecuencias de lavado, utilizándose menor volumen de agua en los lavados y menor consumo de energía eléctrica. Mayor capacidad de filtración, disminución de la colmatación (ensuciamiento) y retención de las partículas floculentas pequeñas.

b. Mejoramiento de la calidad del agua producida por los filtros, medido a través del parámetro de operación de Turbiedad (considerado también como parámetro de calidad), cuyo valor obtenido fue por debajo del Valor Máximo Admisible igual a 5 N.T.U. para agua tratada con filtración, según la Norma Técnica Peruana N.T.P 214.003 "Agua Potable", concordante con **el valor L.M.P (límite máximo permisible) del Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano emitido en setiembre 2010 a través del D.S. N° 031 -2010 - SA;** los valores promedios obtenidos después del proceso de filtración fueron alrededor de 0.6 N.T.U.

A menor turbiedad, la concentración de metales también fue menor, ya que esta relación es directamente proporcional; asimismo según las guías de la OMS (Organización Mundial de la Salud) en estudios relacionados con parámetros biológicos especialmente en formas parasitarias (Giardia y Criptosporidium) se encontró que hay una relación directa con la turbiedad.

Por lo tanto, el obtener agua con baja turbiedad en el proceso de decantación, contribuye a la calidad final del agua producida, en Plantas de Tratamiento de

Agua, con fines de Consumo Humano, el cual esta directamente relacionado con la Salud de la Población Servida.

Cabe mencionar que los valores de turbiedad obtenidos son exclusivos para los experimentos realizados, ya que en el proceso de tratamiento de agua en la Planta de La Atarjea se utilizan actualmente **combinaciones de coagulantes y polímero catiónico**, con los cuáles los valores de turbiedad a la salida de los decantadores son **menor e igual a 3 N.T.U y menor e igual a 0.3 N.T.U. a la salida de las unidades de filtración.**

5.1.6.2. Costos de Operación.- principalmente relacionado con los costos de los coagulantes químicos utilizados en el proceso de coagulación previo al proceso de decantación (Cloruro Férrico, Sulfato de Aluminio), cuando el Manto de Lodos se encuentra en la condición Optimizado, se puede disminuir la dosificación de los coagulantes químicos hasta en 2 p.p.m o 2 gr/m³ (cuadro 33) sin tener que alterar las características de:

a. Manto de Lodos, este manto se encuentra saturado de iones de los metales proveniente de los coagulantes utilizados: el hierro o aluminio, el contenido de estos metales en el manto en conjunto con la concentración de lodos, compensan la disminución de la dosis de los coagulantes, sin tener que afectar a las características adquiridas del manto para la condición de equilibrio hidráulico, en cuanto a la aglomeración, separación de los flóculos y decantación de los mismos, medidos por los indicadores de altura, concentración, coeficiente de cohesión, y gradiente de velocidad. Cabe mencionar si el manto no esta optimizado los iones de los metales de los coagulantes también son arrastrados en los flóculos hacia la salida del decantador.

b. Turbiedad a la salida del decantador, en todo momento los valores de turbiedad se encontraron ≤ 5 N.T.U. Encontrándose los porcentajes de remoción de turbiedad sobre el 80%, que indica también que hubo reducción de los componentes químicos y algunos biológicos retenidos en los flóculos.

5.1.6.3. Operación de Plantas.- en la plantas de tratamiento de agua la producción de agua se realiza en forma continua durante las 24 horas del día, durante la producción se podrían presentar cambios intempestivos tanto en la cantidad como en la calidad, en estas circunstancias el manto de lodos al encontrarse en las condiciones óptimas puede soportar estos cambios por tiempos de duración corta, sin tener que afectar la calidad del agua producida; dando tiempo al ajuste de los parámetros del proceso.

Cuadro 33

Ahorro: Manto de Lodos Optimizado

Para Caudal de Tratamiento $Q = 5 \text{ m}^3/\text{s} = 12.960.000 \text{ m}^3/\text{mes}$

Disminución de Coagulante: $2\text{gr}/\text{m}^3$

Ahorro Total de Coagulante por mes 26 TM/Mes

Grupo Óptimo	Coagulante	Costo \$/TM	Ahorro \$/mes
RG₂h_{c2}	Cloruro Férrico	234	6.084,00
	Sulfato de Aluminio	134	3.484,00

Por lo tanto con los resultados de los indicadores medidos se ha demostrado que ***“la condición de equilibrio hidráulico fue el factor determinante para lograr la optimización del manto de lodos en la remoción de las impurezas del agua en el proceso de decantación”***, siendo la causa de los efectos producidos en cada uno de estos la aplicación de las diferentes condiciones hidráulicas a los experimentos.

5.1.7. Finalmente con Respecto para cada grupo de experimentos realizados durante la investigación, se encontró que hay un valor óptimo de altura de agua en la campana h_c , que presentan resultados mas favorables de funcionamiento del manto de lodos en la remoción de la turbiedad y de las demás impurezas atrapadas en los flóculos, ver cuadro 34.

Cuadro 34

Resultados Óptimos de Los Indicadores Para Cada Grupo de Experimentos con Los Coagulantes										
Grupo Experimento	H: m.		K		%[lodo]		G: s-1		%Remoción Turbiedad	
	Sulfato de Aluminio	Cloruro Férrico								
RG ₁ h _{c3} (1.45, 0.8)	1.38	1.5	0.78	0.86	10	11.2	4.6	5.4	72	73
RG ₂ h _{c2} (1.66, 0.6)	1.5	1.5	0.85	1	10	13	5	6.3	81	85
RG ₃ h _{c1} (1.75, 0.4)	1	1.5	0.82	0.86	9.6	11	5	6.4	72	75

De estos 3 grupos, el más óptimo es el que corresponde a RG₂h_{c2}; sin embargo se puede utilizar también las condiciones hidráulicas de los demás grupos, cuando se utilicen los caudales que correspondan a estos grupos, de acuerdo a la variabilidad de la producción.

De estos resultados se ha observado que hay una relación inversa entre el caudal de tratamiento y la altura de agua, por lo que a menor caudal de tratamiento le corresponde mayor altura de agua en la campana h_c y viceversa a mayor caudal menor h_c , bajo estas condiciones se mantiene el manto de lodos en las condiciones mas favorables (óptimos para cada caudal Q), para el caudal medio del experimento coincidentemente, se obtuvo como valor óptimo el valor medio de h_c .

El Manto de Lodos optimizado durante su funcionamiento hidráulico, facilitan a:

5.1.7.1. Al desarrollo progresivo de los microfloculos (provenientes de la coagulación) que ingresan al decantador, durante su trayecto por el espacio correspondiente a su altura, desarrollo que produjo el incremento de la concentración de lodos en las diferentes alturas o niveles del manto, manteniendo a los floculos en continuo contacto de aglomeración producido por la intensidad de agitación proveniente de la turbulencia producida al momento de la descarga de agua de la campana; durante el cual los floculos al chocar unos con otros interactuaron aumentando su tamaño, densidad, cohesión, concentración y altura de lodos, produciendo una decantación fácil y conjunta de todos los floculos, como si fuese un solo bloque, minimizando los efectos de pérdida y el arrastre de los floculos hacia la salida del agua en el decantador.

5.1.7.2. La separación de los floculos en la decantación porque hay una diferencia aceptable entre los valores de velocidad, siendo la velocidad de sedimentación V^s mayor a la velocidad de flujo V^o (cuadro 8 y 9), durante el proceso de expansión y compresión del manto, donde para lograr la condición de equilibrio hidráulico la altura de expansión no necesariamente debe ser igual a la altura de compresión, es recomendable que el manto de lodos opere dentro del estado de compresión normal, para la presente investigación se presentó desde el grupo de experimentos RG_1h_{c3} al RG_2 en sus 3 niveles de variación de h_c , es por eso que se denomina también **manto de lodos en estado de equilibrio inestable**.

Sí la velocidad de flujo V^o se incrementara mas, la expansión aumentaría proporcionalmente hasta llegar a un punto en el cual el manto se rompe y supera la velocidad de fluidificación y sería arrastrado por el flujo ascendente del agua hacia la salida del agua decantada. Como los surgidos con RG_3

Se deduce así, que los "floculos" en el manto están en un estado de **equilibrio inestable**, que depende de la concentración C de las partículas suspendidas, que cualquier variación de esta concentración se traduce en un ascenso o descenso de la interfase con mayor o menor arrastre de floculos en el efluente del decantador.

