

01177

3



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MEXICO**

UNIVERSIDAD NACIONAL.  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

CAMPUS MORELOS

**EQUIPO FLOCULADOR ACCIONADO  
CON AIRE**

289-197

**T E S I S**

QUE COMO REQUISITO PARA  
OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRA EN INGENIERIA  
(AMBIENTAL)**

PRESENTA:

**IVALU BEUTELSPACHER SANTIAGO**



JIUTEPEC, MORELOS

FEBRERO DEL 2001



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## **DEDICATORIA**

A DIOS.

A MIS PADRES:

Sr. José Pablo Beutelspacher Rest ( Q.E.P.D. )

Sra. Sofia Santiago López.

Con respeto y gratitud.

A MI HERMANO Erwin.

A ROMMEL de J. M. C. con todo mi amor.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

A mi director de tesis M.I. Luciano Sandoval Yoval, por su iniciativa y entusiasmo en la realización de este trabajo.

A las M.I. Francisca Soler Anguiano y María de Lourdes Rivera Huerta, al Dr. Germán Buitrón Méndez y al M.I. Antonio Ramírez González por haber aceptado revisar este trabajo.

A los M.I. Martín Piña Soberanis e Isidro Robles López por su apoyo y colaboración.

Al personal de la subcoordinación de potabilización del IMTA y de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, Campus Morelos.

A mis compañeros de la maestría, por sus valiosos comentarios y sugerencias.

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
Objetivos específicos	2
1. MARCO TEÓRICO	3
1.1 Coagulación	3
1.1.1 Teoría básica	3
1.1.2 Mezcladores	6
1.1.3 Dosis óptima de coagulante	7
1.2 Floculación	8
1.2.1 Factores que influyen en la floculación	8
1.2.2 Parámetros operacionales	10
1.2.3 Tipos de floculadores	12
1.3 Dispositivo para aireación/circulación	16
1.3.1 Funcionamiento	17
1.3.2 Bases de diseño	18
1.4 Diseño experimental	18
1.4.1 Directrices para el diseño de experimentos	20
1.4.2 Diseño factorial 2 <sup>K</sup>	22
2. METODOLOGÍA	24
2.1 Diseño del equipo	25
2.2 Construcción	28
2.3 Prueba de funcionalidad	28
2.4 Pruebas de floculación	28
2.5 Pruebas del diseño experimental	29
2.6 Evaluación de la influencia de variables	32
2.7 Obtención de las condiciones óptimas de operación	32
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
3.1 Equipo floculador	33
3.1.1 Equipo 1	33

3.1.2	Equipo 2	35
3.1.3	Equipo 3	37
3.1.4	Equipo 4	40
3.2	Pruebas experimentales	43
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	51
5.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
	ANEXO I. Diseño del equipo 4	54
	ANEXO II. Dosis óptima de sulfato de aluminio para turbiedades de 20 y 70 UTN	59
	ANEXO III. Comprobación de la idoneidad del modelo	60
III.1	Suposición de normalidad	62
III.2	Suposición de independencia	63
III.3	Prueba estadística para igualdad de variancia	64

## TABLAS

Tabla 1.1 Clasificación de las unidades de mezcla rápida	7
Tabla 2.1 Niveles de los factores	30
Tabla 2.2 Casos del diseño factorial $2^4$ con 4 puntos centrales	31
Tabla 3.1 Gradientes de velocidad en el equipo 3	37
Tabla 3.2 Prueba de floculación efectuada con el equipo 3	39
Tabla 3.3 Gradientes de velocidad en el equipo 4	40
Tabla 3.4 Prueba de floculación efectuada con el equipo 4	42
Tabla 3.5 Porcentajes de remoción obtenidos para los casos del diseño experimental	43
Tabla 3.6 Análisis de variancia	44
Tabla 3.7 Estimación de los efectos	45
Tabla 3.8 Efectos ordenados	46
Tabla 3.9 Condiciones óptimas de operación del equipo floculador accionado con aire	50
Tabla I.1 Cálculo del tiempo entre la salida de una y otra burbuja	55
Tabla I.2 Cálculo del gasto de agua desplazada	55
Tabla I.3 Cálculo de los gradientes de velocidad	56
Tabla I.4 Cálculo de los gastos de operación	57
Tabla I.5 Cálculo de los gradientes de velocidad de operación	58
Tabla II.1 Determinación de la dosis óptima de sulfato para 20 UTN	59
Tabla II.2 Determinación de la dosis óptima de sulfato para 70 UTN	59
Tabla III.1 Coeficientes de regresión	60
Tabla III.2 Comparación entre la remoción observada y las esperadas	61
Tabla III.3 Residuos ordenados	62
Tabla III.4 Análisis de igualdad de variancia (Prueba de Bartlett)	65

## FIGURAS

Figura 1.1 Distribución de tamaños de las partículas en el agua	3
Figura 1.2 Forma de visualizar la doble capa	5
Figura 1.3 Coagulación	6
Figura 1.4 Floculadores hidráulicos	12
Figura 1.5 Floculadores mecánicos de paletas	15
Figura 1.6 Dispositivo para aireación/circulación del agua	16
Figura 1.7 Funcionamiento del dispositivo	17
Figura 1.8 Modelo general de un proceso o sistema	19
Figura 2.1 Metodología de investigación	24
Figura 2.2 Principio de funcionamiento del equipo floculador	25
Figura 3.1 Equipo 1	34
Figura 3.2 Equipo 2	36
Figura 3.3 Equipo 3	38
Figura 3.4 Equipo 4	41
Figura I.1 Dimensiones de la cámara de aire del equipo floculador	54

## GRÁFICAS

Gráfica 1.1 Viscosidad dinámica del agua a la presión atmosférica al nivel del mar	11
Gráfica 3.1 Efectos ordenados	46
Gráfica 3.2 Remoción promedio obtenida con respecto a la variable 1	47
Gráfica 3.3 Remoción promedio obtenida con respecto a la variable 2	47
Gráfica 3.4 Remoción promedio obtenida con respecto a la variable 3	48
Gráfica 3.5 Remoción promedio obtenida con respecto a la variable 4	48
Gráfica 3.6 Superficie de respuesta (Tiempo de floculación-Dosis de sulfato)	49
Gráfica 3.7 Superficie de respuesta (Gasto de aire-Turbiedad)	50
Gráfica I.1 Gasto de aire contra tiempo entre burbujas	57
Gráfica III.1 Probabilidad normal de los residuos	63
Gráfica III.2 Residuos contra tiempo	64

## RESUMEN

La coagulación – floculación es un proceso básico en el tratamiento de clarificación ya que contribuye en gran medida a la obtención de buenas eficiencias de remoción de la turbiedad inicial del agua. Los floculadores pueden ser mecánicos o hidráulicos, los mecánicos tienen la desventaja de requerir un mantenimiento periódico tanto en los motores como en los agitadores, mientras que los hidráulicos no tienen flexibilidad para variar el gradiente de velocidad.

En este trabajo de investigación se planteó el diseño de un equipo floculador accionado con aire, cuyas ventajas son que no tiene partes mecánicas que requieran de un mantenimiento tan frecuente y que el gradiente de velocidad puede variarse mediante el gasto de aire que se inyecte al equipo. Se tomó como base para el diseño el principio de funcionamiento del dispositivo para la aireación/circulación del agua de lagos y embalses eutroficados<sup>14</sup>.

El trabajo constó de las etapas de diseño del equipo, construcción y pruebas de funcionalidad y floculación hasta que el diseño se ajustó a lo requerido para lograr la floculación. Una vez obtenido el equipo adecuado, se realizaron pruebas para evaluar la influencia de las variables que intervienen en el proceso de coagulación-floculación y se establecieron las condiciones óptimas de operación que alcanzan la eficiencia máxima de remoción de turbiedad.

Los resultados obtenidos permiten concluir que el proceso de floculación se puede realizar empleando el equipo floculador accionado con aire, logrando eficiencias de remoción, bajo condiciones óptimas, del 82%. Encontrándose además que las variables que afectaron mayormente la eficiencia de remoción fueron la turbiedad inicial del agua y el gasto de aire en ese orden de importancia.

## INTRODUCCIÓN

Las condiciones de operación de una planta clarificadora están determinadas en gran parte por el proceso básico de la coagulación – floculación, ya que éste contribuye significativamente a la remoción de los sólidos suspendidos que causan la turbiedad del agua y que finalmente repercute en la calidad que se obtenga de la misma.

La floculación es un proceso físico en el que las pequeñas partículas desestabilizadas durante la coagulación se agregan o aglomeran para formar partículas de tamaño, densidad y dureza adecuados que sean fácilmente removidas por sedimentación.

Para que la aglomeración de las partículas (formación del floc o flóculo) se lleve a cabo, es necesaria la ocurrencia de contactos o colisiones entre las mismas, esto se logra al producir una agitación lenta en el agua.

Según el tipo de energía usada para producir la agitación, los floculadores pueden ser mecánicos o hidráulicos. Los floculadores mecánicos son aquellos que requieren de una fuente de energía externa que mueva un agitador y los hidráulicos son los que utilizan la energía hidráulica disponible a través de una pérdida de carga.

Ambos tipos de floculadores poseen desventajas, los mecánicos demandan un mantenimiento periódico tanto en los motores como en los agitadores y los hidráulicos no tienen flexibilidad para variar el gradiente de velocidad.

Debido a que el proceso de floculación es una etapa del tratamiento del agua que reviste una importancia considerable, este trabajo de investigación tiene como objetivo general diseñar un equipo floculador que utilice aire para su funcionamiento. La ventaja de este diseño es que el equipo no tiene partes mecánicas que requieran de un mantenimiento tan frecuente, además de que el gradiente de velocidad puede variarse mediante el gasto de aire que se inyecte al equipo.

### **Objetivos específicos**

- Diseñar un equipo que mediante la emisión intermitente de una burbuja de aire genere en el agua el gradiente de velocidad requerido para realizar la floculación.
- Evaluar la influencia de las variables que intervienen en el proceso de floculación.
- Establecer las condiciones óptimas de operación que permiten obtener la eficiencia máxima de remoción de turbiedad.

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1 Coagulación

#### 1.1.1 Teoría básica

Las aguas superficiales contienen material suspendido, tanto sólidos que pueden sedimentar fácilmente (partículas lo bastante grandes que sedimentan en reposo) como sólidos que no se remueven con facilidad. Una parte considerable de estos sólidos que no se eliminan pueden ser coloides<sup>1</sup>.

No hay límites definidos de tamaño para las partículas coloidales pero, por lo general, se considera que tienen una dimensión entre 1 y 1000 milimicrones. Los límites mostrados en la Figura 1.1 son aproximados, ya que el tamaño y la naturaleza del material son los que determinan si la partícula es coloidal.

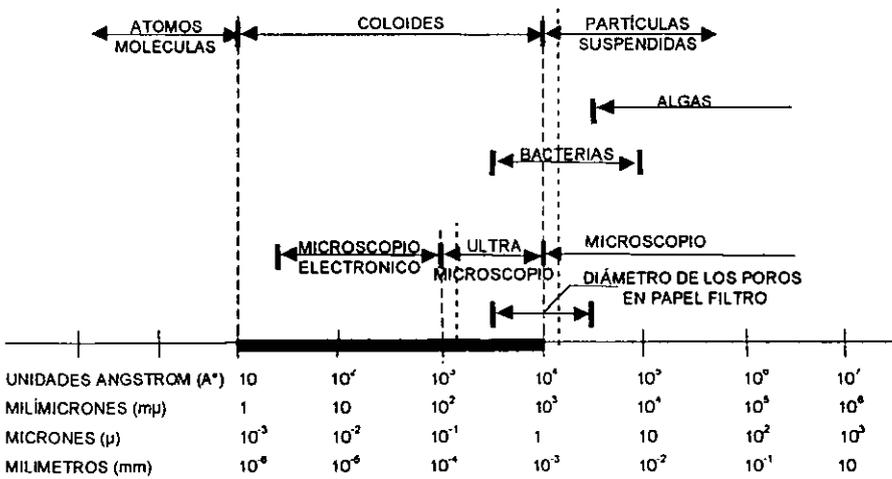


Figura 1.1 Distribución de tamaños de las partículas en el agua

Por su tamaño microscópico, las fuerzas de unión en la superficie del coloide y el líquido son las que determinan su comportamiento.