5.1.7.3. A la interacción entre los flóculos, impactando en forma positiva en el funcionamiento del manto de lodos; así por ejemplo una mayor altura denotaba abundante concentración de lodos en todos los niveles del manto, relacionado con la energía suficiente para producir el desarrollo de los flóculos proveniente de la velocidad de flujo durante la descarga de agua, reteniéndose hasta los pequeños flóculos al existir una buena cohesión y aumentando el porcentaje de remoción de turbiedad a la salida del decantador. Demostrándose así, **que estos indicadores están muy relacionados entre sí**, ya que el resultado de uno de ellos afectaba a los demás, por lo tanto todos estos indicadores son considerados como los factores principales para la formación y funcionamiento del manto de lodos; en estas interacciones fue que se presentaron las relaciones de los procesos fisicoquímicos e hidráulicos para la formación y mantenimiento de las partículas floculentas y del manto de lodos respectivamente, ya que el exceso de los iones de los metales de los coagulantes empleados, Hierro y Aluminio que se concentraron en el manto de lodos favorecieron a las reacciones secundarias aumentando la cantidad de flóculos.

5.2. Recomendaciones

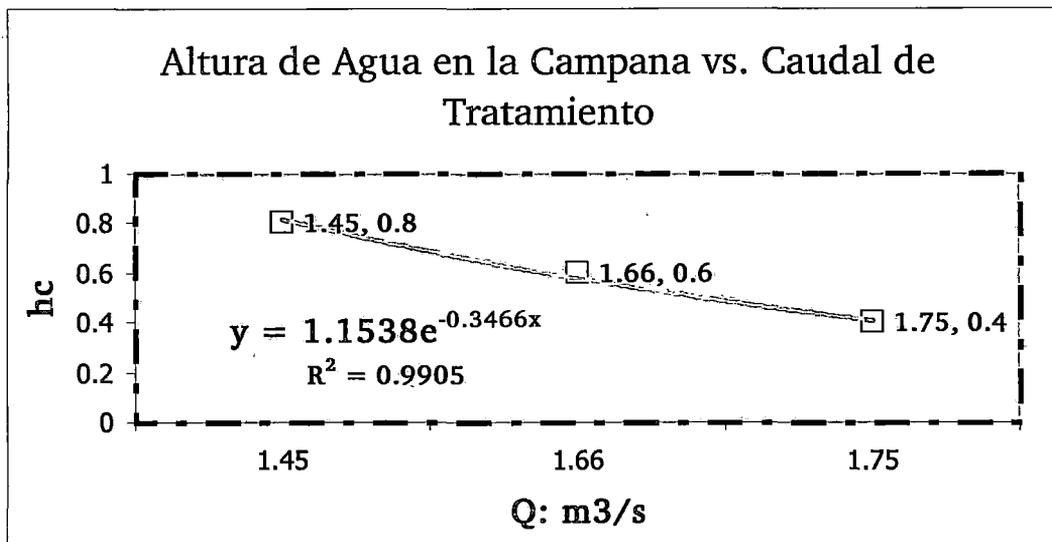
De los resultados obtenidos en los diferentes experimentos se recomienda:

5.2.1. Que cada vez que cambie el caudal de tratamiento Q es necesario realizar la regulación de la altura de agua h_c por lo tanto, durante la operación de los decantadores, esta regulación debe realizarse siguiendo el criterio del gráfico 9, según la variación de caudal que se está tratando y siguiendo el criterio de regulación de los topes del decantador descrito en el capítulo III, quedando de esta manera estandariza la secuencia de la operación del decantador : $a > Q < h_c$.

Este criterio debe ser aplicado cuando se trata de decantadores de Manto de Lodos del Tipo Pulsator.

5.2.2. Se recomienda que para optimizar el funcionamiento del manto de lodos no se debe mantener constante los valores de altura de agua en la campana frente a la variación de caudal Q de tratamiento, ya que esto incide directamente de la calidad de agua producida en el decantador.

Gráfico 9



Esto demuestra que durante la producción, la operación del decantador no debe estar orientado solo a la regulación de la dosificación de los coagulantes.

5.2.3. Es recomendable que los resultados de estos experimentos sean aplicados cuando la turbiedad del agua de entrada al decantador varíe en el rango de turbiedad experimentado, que para el presente estudio esta comprendido entre el rango de aguas de baja turbiedad 6 a 50 N.T.U determinados para la Planta de La Atarjea.

Para aguas de alta turbiedad los valores de concentración de lodos en el manto tienen otras características como por ejemplo la cantidad se incrementa muy

rápidamente, así como la altura y los demás factores que permiten el funcionamiento óptimo descritos, tienen un comportamiento diferente; como consecuencia de la gran cantidad de partículas en suspensión que definen la Turbiedad, que para las aguas del río Rímac (fuente de abastecimiento de La Planta La Atarjea) son de origen silíceo cuya densidad es similar a 2.60, a diferencia de aguas con color que es producto principalmente de los ácidos orgánicos (húmicos y fúlvicos) que son de origen vegetal con densidades variables de 1 a 1.5.

FUENTES DE INFORMACIÓN

Fuentes de Información Textos

- ARBOLEDA, Jorge. (1974) **Hydraulic Control Systems of Constant and Declining Flow Rate in Filtration**. Journal AWWA. Water Technology/Quality.
- ARBOLEDA, Jorge. (1969) **Manual De Tratamiento De Aguas Potables**. Tanques De Flujo Ascensional. Caracas, Venezuela.
- ARBOLEDA, Jorge. GRINPLASTCH, Bernardo y KIRCHMER, Cliff (1974) **Métodos De Evaluación De Procesos De Tratamiento De Agua**. Lima, Perú.
- ARBOLEDA, Jorge (1993) **Teoría Y Práctica De La Purificación Del Agua. Teoría De La Sedimentación Del Agua, Diseño De Sedimentadores**. Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Bogotá, Colombia.
- ARBOLEDA, Jorge, GIRALDO, Roberto and SNEL, Herman (1985) **Hydraulic Behavior Of Declining-Rate Filtration**. Journal AWWA.
- BRUST CARMONA H. BENITEZ A. ZARCO RABAGO J. SÁNCHEZ E. Y MASCHER I. (1998) **Eficiencia De Celdas Generadoras De Gases Oxidantes Alimentados Con Energía Eléctrica Solar**. Centro De Desarrollo Y Aplicaciones Tecnológicas.
- CARRASCO QUIROZ, Carlos Alberto (2007) **Tratamiento Físico Químico De Aguas Residuales**. Título para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad De Chile. Santiago, Chile.
- CENTRO PANAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y CIENCIAS DEL AMBIENTE (CEPIS). (1981) **Teoría, Diseño y**

Control De Los Procesos De Clarificación Del Agua. Organización Mundial de la Salud. Lima, Perú.

- CHÁVEZ GUERRA, Carlos (2002) **Optimización De La Etapa De Floculación-Sedimentación De Una Planta Potabilizadora Basada En Manto De Lodos.** Tesis de Licenciatura. Facultad de Química, UAEM.
- DE AZEVEDO NETTO, J.M. y ACOSTA ÁLVAREZ, Guillermo. (1976) **Manual de Hidráulica.** Ediciones Harla. Sao Paulo, Brasil.
- DE AZEVEDO NETTO, José M. y RICHTER, Carlos A. (1991) **Tratamiento del Agua, Tecnología Actualizada.** Editorial Blücher. Sao Paulo, Brasil.
- DEGRÉMONT. (1989) **Manual Técnico del Agua.** Tomo I y II. Novena Edición. París, Francia.
- DEGRÉMONT. (1973) **Manual Técnico del Agua.** París, Francia.
- DEGRÉMONT. (2007) **Manual Técnico del Agua.** Tomo I y II. París, Francia.
- DE LUCA J. S., SANTANA A. M. (2000) **Hipoclorito Generado Electrolíticamente en Tratamiento De Aguas.** Memorias Del XXVII Congreso Interamericano De Ingeniería Sanitaria Y Ambiental. Porto Alegre, Brasil.
- DESJARDINS, Raymond. (1998) **El Tratamiento Del Agua.** Ediciones de la Escuela Politécnica de Montreal. Segunda Edición. Montreal, Canadá.
- DREW CHEMICAL CORPORATION. (1994) **Principios del Tratamiento Industrial del Agua.** New Jersey, Estados Unidos de América.
- EDELIN, F. (1992) **Depuración Físico - Química del Agua, Teoría y Tecnología.** Ediciones Cebedoc. Belgrado, Bélgica
- FAIR G. M., GEYER C.J. y OKUM D. A. (1987) **Ingeniería Sanitaria y de Aguas Residuales.** Ediciones Ciencia y tecnología.