Uno de los mayores efectos de la superficie son los fenómenos electrocinéticos. Cada coloide tiene una carga eléctrica que suele ser de naturaleza negativa, aunque también puede ser positiva.

Estas cargas producen fuerzas de repulsión electrostática entre los coloides vecinos. Si la carga es lo suficientemente elevada los coloides permanecerán discretos, dispersos y en suspensión. Reduciendo o eliminando estas cargas se obtiene el efecto opuesto<sup>3</sup>.

Se usa el modelo de la doble capa para visualizar la atmósfera iónica en la proximidad del coloide cargado y para explicar como actúan las fuerzas eléctricas de repulsión. Es posible entender este modelo como una secuencia de etapas que ocurren alrededor de un solo coloide negativo, si los iones que neutralizan sus cargas se quitan repentinamente.

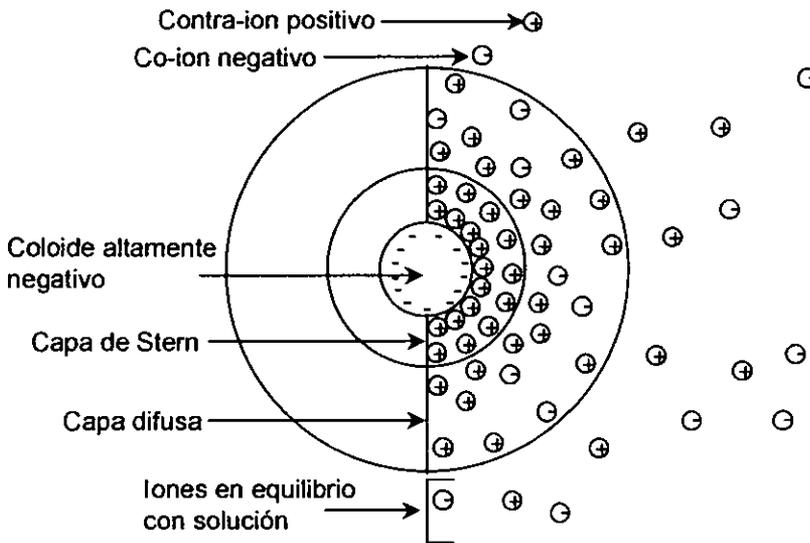
Véase primero el efecto del coloide sobre el ion positivo (llamado contra-ion) en la solución. Inicialmente, la atracción del coloide negativo hace que algunos iones positivos formen una rígida capa adyacente alrededor de la superficie del coloide; esta capa de contra-iones es conocida como la capa de Stern (Figura 1.2).

Otros iones positivos adicionales son todavía atraídos por el coloide negativo, pero éstos son ahora rechazados por la capa de Stern, así como por los iones positivos que intentan acercarse al coloide. Este equilibrio dinámico resulta en la formación de una capa difusa de contra-iones. Los contra-iones tienen una alta concentración cerca de la superficie, la cual disminuye gradualmente con la distancia, hasta que se logra un equilibrio con la concentración de los contra-iones en el seno del líquido.

En forma similar, aunque opuesta, en la capa difusa hay un déficit de iones negativos, llamados co-iones pues tienen la misma carga que el coloide. Su concentración se incrementa gradualmente al alejarse del coloide, mientras que las fuerzas repulsivas del coloide son compensadas por los iones positivos, hasta

alcanzar nuevamente el equilibrio. La capa difusa puede ser visualizada como una atmósfera cargada rodeando al coloide. A cualquier distancia de la superficie, la densidad de carga es igual a la diferencia de concentración entre iones positivos y negativos. La densidad de carga es mucho mayor cerca del coloide y gradualmente disminuye a cero cuando las concentraciones de iones positivos y negativos se asemejan.

Los contra-iones de la capa de Stern y de la capa difusa son los que juntos se conocen como la doble capa. El espesor de esta doble capa depende del tipo y concentración de los iones de la solución<sup>4</sup>.



**Figura 1.2** Forma de visualizar la doble capa

La coagulación es el proceso de desestabilización (neutralización de la carga) de las partículas coloidales. Esto se logra, por lo general, añadiendo coagulantes químicos (Figura 1.3) y aplicando energía de mezclado.

Los principales coagulantes utilizados son: sulfato de aluminio  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$ , aluminato de sodio  $\text{NaAlO}_2$ , cloruro de aluminio  $\text{AlCl}_3$ , cloruro férrico  $\text{FeCl}_3$ , sulfato férrico  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ , sulfato ferroso  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , sulfato de cobre  $\text{CuSO}_4$  y polielectrólitos.

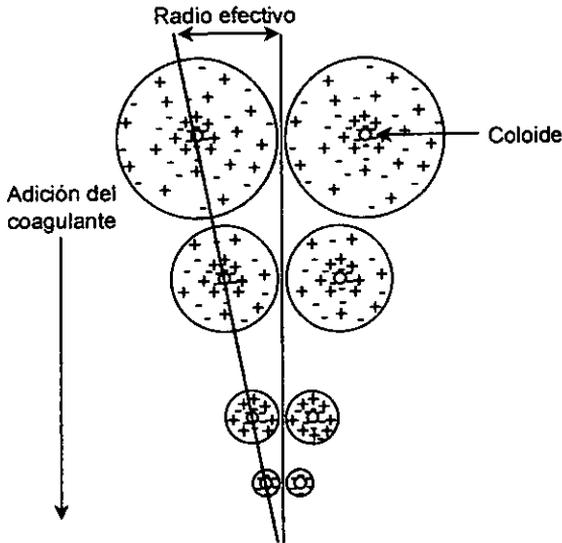


Figura 1.3 Coagulación

El mezclado de los coagulantes con el agua cruda se denomina comúnmente mezcla rápida. El propósito principal de esta operación es mezclar instantáneamente y distribuir uniformemente los reactivos en el agua. El proceso total ocurre en un tiempo muy corto (segundos) y el primer resultado es la formación de pequeños conglomerados<sup>5</sup>.

### 1.1.2 Mezcladores

Las unidades normalmente utilizadas para producir la mezcla rápida se pueden clasificar en dos grandes grupos, dependiendo del tipo de energía utilizada para producir la agitación: mecánica e hidráulica (Tabla 1.1).

Tabla 1.1 Clasificación de las unidades de mezcla rápida

MECÁNICOS	Mezclador en línea		
	Retromezclador (propelas, turbinas)		
HIDRÁULICOS	Salto hidráulico	Canaleta Parshall	
		Canal de fondo inclinado	
	En línea	Difusores	En tuberías
			En canales
		Inyectores	
	Caídas	Estáticos	
		Orificios	
		Vertedores	
	Contracciones	Medidor Venturi	
		Reducciones	
		Orificios ahogados	
Velocidad o cambio de flujo.	Línea de bombeo		
	Codos		

### 1.1.3 Dosis óptima de coagulante

La cantidad óptima de sustancias químicas que se debe adicionar para la coagulación-floculación se determina en el laboratorio mediante lo que se denomina prueba de jarras.

La prueba de jarras simula las condiciones de mezclado y de sedimentación que se dan en una planta clarificadora. El equipo de laboratorio para efectuar estas pruebas tiene un motor de velocidad variable que permite controlar la energía del mezclado en las jarras, se pueden correr hasta seis pruebas simultáneamente.

La determinación de la dosis óptima consiste en añadir a cada jarra una dosis de coagulante diferente aplicando gran energía para dispersarlo en el agua. Esto se logra, haciendo girar las paletas a una velocidad mayor de 300 rpm durante unos segundos (mezcla rápida). Enseguida se disminuye la velocidad de rotación de las paletas hasta 30 rpm y se mantiene así durante unos minutos para propiciar la formación de los flóculos (mezcla lenta). Una vez concluida la etapa de floculación, se suspende la agitación y se deja sedimentar. Finalmente se comparan los

resultados de color y/o turbiedad obtenidos en las jarras, encontrándose así la dosis óptima (aquella con la que se obtuvo la mínima turbiedad y/o color).

## 1.2 Floculación

El objetivo principal de la floculación es reunir a las partículas desestabilizadas para formar aglomeraciones de mayor peso y tamaño que sedimenten con mayor eficiencia.

Normalmente la floculación se analiza como un proceso causado por la colisión entre partículas, en la cual intervienen tres mecanismos de transporte<sup>2</sup>:

- Floculación pericinética o Browniana debida a la energía térmica del fluido.
- Floculación ortocinética o gradiente de velocidad, producido en la masa del fluido en movimiento.
- Sedimentación diferencial, debida a las partículas grandes, las cuales al precipitarse colisionan con las más pequeñas que van descendiendo lentamente y las aglomeran.

### 1.2.1 Factores que influyen en la floculación

Los principales factores que influyen en la eficiencia de este proceso son: la naturaleza del agua, la intensidad de agitación y el tiempo de floculación<sup>2</sup>.

#### 1.2.1.1 Naturaleza del agua

La coagulación y, por consiguiente, la floculación son extremadamente sensibles a las características físico-químicas del agua cruda, tales como la turbiedad, alcalinidad, pH, etc.

Algunos iones presentes en el agua pueden influir en el equilibrio físico-químico del sistema, en la generación de cadenas poliméricas de los hidróxidos que

se forman, o en la interacción de estos polímeros con las partículas coloidales, afectando el tiempo de floculación.

La concentración y la naturaleza de las partículas que producen la turbiedad también tienen una notable influencia en el proceso de floculación. En los modelos matemáticos de floculación como el de Harris, Kaufman y Krone<sup>6</sup> o Hudson<sup>7</sup>, la velocidad de formación de flóculos es proporcional a la concentración de partículas. En estas ecuaciones se ve que la velocidad de floculación depende también del tamaño inicial de las partículas.

Estos aspectos teóricos son generalmente confirmados en la práctica: por regla general es más fácil flocular aguas con elevada turbiedad y que presenten una amplia distribución de tamaños de partículas. En tanto, las partículas de mayor tamaño, que podrían ser removidas en tanques de sedimentación simple, tales como arena fina acarreada durante picos de elevada turbiedad, interfieren con la floculación inhibiendo o impidiendo el proceso. Por este motivo, cuando la turbiedad del agua cruda sea igual o superior a 1,000 unidades, es indispensable la utilización de tanques de presedimentación<sup>2</sup>.

#### **1.2.1.2 Gradiente de velocidad**

Cuanto mayor es el gradiente de velocidad, más rápida es la aglomeración de las partículas. Los flóculos crecerán hasta un tamaño máximo, encima del cual las fuerzas de cizallamiento alcanzan una intensidad que los rompen en partículas menores.

La resistencia de los flóculos depende de una serie de factores:

- a) De su tamaño, forma y compactación.
- b) Del tamaño, forma y naturaleza de las micropartículas.
- c) Del número y forma de los ligamentos que unen a las partículas.