- ILAGORRE RAMIREZ, Raúl y RIVAS MARTÍNEZ, Javier. (2002). **Desarrollo De Un Software De Adquisición De Datos Y Control Para Instrumentos De Investigación En Tratamiento De Aguas Y Estudios Ambientales** Tesis. Ingeniería en Computación UAEM.
- LEVENSPIEL O. (1987). **Ingeniería De Las Reacciones Químicas**. Ediciones Repla. Philadelphia, EE. UU.
- LEVENSPIEL O. **Manual De Abastecimientos Públicos De Aguas**. (1975) Editorial Limusa. Philadelphia, EE. UU.
- LIND Douglas A, MARCHALL William, WATHEN Samuel. (2008) **Estadística Aplicada a los Negocios y a la Economía**. Edición Mc Graw Hill.
- LÓPEZ M, Manuel Enrique. (2001) **Reactor Anaeróbico Tipo EASA: Reactor Híbrido de Flujo Ascendente**. Título Para Obtener Maestría En Ingeniería Ambiental Y Saneamiento. Universidad Internacional De La Paz. México DF, México.
- MCCALLION, John; KEMMER, Frank (1989) **Manual del Agua; Su Naturaleza, Tratamiento y Aplicaciones**. Tomos I, II y III. Ediciones McGraw Hill. México DF, México
- MARTÍNEZ CISTERNAS, Ariel Adolfo. (2008) **Reducción del Volumen de Lodos en Planta de Tratamiento de Aguas Urbanas Vía Filtración**. Título Para Obtener El Título En Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Católica De Valparaíso. Valparaíso, Chile.
- METCALF, Eddy. (1977) **Tratamiento de Depuración Del Aguas Residuales**. Ediciones Labor S.A. Barcelona, España.
- MILLER, Derek G. (2002) **Experiencias con Filtros de Flujo Ascendente**. Asociación de Investigación del Agua. Londres, Inglaterra

- MILLER, Derek G. (2002) **Reactores de Contacto con Sólidos**. Asociación de Investigación del Agua, Londres, Inglaterra.
- MONTGOMERY DOUGLAS Y RUNGER GEORGE, **Probabilidad y Estadística Aplicada a la Ingeniería**.
- PAVÓN SILVA T., CHÁVEZ C. Y GARRIDO H. S. (2000) **Puesta En Marcha De Un Sistema Integrado De Potabilización De Agua Aplicado A Comunidades Rurales**. Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Porto Alegre, Brasil.
- ROJAS V. VÁSQUEZ S. G. (2000) **Celdas Electrolíticas Para La Producción De Hipoclorito De Sodio**. XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Porto Alegre, Brasil.
- ROJAS V. VÁSQUEZ S. G. (2000). **Estabilidad De La Solución De Hipoclorito Generado Por Electrólisis**. XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Porto Alegre, Brasil.
- PAVÓN SILVA, Thelma Beatriz; GARRIDO HOYOS, Sofía Esperanza; CHÁVEZ GUERRA, Carlos. (2007) **Experiencias En La Evaluación De Un Sistema De Potabilización Con Sedimentación Por Manto De Lodo Aplicado A Comunidades Rurales**. Universidad Autónoma De México. México DF, México.
- RAMÍREZ, Juan Sebastián (2006) **Tratamiento De Aguas Y Parámetros Hidráulicos**. Universidad Central Del Ecuador. Escuela De Ingeniería Química. Quito, Ecuador.
- RÍOS, Danilo; LÓPEZ, Julieta; GÓMEZ, Cecilia; BROGGI, Giuliana; LANFRANCONI, Armando; PLOTTIER; Daniela. (2002) **Optimización Del Proceso De Floculación En Plantas Que Operan Con Gradientes De Velocidad Escalonados**. XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cancún, México.

- ROMERO JAIRO A. (1995) **Sedimentación. Diseño De Sistemas De Purificación De Aguas.** Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá, Colombia.
- SCENNA NICOLÁS J. (1999) **Modelo, Simulación y Optimización de Procesos Químicos.**
- VALIENTE BANDERAS A. (1998) **Problemas De Flujo De Fluidos. Dinámica De Fluidos**

Fuentes de Información Electrónicas:

<http://www.cybertesis.edu.pe/sdx/sisbib/>

<http://cybertesis.uni.edu.pe/sdx/uni/>

<http://www.aguaslatinas.com/>

<http://www.hidritec.com/ser-potable.htm>

http://www.unet.edu.ve/~aostos/LinkedDocuments/Pr%E1ctica%20No.2%20_%20Viscosidad%20Absoluta.pdf

<http://www.cepis.org.pe/bvsacd/scan/02554-reactores.pdf>

<http://www.cepis.ops-oms.org/bvsacd/scan2/009463/09463-02.pdf>

http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/uruguay30/UY02108_Lopez.pdf

<http://www.fundibeq.org/>

ANEXO 1

DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

Las definiciones que permitirán dar claridad a la investigación realizada.

Turbiedad.- Es un parámetro de calidad de agua y es una forma de medir la concentración de partículas coloidales y suspendidas en el agua (arcillas, limo, materia orgánica e inorgánica finamente dividida, etc.) la unidad de medida es UNT: Unidades Nefelométricas de Turbiedad.

pH.- Es una medida utilizada por la Química para evaluar la acidez o alcalinidad de un sistema por lo general en su estado líquido, el pH indica la concentración del ión Hidronio [H_3O^+] el valor del pH se mide en forma precisa mediante un potenciómetro conocido como pH-metro. Es muy importante tener en cuenta el valor de este pámetro cuando se realizan las pruebas para la determinación de las dosis a aplicar de los coagulantes y/o polímeros.

Alcalinidad.- Se define como la capacidad del agua para neutralizar ácidos o aceptar protones, dado que la alcalinidad de las aguas superficiales esta determinada generalmente por el contenido de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, tomándose como un indicador de dichas especies iónicas. En el tratamiento de agua valores de alcalinidad alta disminuyen la dosis del coagulante, en cambio valores bajos de alcalinidad requieren dosis elevadas del coagulante.

Partículas Coloidales.- Partículas cuyas dimensiones varían entre 1μ (micra) y 1000μ (micra) y no pueden sedimentar aún cuando las partículas sean mas densas que el líquido que las rodea. El término coloide según Graham significa gelatinas.

Las partículas coloidales tienen las propiedades cinéticas (movimiento browniano, difusión y presión osmótica); propiedades ópticas (efecto Tyndall-Faraday, coloración); propiedades de superficie (adsorción) y electrocinetismo.

Coagulante.- Al agregar el coagulante al agua esta se hidroliza es decir reacciona con la molécula del agua y puede producir desestabilización por simple adsorción específica de los productos de hidrólisis (generalmente con carga positiva) en la doble capa que rodea los coloides negativamente cargados (compresión de la doble carga o neutralización de las cargas) o por interacción química con los grupos ionizables de su superficie. Los principales coagulantes provienen de las sales de aluminio (sulfato de aluminio, cloruro de aluminio, etc.) y sales de hierro (cloruro férrico, sulfato férrico, etc.).

Para el tratamiento de agua se utilizan en cantidades pequeñas que oscilan entre 10 mg/l a 50 mg/l, estas cantidades están en función de las características fisicoquímicas del agua y de las características hidráulicas de las unidades de tratamiento.

Polímero.- Productos químicos de origen sintético con grandes cadenas poliméricas, cuyas fórmulas químicas son complejos carboxílicos con grupos amino o amidas, dependiendo de la carga que posean (catiónico, aniónico o no iónico) se caracterizan por su propiedad de aglomerar las partículas por medio:

- **Puente químico**, donde la cadena polimérica del polímero aprovecha la abundancia de partículas floculentas (alta concentración) del manto de lodos asociado con su peso molecular produciendo el efecto de barrido en las partículas sobre todo de aquellas que se encuentran dispersas y de menor tamaño que se encuentran en el manto de lodos, incrementando sus cualidades de tamaño, peso y cohesión con respecto a las demás partículas floculentas que conforman el manto de lodos.
- **Adsorción química** (para aguas de alta turbiedad) de las partículas floculentas del manto de lodos en su cadena polimérica por la alta densidad de carga que presentan, permitiendo la aglomeración mutua entre ellas y con otras cadenas o flóculos que tienen sitios vacíos o vacantes, esto permite formar una masa esponjosa, que al juntarse aún mas con otras aumentan su aglomeración y peso, facilitando su separación (se aplica la 4ta fase del mecanismo de coagulación-floculación).

Dosificación.- Acción de adicionar una sustancia química en este caso adición de los coagulantes y/o polímeros utilizando dispositivos electromecánicos de accionamiento manual o automática y dispositivos a gravedad, la elección de estos dispositivos es función de las propiedades de los coagulantes y polímeros.

Coagulación.- Proceso químico donde las partículas coloidales presentes en el agua son desestabilizadas de las cargas repelentes que las mantienen en suspensión; y son neutralizados por la adición de cargas iónicas contrarias provenientes de los iones metálicos procedentes de los coagulantes.

Floculación.- Es el proceso de aglomeración de las partículas desestabilizadas por acción del coagulante, que entran en contacto unas con otras, la tasa de aglomeración de estas partículas depende de la probabilidad de contacto y de la eficacia de estos contactos. La floculación tiene por objetivo de aumentar la probabilidad de contacto entre estas partículas, que son provocados por diferencia de velocidades y pueden ser debido a Movimiento Browniano (movimiento browniano de partículas) conocido como floculación pericinética y al desplazamiento de la partícula dentro del fluido producido por un agente externo y se denomina floculación ortocinética. Según este último los floculadores por el tipo de energía usada para producir la agitación pueden ser hidráulicos (flujo horizontal, flujo vertical y flujo helicoidal) y mecánicos (rotatorios, reciprocantes, etc.)