Tekippe y Ham<sup>8</sup> realizaron un estudio teórico práctico para determinar la influencia de la variación del gradiente de velocidad en los diversos compartimientos de un floculador, concluyendo en la necesidad de escalonar gradualmente el gradiente de velocidad y evitar el tener tramos intermedios con altos gradientes, pues este caso es el más desfavorable.

Después de formados los flóculos en la última cámara de floculación, se debe tener gran cuidado en la conducción del agua floculada hasta los sedimentadores. Los gradientes de velocidad en los canales, compuertas, o cualquier otra estructura de paso del agua floculada no deben ser mayores de  $20 \text{ s}^{-1}$ .

### 1.2.1.3 Tiempo de floculación

La velocidad de aglomeración de las partículas es proporcional al tiempo. Bajo determinadas condiciones existe un tiempo óptimo para la floculación, normalmente entre 20 y 40 minutos. La permanencia del agua en el floculador durante un tiempo inferior o superior al óptimo produce resultados inferiores, tanto más acentuados cuanto más se aleje éste del tiempo óptimo de floculación. El tiempo óptimo se puede determinar a través de la prueba de jarras.

### 1.2.2 Parámetros operacionales

Estos son: el gradiente de velocidad ( $G$ ) y el tiempo de retención ( $t$ ), o alternativamente, el producto de ambos, que viene a ser el número de Camp ( $Gt$ ).

Los valores de estos parámetros, según los estudios realizados por Villegas y Letterman<sup>9</sup>, son los que en forma conjunta van a producir la mayor eficiencia. A través de investigaciones efectuadas<sup>10</sup> se ha determinado que el rango óptimo de gradientes de velocidad para floculación varía entre  $20$  y  $75 \text{ s}^{-1}$  y el de los tiempos de retención entre 10 y 30 minutos, dependiendo de la calidad del agua.

La ecuación general para el cálculo del gradiente es la siguiente<sup>5</sup>:

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} \quad \text{Ec.1.1}$$

Donde:

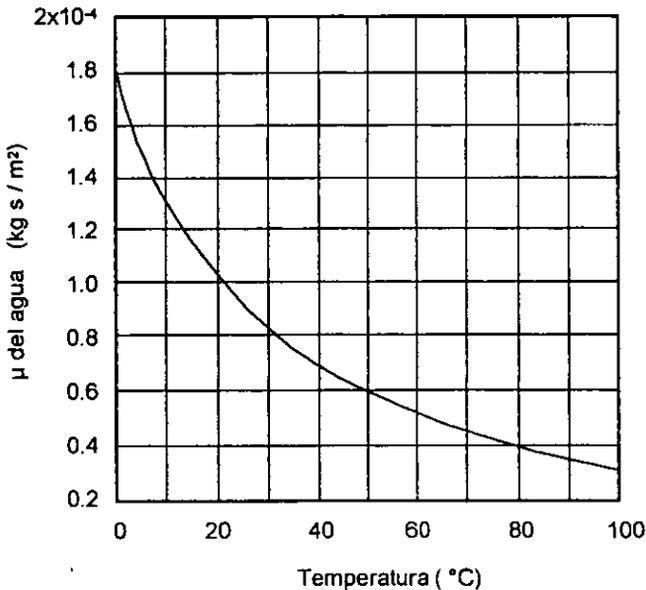
G= Gradiente de velocidad ( $s^{-1}$ ).

P = Potencia (kg m/seg).

V = Volumen de la cámara del floculador ( $m^3$ ).

$\mu$  = Viscosidad dinámica (kg s/ $m^2$ ) es función de la temperatura del agua<sup>11</sup>, para 20°C

$\mu = 1.03 \times 10^{-4}$  kgs/ $m^2$  (Gráfica 1.1).



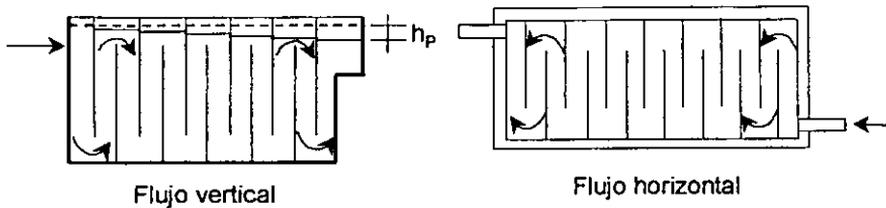
Gráfica 1.1 Viscosidad dinámica del agua a la presión atmosférica al nivel del mar

### 1.2.3 Tipos de floculadores

Según el tipo de energía usada para producir la agitación, los floculadores pueden clasificarse en hidráulicos y mecánicos.

#### 1.2.3.1 Floculadores hidráulicos

Los floculadores hidráulicos utilizan la energía disponible a través de una pérdida de carga general o específica. Consisten en tanques provistos de pantallas entre los cuales el agua circula con una velocidad fija, produciendo cierta turbulencia en cada cambio de dirección del flujo<sup>12</sup> (Figura 1.4).



**Figura 1.4 Floculadores hidráulicos**

Pueden ser de flujo horizontal o flujo vertical. En los primeros, el flujo va y viene alrededor de las pantallas haciendo un giro de  $180^\circ$  al final de cada uno. En los segundos el flujo sube y baja en condiciones similares.

En ambos casos se produce una pérdida de carga debido a:

- El cambio de dirección y turbulencia.
- El ensanchamiento y contracción de la sección.
- La fricción en los tramos rectos.

La suma de estas pérdidas de carga constituyen la pérdida de carga total.

Las principales desventajas de este tipo de floculadores son:

- a) Se produce mucho más pérdida de carga y por tanto mayor gradiente de velocidad en los giros de  $180^\circ$  del flujo que en los tramos rectos.
- b) Cuando las pantallas son fijas, al variarse el caudal de operación de la planta se modifican los tiempos de residencia y los gradientes de velocidad. Si el gasto aumenta el tiempo de residencia disminuye y el gradiente se incrementa y viceversa, influyendo en la formación del floculo.
- c) Se requiere de una extensión de área similar a la de sedimentación.