- **Floculación Pericinética.-** La agitación del agua se realiza por el movimiento browniano que es una propiedad cinética de los coloides corresponde al movimiento constante y desordenado.
- **Floculación Ortocinética.-** La agitación del agua se realiza por las diferencias de velocidad proporcionadas por un elemento externo, como los agitadores mecánicos y eléctricos y los agitadores hidráulicos como los floculadores de pantallas horizontales o verticales.

Floc o Flóculos.- Pequeñas motas semejantes al algodón de aspecto amorfa que se forman por acción de los coagulantes químicos con las partículas

coloidales del agua, que producen los diferentes precipitados de los hidróxidos de los metales de los coagulantes. Los flocs se forman también por acción biológica en el tratamiento de aguas residuales.

Manto de Lodos.- El manto de lodos es una capa homogénea de flóculos de diferentes tamaños, formas y pesos, que presentan diferentes concentraciones volumétricas o densidades de lodos en toda su altura o espesor, caracterizándose por presentar mayor concentración de lodos en el nivel inferior cerca al ingreso de agua coagulada próximo a las tuberías de distribución y una menor concentración en el nivel superior cerca al vertedero del concentrador de lodos.

La diferencia de concentración de lodos óptima entre el nivel inferior y el nivel superior para los decantadores Pulsator es del 10% (Manual Técnico del Agua – Dégremont) que esta en función principalmente de las partículas en suspensión presentes en el agua cruda a tratar representados por la turbiedad, las dosis de coagulantes y/o polímeros añadidos al agua, intensidad de agitación y el caudal de tratamiento.

Concentración de Lodos.- Volumen de lodos acumulados por unidad de tiempo, medido en la zona del manto de lodos.

Gradiente de Velocidad.- Energía disipada en el agua para producir el movimiento del agua y contacto de las partículas.

Sedimentación.- Proceso de caída de una partícula por acción natural dependiendo de sus características principales de tamaño y peso.

Decantación.- Proceso de caída de las partículas floculentas, formadas por acción de los coagulantes químicos o por acción biológica.

Agua Decantada.- Agua que se obtiene a la salida del decantador, con características específicas cuyos valores son mas bajos que las características del agua de entrada al decantador.

Pulsaciones.- Movimiento vertical armónico del agua en el decantador pulsator, realizado en forma ascendente y descendente, ocasionado por la regulación del sistema de pulsaciones conformado por la altura de agua en la campana h_c , los tiempos de llenado T_1 y tiempo de vaciado T_2 de la campana de vacío.

Caudal.- Volumen de agua por unidad de tiempo que pasa a través de una unidad de medición.

ANEXO 2

FÓRMULAS Y CÁLCULOS

FÓRMULAS Y CÁLCULOS

1) Cálculo para Determinación de Velocidades en el Manto de Lodos del Decantador

Cálculo de Velocidades

Datos

A. total decantador =	1405.8 m ²	
A. total concentrador =	336.6 m ²	
A. neta decantador =	1069.2 m ²	
A. campana neto =	12.64 m ²	
N° de campana =		2
A. total neto de campana	25.28 m ²	
Pulsación:	30 seg x 15 seg	
hc: m.		

Ejemplo de Cálculo

Q1 =	1.45 m ³ /s
hc1 =	0.4 m

1.1.- Velocidad de Ingreso al decantador V'o

a) Durante el llenado de la campana: V'o

$$\boxed{V'o = Q' / A. neta dec.}$$

Volumen agua en la campana =	A. total neto de campana	x hc	
Volumen agua en la campana =	25.28 x 0.40		10.112 m ³

Caudal de llenado de la campana Q _{ll,c} =	Volumen agua en la campana / T1	
Caudal de llenado de la campana Q _{ll,c} =	10.112 m ³ / 30 seg. =	0.336 m ³ /s

Caudal de ingreso al decantador Q' =	Q1 - Q _{ll,c}	=	1.114 m ³
--------------------------------------	------------------------	---	----------------------

Velocidad de ingreso al decantador V'o =	Q' / A. neta dec. =	1.114/1069.2 x 3600	= 3.75 m/hr
--	---------------------	---------------------	-------------

b) durante el vaciado o descarga de agua de la campana: V''o

$$\boxed{V''o = Q'' / A. neta dec.}$$

Caudal de vaciado de la campana Q _{v,c} =	Volumen agua en la campana / T2	
Caudal de vaciado de la campana Q _{v,c} =	10.112 m ³ / 15 seg.	= 0.674 m ³ /s

Caudal de ingreso al decantador Q'' =	Q1 + Q _{v,c}	=	2.124 m ³ /s
---------------------------------------	-----------------------	---	-------------------------

Velocidad de ingreso al decantador V''o =	Q'' / A. neta dec. =	2.124/1069.2 x 3600	= 7.14 m/hr
---	----------------------	---------------------	-------------

1.2- Velocidad de Sedimentación Interferida Vs.i

En los decantadores de Manto de Lodos, la decantación que se presenta es siempre interferida, durante el llenado de la campana la interfase lodo - agua cae lentamente debido a la compresión que existe entre los flocúlos con tendencia a compactarse; si no hay cambio de la velocidad de flujo. Esta interferencia es continua y se presenta aún cuando ocurre la expansión del manto, los flocúlos comienzan a decantar desde el punto máximo que alcanzaron con una velocidad mas grande que durante el llenado siendo igual a la velocidad de caída de la interfase (lodo - agua) mas la velocidad con que son desplazados en sentido descendente.

Valores de Porosidad antes del llenado y después de la descarga de agua de la Campana

hc	1.45 m3/s			1.66 m3/s			1.75 m3/s		
	0.4	0.6	0.8	0.4	0.6	0.8	0.4	0.6	0.8
FeCl3: antes	0.93	0.92	0.91	0.94	0.91	0.94	0.93	0.95	0.9
FeCl3: después	0.91	0.91	0.9	0.93	0.895	0.91	0.91	0.9	0.89
Al2(SO)4: antes	0.94	0.94	0.93	0.92	0.91	0.92	0.925	0.92	0.92
Al2(SO)4: después	0.93	0.93	0.92	0.935	0.91	0.91	0.915	0.92	0.91

a) Antes o durante el llenado de la campana: V's.i

$$V' s.i = V'_i + V'_d$$

V'_i : Velocidad de caída de la interfase lodo- agua

V'_d : Velocidad de desplazamiento del agua

Velocidad de Interfase lodo-agua V'_i = h descenso de agua en decantador / T1

h descenso de agua en decantador h_{d1} = V.aire extraido / A. neta decantador

V.aire extraido Va = Caudal de aire Qa x T1

Caudal de aire extraido Qa = Medido para los valores de hc, por el fabricante

hc: m	Qa: m3/s
0.4	0.55
0.6	0.83
0.8	1.1

Qa = 0.551 m3/s

V.aire extraido = 0.55 m3/s x 30 s = 16.53 m3

h_{d1} = 16.53 m3 / 1069.2 m2 = 0.0155 m

Entonces V'_i = 0.0155 m / 30 s x 3600 = 1.86 m/h

Velocidad de desplazamiento V'_d = V_o / P

Porosidad: P = 1 - C = 0.93 (para FeCl3)

V'_d = 3.75 m/hr / 0.93 = 4.03 m/hr

V' s.i = V'_i + V'_d = (1.86 + 4.03) m/hr = 5.9 m/hr

b) Después de la descarga de agua de la campana: $V''s.i$

$$V''s.i = V''_i + V''_d$$

Velocidad de Interfase lodo-agua $V''_i =$ h descargada de la campana / T2

h descargada de la campana $h_{d2} =$ Volumen agua en la campana / A. neta decantador

$$h_{d2} = 10.112 \text{ m}^3 / 1069.2 \text{ m}^2 = 0.0094 \text{ m}$$

Por lo tanto: $V''_i = 0.0094 \text{ m} / 15 \text{ s} \times 3600 \text{ s} = 2.25 \text{ m/h}$

Velocidad de desplazamiento $V''_d = V''_o / P$

Porosidad: $P = 1 - C = 0.91$ (para FeCl_3)

$$V''_d = 7.14 \text{ m/hr} / 0.91 = 7.84 \text{ m/hr}$$

$$V''s.i = V''_i + V''_d = (2.25 + 7.84) \text{ m/hr} = 10.0 \text{ m/hr}$$

2) Cálculo del Gradiente de Velocidad en el Manto de Lodos del Decantador

2.1. Pérdida de Carga en el Manto de Lodos

$$H_D = 180 L V \nu \frac{(1 - P_o)^2}{g P_o^3 D_f^2} \quad \text{Ec. Pouseuille para la pérdida de carga}$$

Dónde:

H_D	:	pérdida de carga	=	m
L	:	altura de la capa del manto de lodos	=	m
V	:	velocidad de flujo	=	m/s
ν	:	viscosidad cinemática del agua a 16°C	=	m ² /s
P_o	:	porosidad	=	(1 - C)
g	:	aceleración de la gravedad	=	m/s ²
D_f	:	diámetro del floculo	=	m

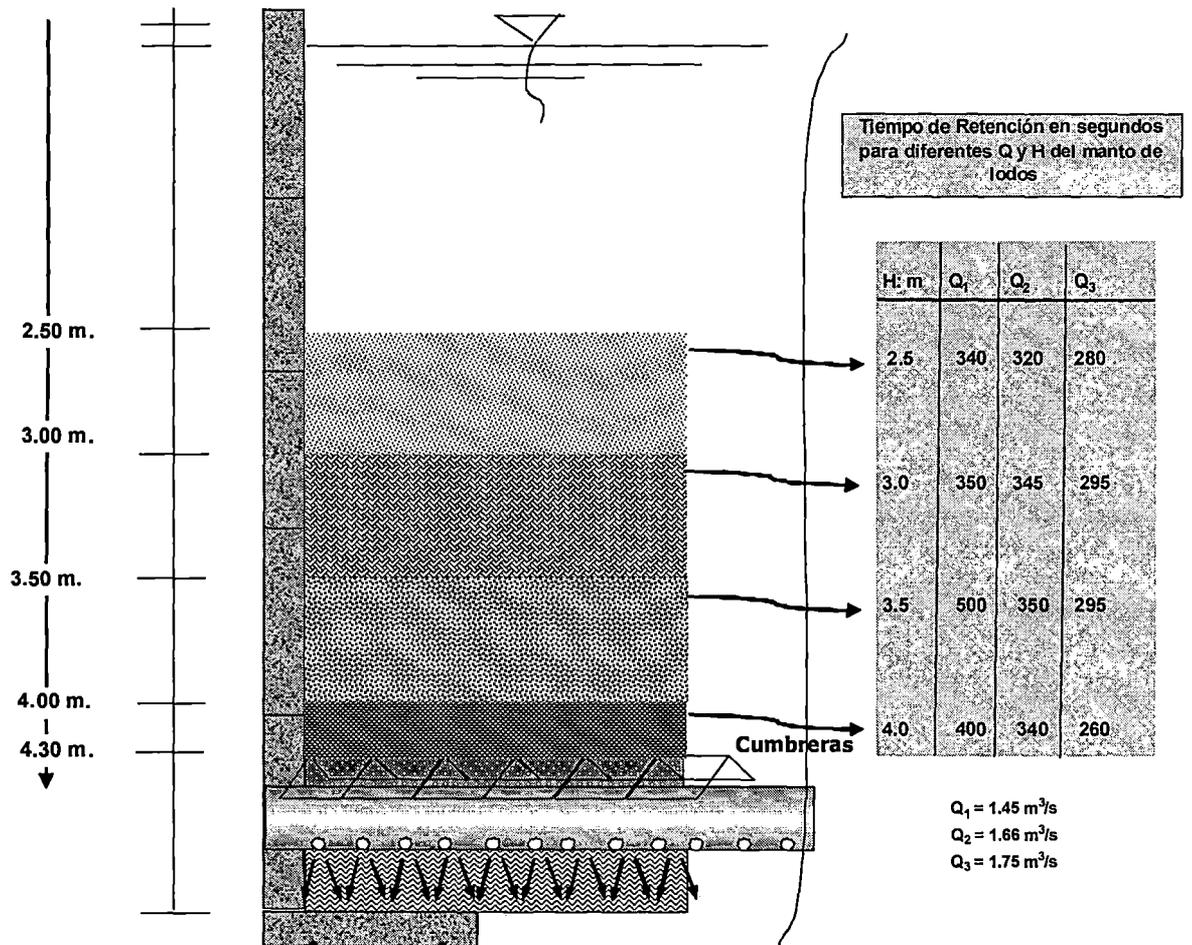
2.2. Gradiente de Velocidad

$$G = \sqrt{[\bar{\gamma} H_D / T_r \mu]} \quad \text{ec. (9)}$$

Dónde:

$\bar{\gamma}$:	peso específico	=	Kg/m^3
H_D	:	pérdida de carga	=	m
μ	:	viscosidad absoluta del agua a 16°C	=	$\text{Kg}\cdot\text{s}/\text{m}^2$
T_r	:	tiempo de retención	=	s

2.3. Gráfico y Pruebas de Trazadores para la definición de los tiempos de retención en el Manto de Lodos



DETERMINACIÓN DE TIEMPO DE RETENCIÓN A DIFERENTES ALTURAS DEL MANTO DE LODOS EN DECANTADOR PULSATOR

Concentración inicial de Cloruro en el agua: $C_0 = 305$ ppm de Cl^-

Concentración de Cloruro en Solución preparada: $C_s = 200,000.00$ ppm de Cl^-

Concentración final de Cloruro en el agua: $C_f =$ ppm de Cl^-

PRUEBA DE TRAZADORES EN DECANTADOR PARA $Q = 1.45$ M³/S

Tiempo		Atiempo	Concentración de Cloruros C_f : ppm Cl^-					Salida del Decantador
minutos	segundos		Profundidad Altura de Manto de Lodos: H					
			4.30 m	4.0 m	3.5 m	3.0 m	2.5 m	
5	300	720 seg	305					
10	600		305					
11	660		305					
11.5	690		310					
	700		310					
	710		330					
12	720	345						
	730	330						
	740	320						
12.5	750	305						
15	900	400 seg		305				
17	1020			305				
17.5	1050			305				
18	1080			320				
	1090			330				
	1100			340				
18.5	1110		345					
	1120		350					
	1130	500 seg.		340				
19	1140			320				
24	1440			310				
26	1560				305			
26.5	1590				310			
	1600				320			
	1610			335				
27	1620			346				
	1630	350 seg.			330			
	1640				310			
27.5	1650					305		
30	1800					305		
32	1920					310		
32.5	1950					322		
	1960				345			
	1970				352			
33	1980	340 seg.				325		
35	2100						310	
37	2220						320	
38	2280						320	
	2290						327	
	2300						345	
38.5	2310					350		
	2320	1440 seg.					330	
	2330						314	
39	2340						310	
59	3540						305	
61	3660						305	
61.5	3690						308	
	3700					328		
	3710					345		
62	3720					348		
	3730					320		
	3740					310		

PRUEBA DE TRAZADORES EN DECANTADOR PARA Q = 1.66 M3/S

Tiempo		Atiempo	Concentración de Cloruros: ppm Cl ⁻					Salida del Decantador	
minutos	segundos		Profundidad Altura de Manto de Lodos: H						
			4.30 m	4.0 m	3.5 m	3.0 m	2.5 m		
5	300	510 seg.	305						
7	420		305						
8	480		305						
	490		310						
	500		330						
8.5	510		350						
	520	340 seg.	325						
	530		310						
9	540				305				
13	780				305				
13.5	810				305				
	830				320				
	840				330				
	845				340				
14.166	850				350				
	860		350 seg.		330				
14.5	870			310					
17	1020					305			
19	1140					310			
19.5	1170					320			
	1190					335			
20	1200	345 seg.				346			
	1210					330			
	1220					310			
20.5	1230						305		
24	1440						305		
25	1500						310		
	1520	320 seg.					322		
	1530							345	
25.75	1545							352	
26	1560							318	
28	1680							308	
30	1800							310	
	1820	955 seg.					310		
	1840							330	
	1855							345	
31.08	1865							350	
	1880							330	
31.5	1890							314	
41.5	2490	955 seg.					308		
46	2760						305		
46.5	2790							305	
	2800							308	
	2810							328	
47	2820							345	
	2830						315		
	2840						305		

PRUEBA DE TRAZADORES EN DECANTADOR PARA Q = 1.75 M3/S

Tiempo		Δtiempo	Concentración de Cloruros: ppm Cl ⁻					Salida del Decantador
minutos	segundos		Profundidad Altura de Manto de Lodos: H					
			4.30 m	4.0 m	3.5 m	3.0 m	2.5 m	
5	300	420 seg	305					
6	360		305					
6.5	390		310					
	400		324					
	410		339					
7	420		350					
	430	260 seg	325					
	440		310					
7.5	450			305				
10	600			305				
10.5	630			305				
11	660			320				
	670		330					
11.33	680		345					
	690	295 seg.	330					
	700		310					
	910				305			
	940				305			
	950				325			
	960				340			
16.25	975			345				
16.5	990	295 seg.			315			
	1000				310			
20	1200					305		
	1230					315		
	1250					330		
21.16	1270					345		
	1280	280 seg.				318		
21.5	1290						308	
24	1440						310	
25	1500						310	
	1515						325	
25.5	1530						335	
25.83	1550					350		
	1880	910 seg.					330	
31.5	1890						314	
41.5	2490						308	
46	2760						305	
46.5	2790							305
	2800							308
	2810						328	
41	2460						345	
	2470						315	
	2480						305	