Sin embargo, el floculador hidráulico tiene una serie de ventajas que no deben subestimarse:

- a) No tienen cortos circuitos, esto es, el flujo queda retenido durante un tiempo casi igual al periodo de detención nominal.
- b) No tiene partes movibles, de forma que su operación y mantenimiento son más simples que las de los equipos mecánicos.
- c) Si bien, la pérdida de carga necesaria para producir un determinado gradiente de velocidad es mayor, no requiere consumo externo de energía, lo que es una considerable ventaja cuando el flujo llega por gravedad a la planta.

La potencia disipada en cualquier dispositivo de mezcla hidráulica es igual al producto de la pérdida de carga por el caudal<sup>2</sup>.

$$P = H \gamma Q$$

Ec. 1.2

Donde:

P= Potencia disipada (kg m/seg).

H = Pérdida de carga (m).

Q = Gasto ( $m^3/s$ ).

$\gamma$  = Peso específico del agua ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ).

Por lo tanto el gradiente de velocidad puede ser estimado sustituyendo la ecuación 1.2 en la 1.1.

$$G = \sqrt{\frac{H \gamma Q}{\mu V}} \quad \text{Ec. 1.3}$$

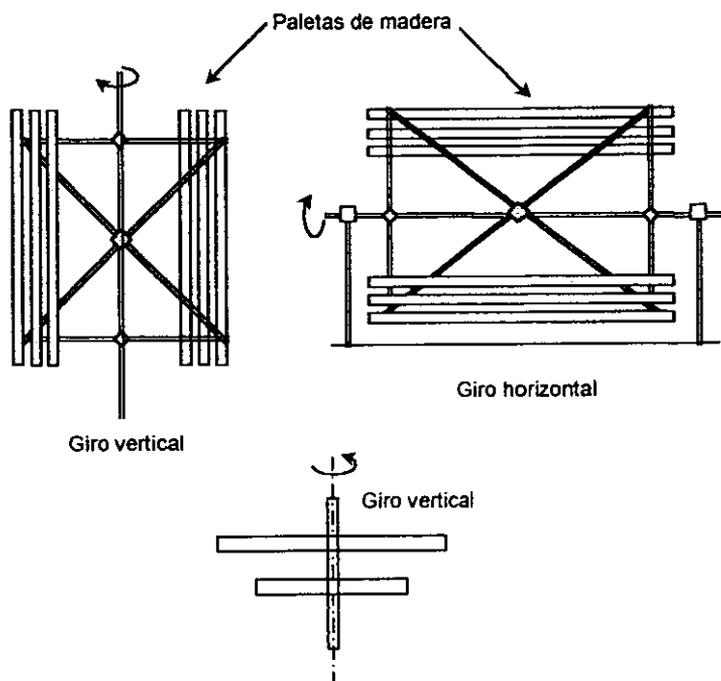
### 1.2.3.2 Floculadores mecánicos

Los floculadores mecánicos utilizan energía de una fuente externa, normalmente un motor eléctrico acoplado a un intercambiador de velocidades, que hace posible la pronta variación de la intensidad de agitación.

Los floculadores mecánicos se distinguen básicamente por el sentido del movimiento en giratorios y alternativos. Los primeros pueden ser de paletas que operan a bajas velocidades de rotación o de turbinas a velocidades muy altas. Los floculadores alternativos consisten básicamente en sistemas oscilantes (suben y bajan), con velocidad angular constante o de función senoidal.

Los floculadores mecánicos más utilizados son, sin duda, los de movimiento giratorio con paletas paralelas o perpendiculares al eje (Figura 1.5). El eje puede ser horizontal o vertical. Este último, normalmente es más ventajoso, porque evita cadenas de transmisión, y los pozos secos para la instalación de los motores.

La ventaja de un mezclador mecánico es la de controlar el gradiente, variándose la velocidad de rotación del impulsor. Sin embargo, su funcionamiento depende de una fuente de energía externa y, de esta forma, una falla en el sistema de alimentación, o en el propio mecanismo, causaría el colapso del proceso, perjudicando el tratamiento como un todo<sup>2</sup>.



**Figura 1.5 Floculadores mecánicos de paletas**

### 1.2.3.3 Floculación neumática<sup>13</sup>

Algunas veces la floculación neumática ha sido usada en lugar de la agitación mecánica. La agitación neumática emplea tanques y aparatos de aireación similares a los usados en procesos de lodos activados.

Conociendo el valor del gradiente de diseño, la potencia a ser impartida por unidad de volumen del tanque ( $P/V$ ) puede ser determinada de la ecuación 1.1. Usando el valor de diseño  $Gt$  se calcula el tiempo de retención ( $t$ ) y usando el gasto, se determina el volumen del tanque. El flujo de aire ( $G_a$ ) necesario para impartir la potencia deseada puede ser determinado usando la ecuación siguiente:

$$P = 81.5 G_a \log \left( \frac{h + 34}{34} \right) \quad \text{Ec. 1.4}$$

Donde:

$P$  = Potencia (ft lb/seg).

$G_a$  = Flujo de aire a la temperatura y presión de operación (cfm).

$h$  = Profundidad de los difusores (ft).

### 1.3 Dispositivo para aireación/circulación<sup>14</sup>

Es un sistema a base de inyección de aire que sirve para lograr la oxigenación y la circulación artificial del agua de lagos y embalses eutroficados, resolviendo los problemas de calidad del agua y de proliferación de algas. La principal fuente de oxígeno es la aireación que ocurre cuando las burbujas de aire inducen un campo de flujo en la vertical. Una manera altamente eficiente para lograr esta aireación, es conduciendo un tren de burbujas grandes dentro de un tubo vertical (Figura 1.6).

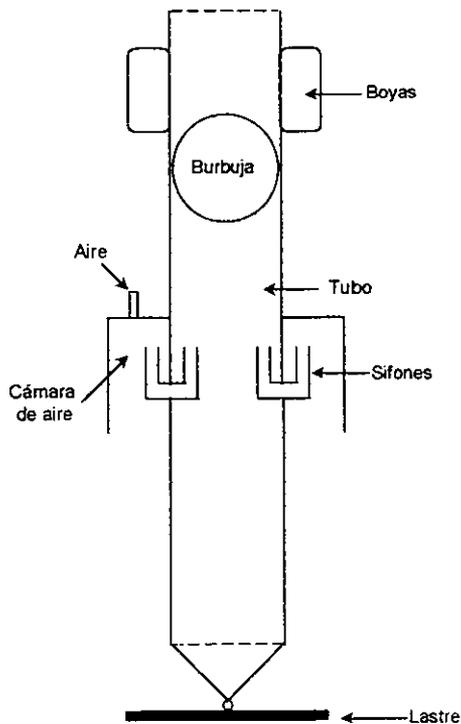


Figura 1.6 Dispositivo para aireación/circulación del agua

El dispositivo para aireación/circulación consta de un tubo principal, abierto en sus dos extremos, que puede construirse en PVC u otros materiales. El dispositivo se equipa con boyas en la parte superior y con un lastre en la parte inferior con un peso suficiente para contrarrestar la flotación de las boyas. Esto con la finalidad de mantener el dispositivo en posición vertical dentro del cuerpo de agua. La parte esencial del dispositivo es la cámara de aire, la cual está equipada con sifones que permiten el ingreso del aire hacia el interior del tubo.

### 1.3.1 Funcionamiento

Un compresor instalado en tierra o bien sobre algún tipo de embarcación, envía aire a través de una manguera conectada a la válvula que se encuentra en la cámara de aire (Figura 1.7). El aire empieza a llenar la cámara gradualmente hasta que llega al sifón y es expulsado hacia el tubo. Dentro del tubo, la masa de aire forma una burbuja que asciende hacia la superficie debido a la diferencia de densidad que existe entre el aire y el agua. Cada vez que la burbuja asciende desplaza fuera del dispositivo el agua contenida dentro del tubo logrando de esta forma el movimiento del agua.

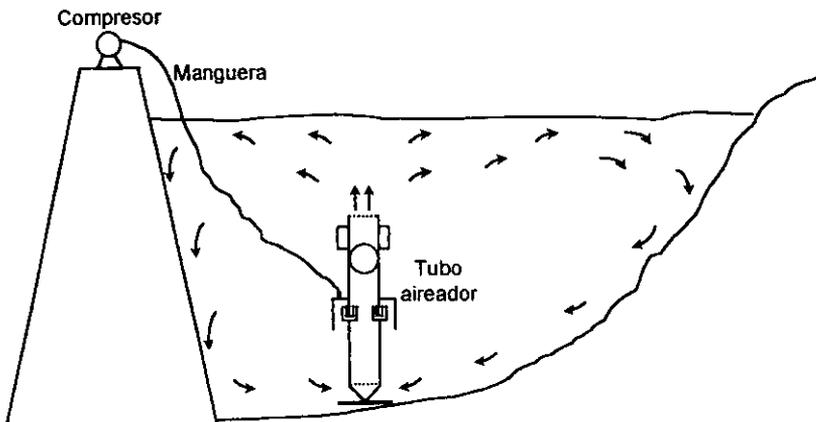


Figura 1.7 Funcionamiento del dispositivo

Es muy importante para el buen funcionamiento del dispositivo de aireación que éste se encuentre en posición vertical, ya que de no ser así, el llenado de la cámara no es uniforme y los sifones no expulsan el aire al mismo tiempo formando una burbuja defectuosa.

### **1.3.2 Bases de diseño**

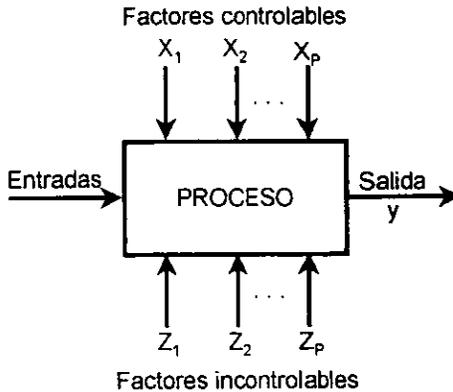
- a) La longitud del tubo se determina en función de la profundidad y del nivel en el que se presenta la estratificación (cambio brusco de temperatura entre dos capas adyacentes).
- b) El diámetro se establece en función del volumen de agua a circular y del tiempo en que se requiera circular este volumen.
- c) Las dimensiones de la cámara de aire deben ser tales que pueda albergar una cantidad de aire suficiente para formar una burbuja que ocupe completamente el diámetro del tubo.
- d) El tamaño de los sifones debe ser el adecuado para que sean capaces de liberar instantáneamente el volumen de aire que contenga la cámara.

### **1.4 Diseño experimental<sup>16</sup>**

Un experimento diseñado es una prueba o serie de pruebas en las cuales se inducen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema, de manera que sea posible observar e identificar las causas de los cambios en la respuesta de salida.

El proceso o sistema bajo estudio puede representarse por medio del modelo de la Figura 1.8. Suele ser posible visualizar el proceso como una combinación de máquinas, métodos, personas y otros recursos que transforman alguna entrada (a menudo un material) en una salida que tiene una o más respuestas observables.

Algunas de las variables del proceso  $x_1, x_2, \dots, x_p$  son controlables, mientras que otras  $z_1, z_2, \dots, z_p$  son incontrolables (aunque pueden ser controlables para los fines de una prueba).



**Figura 1.8 Modelo general de un proceso o sistema**

Entre los objetivos del experimento pueden incluirse:

1. Determinar cuales variables tienen mayor influencia en la respuesta,  $y$ .
2. Determinar el mejor valor de las  $x$  que influyen en  $y$ , de modo que  $y$  tenga casi siempre un valor cercano al valor nominal deseado.
3. Determinar el mejor valor de las  $x$  que influyen en  $y$ , de modo que la variabilidad de  $y$  sea pequeña.
4. Determinar el mejor valor de las  $x$  que influyen en  $y$ , de modo que se minimicen los efectos de las variables incontrolables  $z_1, z_2, \dots, z_q$ .