2.4. Gradientes de velocidad calculados

Los valores de gradiente de velocidad calculados (cuadro 15 y cuadro 16) para el análisis fueron realizados con los valores de tiempo de retención T_r obtenidos por medio de las pruebas de trazadores y los valores de concentración:

Concentración de Lodos para el Sulfato de Aluminio

H: m	$Q_1 = 1.45 \text{ m}^3/\text{s}$			$Q_2 = 1.66 \text{ m}^3/\text{s}$			$Q_3 = 1.75 \text{ m}^3/\text{s}$		
	$h_{c1}: 0.4 \text{ m}$	$h_{c2}: 0.6 \text{ m}$	$h_{c3}: 0.8 \text{ m}$	$h_{c1}: 0.4 \text{ m}$	$h_{c2}: 0.6 \text{ m}$	$h_{c3}: 0.8 \text{ m}$	$h_{c1}: 0.4 \text{ m}$	$h_{c2}: 0.6 \text{ m}$	$h_{c3}: 0.8 \text{ m}$
2.5			6.5		6.1	9			
3		5.5	8.8	4.5	10	11.2	6	8.8	11.9
3.5	8.8	10.2	14.5	9.4	10.9	12.4	10.8	11.7	11.6
4	9.1	12.5	14.7	13.6	13.9	12.8	11.5	13.2	10.2

Concentración de Lodos para el Cloruro Férrico

H: m	$Q_1 = 1.45 \text{ m}^3/\text{s}$			$Q_2 = 1.66 \text{ m}^3/\text{s}$			$Q_3 = 1.75 \text{ m}^3/\text{s}$		
	$h_{c1}: 0.4 \text{ m}$	$h_{c2}: 0.6 \text{ m}$	$h_{c3}: 0.8 \text{ m}$	$h_{c1}: 0.4 \text{ m}$	$h_{c2}: 0.6 \text{ m}$	$h_{c3}: 0.8 \text{ m}$	$h_{c1}: 0.4 \text{ m}$	$h_{c2}: 0.6 \text{ m}$	$h_{c3}: 0.8 \text{ m}$
2.5			8.1	7.5	10.5	14.3	9.8	9.8	10.4
3		7	10.2	9.8	13.4	15.7	13.6	13.2	11.4
3.5	9.3	12.2	17.5	11.9	16.7	19	13.1	15.5	11.9
4	10.5	15.2	18.9	16	18.4	20	16.8	17.7	13.3

2.4.1. Para el Sulfato de Aluminio

Parámetros	Gradiente de Velocidad para $Q = 1.45 \text{ m}^3/\text{s}$									
	$h_c = 0.40 \text{ m}$		$h_c = 0.60 \text{ m}$			$h_c = 0.8 \text{ m}$				
	H: 3.5 m	H: 4.0 m	H: 3.0 m	H: 3.5 m	H: 4.0 m	H: 2.5 m	H: 3.0 m	H: 3.5 m	H: 4.0 m	
C: %	8.8	9.1	5.5	10.2	12.5	6.5	8.8	14.5	14.7	
Caudal m^3/s	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	
L: m	0.5	0.3	0.65	0.5	0.3	0.38	0.5	0.5	0.3	
V_o : m/s	0.00135	0.00135	0.00135	0.00135	0.00135	0.00135	0.00135	0.00135	0.00135	
P_o	0.912	0.909	0.945	0.898	0.875	0.935	0.912	0.855	0.853	
$1 - P_o$	0.088	0.091	0.055	0.102	0.125	0.065	0.088	0.145	0.147	
$(1 - P_o)^2$	0.0077	0.0083	0.003025	0.0104	0.0156	0.0042	0.0077	0.0210	0.0216	
P_o^3	0.759	0.751	0.844	0.724	0.670	0.817	0.759	0.625	0.621	
D_r : mm	0.0005	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0005	0.0005	0.0005	0.0004	
$\text{m}^2/\text{s}: \nu$	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	
H_b : m	0.000565444	0.00057	0.00040	0.00124337	0.00121	0.00022	0.00057	0.00186	0.00181	
T_r : s	500.00	400.00	350.00	500.00	400.00	340.00	350.00	500.00	400.00	
Gama: Kg/m^3	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	
μ : $\text{Kg}\cdot\text{s}/\text{m}^2$	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	
G_v : s^{-1}	3	4	3.2	4.7	5	2.4	3.8	5.7	6.3	

Parámetros	Gradiente de Velocidad para Q=1.66 m ³ /s										
	hc=0.40 m			hc=0.60 m				hc=0.8 m			
	H:3.0 m	H:3.5 m	H:4.0 m	H:2.5 m	H:3.0 m	H:3.5 m	H:4.0 m	H:2.5 m	H:3.0 m	H:3.5 m	H:4.0 m
C: %	4.5	9.4	13.6	6.1	10	10.9	13.9	9	11.2	12.4	12.8
Caudal m ³ /s	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66
L: m	0.5	0.5	0.3	0.5	0.5	0.5	0.3	0.5	0.5	0.5	0.3
V ₀ : m/s	0.00155	0.00155	0.00155	0.00155	0.00155	0.00155	0.00155	0.00155	0.00155	0.00155	0.00155
P ₀	0.955	0.906	0.854	0.939	0.9	0.891	0.861	0.91	0.888	0.876	0.872
1-P ₀	0.045	0.094	0.136	0.061	0.1	0.109	0.139	0.09	0.112	0.124	0.128
(1-P ₀) ²	0.0020	0.0088	0.0185	0.0037	0.01	0.0119	0.0193	0.0081	0.0125	0.0154	0.0164
P ₀ ³	0.871	0.744	0.645	0.823	0.729	0.707	0.638	0.754	0.700	0.672	0.663
D _r : mm	0.0005	0.0005	0.0005	0.0004	0.00055	0.0005	0.0004	0.0005	0.0006	0.0005	0.0004
m ² /s: ν	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06
H _b : m	0.00014785	0.00055576	0.00109	0.00045	0.00072	0.001068137	0.00180	0.00068	0.00079	0.00145	0.00147
T _r : s	345.00	350.00	340.00	320.00	345.00	350.00	340.00	320.00	345.00	350.00	340.00
Gama: Kg/m ³	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
μ: Kg·s/m ²	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04
G _r : s ⁻¹	2	4.4	5.3	3.5	4.3	5.18	6.83	4.3	4.5	6.0	6.2

Parámetros	Gradiente de Velocidad para Q=1.75 m ³ /s								
	hc=0.40 m			hc=0.60 m			hc=0.80 m		
	H:3.0 m	H:3.5 m	H:4.0 m	H:3.20 m	H:3.5 m	H:4.0 m	H:3.30 m	H:3.5 m	H:4.0 m
C: %	6	10.8	11.5	8.8	11.7	13.2	11.9	11.6	10.2
Caudal m ³ /s	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75
L: m	0.5	0.5	0.3	0.3	0.5	0.3	0.2	0.5	0.3
V ₀ : m/s	0.00164	0.00164	0.00164	0.00164	0.00164	0.00164	0.00164	0.00164	0.00164
P ₀	0.94	0.892	0.885	0.912	0.883	0.868	0.881	0.884	0.898
1-P ₀	0.06	0.108	0.115	0.088	0.117	0.132	0.119	0.116	0.102
(1-P ₀) ²	0.0036	0.0117	0.0132	0.007744	0.0137	0.0174	0.0142	0.0135	0.0104
P ₀ ³	0.831	0.710	0.693	0.759	0.688	0.654	0.684	0.691	0.724
D _r : mm	0.0005	0.0005	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0005	0.0004
m ² /s: ν	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06
H _b : m	0.000291634	0.001105789	0.00120	0.00064	0.002090397	0.00168	0.00087	0.00131	0.00091
T _r : s	295.00	295.00	260.00	295.00	295.00	260.00	295.00	295.00	260.00
Gama: Kg/m ³	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
μ: Kg·s/m ²	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04
G _r : s ⁻¹	2.95	5.74	6.4	4.4	7.9	7.5	5.1	6	5.5

2.4.2. Para el Cloruro Férrico

Parámetros	Gradiente de Velocidad para $Q=1.45 \text{ m}^3/\text{s}$								
	$hc=0.40 \text{ m}$		$hc=0.60 \text{ m}$			$hc=0.8 \text{ m}$			
	H=3.5m	H=4.0m	H=3.0m	H=3.5m	H=4.0m	H=2.5m	H=3.0m	H=3.5m	H=4.0m
C: %	9.3	10.5	7	12.2	15.2	8.1	10.2	17.5	18.9
Caudal m^3/s	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45
L: m	0.5	0.3	0.7	0.5	0.3	0.5	0.5	0.5	0.3
V_o : m/s	0.00135	0.00135	0.00135	0.00135	0.00135	0.00135	0.00135	0.00135	0.00135
P_o	0.907	0.895	0.93	0.878	0.848	0.919	0.898	0.825	0.811
$1-P_o$	0.093	0.105	0.07	0.122	0.152	0.081	0.102	0.175	0.189
$(1-P_o)^2$	0.0086	0.0110	0.0049	0.0149	0.0231	0.0066	0.0104	0.0306	0.0357
P_o^3	0.746	0.717	0.804	0.677	0.610	0.776	0.724	0.562	0.533
D_f : mm	0.0004	0.00035	0.0005	0.0005	0.00045	0.0006	0.0006	0.0005	0.00045
m^2/s : ν	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06
H_o : m	0.001003167	0.00104	0.00047	0.001217994	0.00155	0.00033	0.00055	0.00302	0.00275
T_f : s	500.00	400.00	350.00	500.00	400.00	340.00	350.00	500.00	400.00
Gama: Kg/m^3	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
μ : $\text{Kg}\cdot\text{s}/\text{m}^2$	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04
G_v : s^{-1}	4.2	4.8	3.4	4.6	5.8	2.9	3.7	7.3	7.8

Parámetros	Gradiente de Velocidad para $Q=1.66 \text{ m}^3/\text{s}$											
	$hc=0.40 \text{ m}$				$hc=0.60 \text{ m}$				$hc=0.8 \text{ m}$			
	H=2.5m	H=3.0m	H=3.5m	H=4.0m	H=2.5m	H=3.0m	H=3.5m	H=4.0m	H=2.5m	H=3.0m	H=3.5m	H=4.0m
C: %	7.5	9.8	11.9	16	10.5	13.4	16.7	18.4	14.3	15.7	19	20
Caudal m^3/s	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66
L: m	0.5	0.5	0.5	0.3	0.5	0.5	0.5	0.3	0.5	0.5	0.5	0.3
V_o : m/s	0.00155	0.00155	0.00155	0.00155	0.00155	0.00155	0.00155	0.00155	0.00155	0.00155	0.00155	0.00155
P_o	0.925	0.92	0.881	0.84	0.885	0.866	0.833	0.816	0.857	0.843	0.81	0.8
$1-P_o$	0.075	0.08	0.119	0.16	0.105	0.134	0.167	0.184	0.143	0.157	0.19	0.2
$(1-P_o)^2$	0.0056	0.0066	0.0142	0.0256	0.0110	0.017955	0.0279	0.0339	0.0204	0.0246	0.0361	0.0400
P_o^3	0.791	0.734	0.684	0.588	0.717	0.649	0.578	0.543	0.629	0.589	0.531	0.512
D_f : mm	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0007	0.0007	0.0007	0.00055
m^2/s : ν	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06
H_o : m	0.000451864	0.000332223	0.001316952	0.00165	0.00058	0.00122	0.002130799	0.00238	0.00105	0.00133	0.00220	0.00216
T_f : s	320.00	345.00	350.00	340.00	320.00	345.00	350.00	340.00	320.00	345.00	350.00	340.00
Gama: Kg/m^3	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
μ : $\text{Kg}\cdot\text{s}/\text{m}^2$	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04
G_v : s^{-1}	35	46	58	6.5	43	56	73	78	54	58	74	80

Parámetros	Gradiente de Velocidad para $Q=1.75 \text{ m}^3/\text{s}$											
	$h_c=0.40 \text{ m}$				$h_c=0.60 \text{ m}$				$h_c=0.8 \text{ m}$			
	H=2.5m	H=3.0m	H=3.5m	H=4.0m	H=2.5m	H=3.0m	H=3.5m	H=4.0m	H=2.5m	H=3.0m	H=3.5m	H=4.0m
C: %	9.8	13.6	13.1	16.8	9.8	13.2	15.5	17.7	10.4	11.4	11.9	13.3
Caudal m^3/s	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75
L: m	0.5	0.5	0.5	0.3	0.55	0.55	0.5	0.3	0.38	0.5	0.5	0.3
V_o : m/s	0.00164	0.00164	0.00164	0.00164	0.00164	0.00164	0.00164	0.00164	0.00164	0.00164	0.00164	0.00164
P_o	0.902	0.864	0.869	0.832	0.902	0.868	0.845	0.823	0.896	0.886	0.881	0.867
$1-P_o$	0.098	0.136	0.131	0.168	0.098	0.132	0.155	0.177	0.104	0.114	0.119	0.133
$(1-P_o)^2$	0.0096	0.0185	0.0172	0.0282	0.009604	0.017424	0.0240	0.0313	0.0108	0.0130	0.0142	0.0177
P_o^3	0.734	0.645	0.656	0.576	0.734	0.654	0.603	0.557	0.719	0.696	0.684	0.652
D_i : mm	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.00045	0.00045	0.0005	0.0004
n : s ν	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06	1.12E-06
H_p : m	0.00061149	0.00133964	0.001799653	0.00198	0.00067	0.00137	0.001860587	0.00198	0.00095	0.00155	0.00139	0.00171
T_r : s	280.00	305.00	290.00	280.00	280.00	305.00	290.00	280.00	280.00	305.00	290.00	280.00
Gama: Kg/m^3	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
μ : $\text{Kg}/\text{s}/\text{m}^2$	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04	1.138E-04
G_r : s^{-1}	4	6.2	7.3	8.2	4.6	6.3	7.5	7.3	5.5	6.7	6.5	7.6

ANEXO 3
TURBIEDAD

1) CUADROS DE TURBIEDAD DEL COAGULANTE CLORURO FÉRRICO

% REMOCIÓN DE TURBIEDAD - $Q_1 = 1,45 \text{ m}^3/\text{s}$							
Turbiedad de Entrada NTU	Grupo de Control		Grupo Experimental				
	hc1 = 0.4 m		hc2 = 0.6 m		hc3 = 0.8 m		
	Turb. Decantada NTU	% Remoción	Turb. Decantada NTU	% Remoción	Turb. Decantada NTU	% Remoción	
21	7	66.67	6.6	68.57	5.7	72.86	
23	7	69.57	6.8	70.43	5.8	74.78	
24	6.8	71.67	6.8	71.67	5.8	75.83	
24	6.8	71.67	6.5	72.92	5.6	76.67	
23	6.9	70.00	6.4	72.17	5.7	75.22	
23	6.9	70.00	6.5	71.74	5.6	75.65	
23	7	69.57	7	69.57	5.6	75.65	
21	7	66.67	7	66.67	5.8	72.38	
21	7.3	65.24	6.8	67.62	5.7	72.86	
20	7.3	63.50	6.5	67.50	5.8	71.00	
23	7	69.57	6.8	70.43	6.2	73.04	
23	7	69.57	7	69.57	6.4	72.17	
22	6.7	69.55	6.7	69.55	6.4	70.91	
23	7	69.57	6.7	70.87	6.3	72.61	
22	7	68.18	6.8	69.09	6.5	70.45	
21	6.8	67.62	6.5	69.05	6.5	69.05	
Máximo	24	7.3	71.67	7	72.92	6.5	76.67
Mínimo	20	6.7	63.50	6.4	66.67	5.6	69.05
Promedio	22	7.0	68.66	6.7	69.84	6.0	73.20

% REMOCIÓN DE TURBIEDAD - $Q_2 = 1,66 \text{ m}^3/\text{s}$							
Turbiedad de Entrada NTU	Grupo de Control		Grupo Experimental				
	hc1 = 0.4 m		hc2 = 0.6 m		hc3 = 0.8 m		
	Turb. Decantada NTU	% Remoción	Turb. Decantada NTU	% Remoción	Turb. Decantada NTU	% Remoción	
21	4.8	77.14	3.4	83.81	4.8	77.14	
23	4.5	80.43	3.6	84.35	4.8	79.13	
24	4.5	81.25	3.6	85.00	4.6	80.83	
24	4.5	81.25	3.5	85.42	4.2	82.50	
23	4.3	81.30	3.2	86.09	4.0	82.61	
23	4.5	80.43	3.4	85.22	4.5	80.43	
23	4.2	81.74	3.3	85.65	4.0	82.61	
21	4.8	77.14	3.0	85.71	4	80.95	
21	4.8	77.14	3.2	84.76	4.2	80.00	
20	4.6	77.00	3.3	83.50	4.3	78.50	
23	4.6	80.00	3.0	86.96	4.5	80.43	
23	4.4	80.87	3.3	85.65	4.5	80.43	
22	4.5	79.55	3.2	85.45	4.6	79.09	
23	4.4	80.87	3.4	85.22	4.7	79.57	
22	4.3	80.45	3.3	85.00	4.7	78.64	
21	4.3	79.52	3.5	83.33	4.4	79.05	
Máximo	24	4.8	81.74	3.6	86.96	4.8	82.61
Mínimo	20	4.2	77.00	3	83.33	4	77.1
Promedio	22	4.5	79.76	3.3	85.07	4.4	80.1

% REMOCIÓN DE TURBIEDAD - $Q_3 = 1,75 \text{ m}^3/\text{s}$							
Turbiedad de Entrada NTU	Grupo de Control		Grupo Experimental				
	hc1 = 0.4 m		hc2 = 0.6 m		hc3 = 0.8 m		
	Turb. Decantada NTU	% Remoción	Turb. Decantada NTU	% Remoción	Turb. Decantada NTU	% Remoción	
21	5.5	73.81	6.5	69.05	6.7	68.10	
23	5.6	75.65	6.5	71.74	6.7	70.87	
24	5.4	77.50	6.3	73.75	6.8	71.67	
24	5.5	77.08	6.3	73.75	6.8	71.67	
23	5.2	77.39	6.4	72.17	6.6	71.30	
23	5.3	76.96	6.4	72.17	6.6	71.30	
23	5.3	76.96	6.5	71.74	6.9	70.00	
21	5.5	73.81	6.5	69.05	6.9	67.14	
21	5.7	72.86	6.3	70.00	6.8	67.62	
20	5.4	73.00	6.3	68.50	6.5	67.50	
23	5.6	75.65	6.6	71.30	6.5	71.74	
23	5.6	75.65	6.6	71.30	6.7	70.87	
22	5.8	73.64	6.5	70.45	6.8	69.09	
23	5.9	74.35	6.3	72.61	6.6	71.30	
22	5.8	73.64	6.3	71.36	6.6	70.00	
21	5.7	72.86	6.2	70.48	6.8	67.62	
Máximo	24	5.9	77.50	6.6	73.75	6.9	71.74
Mínimo	20	5.2	72.86	6.2	68.50	6.5	67.14
Promedio	22	5.6	75.05	6.4	71.21	6.7	69.86

2) DATOS DE TURBIEDAD DEL COAGULANTE SULFATO DE ALUMINIO

% REMOCIÓN DE TURBIEDAD - Q1 = 1,45 m ³ /s							
Turbiedad de Entrada NTU	Grupo de Control		Grupo Experimental				
	hc1 = 0.4 m		hc2 = 0.6 m		hc3 = 0.8 m		
	Turb. Decantada NTU	% Remoción	Turb. Decantada NTU	% Remoción	Turb. Decantada NTU	% Remoción	
21	8.5	59.52	6.9	67.14	5.9	71.90	
23	8.5	63.04	7.0	69.57	6.3	72.61	
24	8.7	63.75	7.4	69.17	6.3	73.75	
24	8.6	64.17	7.5	68.75	6.4	73.33	
23	8.8	61.74	7.7	66.52	6.2	73.04	
23	8.3	63.91	7.8	66.09	6.4	72.17	
23	8.6	62.61	7.7	66.52	6.1	73.48	
21	8.6	59.05	7.6	63.81	6.4	69.52	
21	8.7	58.57	7.5	64.29	6.2	70.48	
20	8.8	56.00	7.4	63.00	6.2	69.00	
23	8.6	62.61	7.5	67.39	6.4	72.17	
23	8.8	61.74	7.6	66.96	5.9	74.35	
22	8.7	60.45	7.8	64.55	6.2	71.82	
23	8.5	63.04	7.6	66.96	5.8	74.78	
22	8.6	60.91	7.5	65.91	5.8	73.64	
21	8.8	58.10	7.4	64.76	5.9	71.90	
Máximo	24	8.8	64.17	7.8	69.57	6.4	74.78
Mínimo	20	8.3	56.00	6.9	63.00	5.8	69.00
Promedio	22	8.6	61.20	7.5	66.34	6.2	72.37

% REMOCIÓN DE TURBIEDAD - Q2 = 1,66 m3/s							
Turbiedad de Entrada NTU	Grupo de Control		Grupo Experimental				
	hc1 = 0.4 m		hc2 = 0.6 m		hc3 = 0.8 m		
	Turb. Decantada NTU	% Remoción	Turb. Decantada NTU	% Remoción	Turb. Decantada NTU	% Remoción	
21	4.8	77.14	4.1	80.48	4.9	76.67	
23	4.8	79.13	4.2	81.74	4.8	79.13	
24	5	79.17	4	83.33	4.8	80.00	
24	4.8	80.00	4.2	82.50	4.9	79.58	
23	4.9	78.70	4.3	81.30	4.7	79.57	
23	5.3	76.96	4.1	82.17	4.8	79.13	
23	5.3	76.96	4.3	81.30	4.9	78.70	
21	5.2	75.24	4.4	79.05	4.9	76.67	
21	5.2	75.24	4.2	80.00	5	76.19	
20	5.2	74.00	4.1	79.50	5	75.00	
23	5.1	77.83	4.1	82.17	5.3	76.96	
23	5.1	77.83	4.2	81.74	4.9	78.70	
22	4.8	78.18	4.3	80.45	4.9	77.73	
23	4.8	79.13	4.3	81.30	4.8	79.13	
22	4.9	77.73	4.1	81.36	4.8	78.18	
21	4.9	76.67	3.9	81.43	4.9	76.67	
Máximo	24	5.3	80	4.4	83.33	5.3	80.00
Mínimo	20	4.8	74	3.9	79.05	4.7	75.00
Promedio	22	5.0	77.49	4.2	81.24	4.9	78.00

% REMOCIÓN DE TURBIEDAD - Q3 = 1,75 m ³ /s							
Turbiedad de Entrada NTU	Grupo de Control		Grupo Experimental				
	hc1 = 0.4 m		hc2 = 0.6 m		hc3 = 0.8 m		
	Turb. Decantada NTU	% Remoción	Turb. Decantada NTU	% Remoción	Turb. Decantada NTU	% Remoción	
21	6.2	70.48	7.8	62.86	8.5	59.52	
23	6.3	72.61	7.6	66.96	8.4	63.48	
24	6	75.00	7.9	67.08	8.3	65.42	
24	6.1	74.58	7.7	67.92	8.6	64.17	
23	6.0	73.91	7.5	67.39	8.4	63.48	
23	6.2	73.04	7.5	67.39	8.4	63.48	
23	6.2	73.04	7.6	66.96	8.7	62.17	
21	6.2	70.48	7.4	64.76	8.6	59.05	
21	6	71.43	7.4	64.76	8.8	58.10	
20	6.1	69.50	7.4	63.00	8.6	57.00	
23	6.2	73.04	7.3	68.26	8.5	63.04	
23	6.3	72.61	7.5	67.39	8.2	64.35	
22	6.1	72.27	7.4	66.36	8	63.64	
23	6.1	73.48	7.3	68.26	8	65.22	
22	6.3	71.36	7.2	67.27	7.8	64.55	
21	6.4	69.52	7.1	66.19	7.8	62.86	
Máximo	24	6.4	75.00	7.9	68.26	8.8	65.42
Mínimo	20	6	69.50	7.1	62.86	7.8	57.00
Promedio	22	6.2	72.27	7.5	66.4	8.4	62.47

ANEXO 4

TABLA DE VALORES F PARA UN NIVEL DE CONFIANZA DE 95%

TABLA DE VALORES F PARA UN NIVEL DE SEGURIDAD (NIVEL DE CONFIANZA) DE 95%

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	161.4	199.5	215.7	224.8	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	243.9	245.9	248.0	249.7	250.1	251.1	252.2	253.3	254.3
2	18.51	19.80	19.18	19.29	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41	19.43	19.45	19.45	19.46	19.47	19.48	19.48	19.50
3	10.13	9.58	9.28	9.12	9.04	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.68	8.64	8.62	8.59	8.57	8.56	8.53
4	7.71	6.94	6.59	6.38	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.88	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.63
5	6.61	5.78	5.41	5.19	5.06	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.69	4.66	4.58	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40	4.36
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67
7	5.69	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23
8	5.52	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75	2.71
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45	2.40
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.43	2.38	2.34	2.30
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.45	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.38	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18	2.13
15	4.54	3.68	3.28	3.05	2.90	2.79	2.71	2.64	2.58	2.54	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11	2.07
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28	2.24	2.20	2.15	2.10	2.06	2.01
17	4.45	3.59	3.20	2.97	2.81	2.70	2.62	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23	2.20	2.15	2.10	2.05	2.01	1.96
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.00	1.97	1.92
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.96	1.93	1.88
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.12	2.09	2.04	1.99	1.95	1.90	1.84
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87	1.81
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.78
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81	1.76
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.35	2.30	2.25	2.18	2.11	2.03	1.99	1.94	1.89	1.84	1.79	1.73
25	4.24	3.38	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.58	2.47	2.38	2.32	2.27	2.22	2.15	2.07	1.99	1.95	1.90	1.85	1.80	1.75	1.69
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.13	2.06	1.97	1.93	1.88	1.84	1.79	1.73	1.67
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.55	2.44	2.35	2.29	2.24	2.19	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.71	1.65
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.54	2.43	2.34	2.28	2.22	2.18	2.10	2.03	1.94	1.90	1.85	1.81	1.75	1.70	1.64
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.60	1.53	1.47	1.39
100	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.17	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.50	1.43	1.35	1.25
∞	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.75	1.67	1.57	1.52	1.46	1.39	1.32	1.22	1.00