Los diseños experimentales tienen un cometido importante en las actividades de diseño técnico (o diseño de ingeniería), en las cuales se desarrollan nuevos productos y se mejoran otros ya existentes. Algunas aplicaciones del diseño experimental en el diseño técnico son:

1. Evaluación y comparación de configuraciones de diseño básicas.
2. Evaluación de materiales alternativos.

3. Selección de parámetros de diseño de modo que el producto funcione bien en una amplia variedad de condiciones de campo (de uso real); esto es, de modo que el producto sea consistente (robusto).

El uso del diseño experimental en estas áreas puede dar por resultado productos con mayor confiabilidad y mejor funcionamiento en el campo, menores costos, y menor tiempo de diseño y desarrollo del producto.

#### **1.4.1 Directrices para el diseño de experimentos**

Para usar un enfoque estadístico al diseñar y analizar un experimento se requiere tener de antemano una idea clara de qué es exactamente lo que se va a estudiar, cómo se van a recopilar los datos y cómo se van a analizar. A continuación, se ofrece una guía del procedimiento recomendado:

1. Comprensión y planteamiento del problema. Este punto pudiera parecer obvio; sin embargo, en la práctica no es sencillo darse cuenta de que existe un problema que requiere experimentación, ni diseñar un planteamiento claro y aceptable del mismo. Es necesario desarrollar todas las ideas sobre los objetivos del experimento. Un planteamiento claro del problema contribuye a menudo en forma sustancial a un mejor conocimiento del fenómeno y de la solución final del problema.
2. Elección de factores y niveles. El experimentador debe elegir los factores que variarán en el experimento, los intervalos de dicha variación y los niveles específicos a los cuales se hará el experimento. También debe considerarse la forma en que se controlarán estos factores para mantenerlos en los valores deseados, y cómo se les medirá. Es importante investigar todos los factores que pueden ser de interés, y no depender demasiado de la experiencia pasada; en particular durante las primeras etapas de la experimentación o cuando el proceso no está muy avanzado. Cuando el objetivo es el escrutinio de factores o la

caracterización del proceso, suele ser mejor mantener bajo el número de niveles de los factores (lo más común es usar dos niveles).

3. Selección de la variable de respuesta. Al seleccionar la respuesta o variable dependiente, el experimentador debe estar seguro de que la respuesta que se va a medir realmente provea información útil acerca del proceso de estudio. Con mayor frecuencia el promedio o la desviación estándar (o ambos) de la característica medida serán la variable de respuesta. No son raras las respuestas múltiples. La capacidad de medición (o el error de medición) también es un factor importante. Si la capacidad de medición es deficiente, sólo puede esperarse que el experimento detecte efectos relativamente grandes de los factores; en caso contrario deben hacerse repeticiones.
  
4. Elección del diseño experimental. Si los tres pasos anteriores se han seguido de la manera correcta, este cuarto paso es relativamente fácil. Para elegir el diseño es necesario considerar el tamaño muestral (número de repeticiones), seleccionar un orden adecuado para los ensayos experimentales, y determinar si hay implicado bloqueo u otras restricciones de aleatorización. Es importante tener presentes los objetivos experimentales al seleccionar el diseño. En muchos experimentos de ingeniería se sabe de antemano que algunos factores producen respuestas diferentes, consecuentemente, hay interés en identificar qué factores causan esta diferencia y en estimar la magnitud del cambio de la respuesta. En otras situaciones habrá más interés en verificar la uniformidad.
  
5. Realización del experimento. Cuando se realiza el experimento, es vital vigilar el proceso cuidadosamente para asegurar que todo se haga conforme a lo planeado. En esta fase los errores en el procedimiento suelen anular la validez experimental. La planeación integral es decisiva para el proceso. En un complejo entorno de manufactura o investigación y desarrollo, es fácil subestimar los aspectos logísticos y de planeación de la realización de un experimento diseñado.

6. **Análisis de los datos.** Deben emplearse métodos estadísticos para analizar los datos, de modo que los resultados y conclusiones sean objetivos más que apreciativos. Hay que recordar que los métodos estadísticos no pueden probar que un factor (o varios factores) tiene un efecto particular. Sólo proporcionan directrices para la veracidad y validez de los resultados. Los métodos estadísticos, aplicados adecuadamente, no permiten probar algo experimentalmente, sólo hacen posible obtener el probable error de una conclusión, o asignar un nivel de confiabilidad a los resultados. La principal ventaja de los métodos estadísticos es que agregan objetividad al proceso de toma de decisiones. Las técnicas estadísticas, aunadas a un buen conocimiento técnico o del proceso y al sentido común, suelen llevar a conclusiones razonables.
  
7. **Conclusiones y recomendaciones.** Una vez que se han analizado los datos, el experimentador debe extraer conclusiones prácticas de los resultados y recomendar un curso de acción.

#### **1.4.2 Diseño factorial $2^k$**

Los diseños factoriales son ampliamente usados en experimentos en los que intervienen varios factores para estudiar el efecto conjunto de éstos sobre una respuesta. Existen varios casos especiales del diseño factorial general que resultan importantes porque se usan ampliamente en el trabajo de investigación, y porque constituyen la base para otros diseños de gran valor práctico.

El más importante de estos casos especiales ocurre cuando se tienen  $k$  factores, cada uno con dos niveles. Estos niveles pueden ser cuantitativos como sería el caso de dos valores de temperatura, presión o tiempo. También pueden ser cualitativos como sería el caso de dos máquinas, dos operadores, los niveles "superior" e "inferior" de un factor o, quizás, la ausencia o presencia de un factor. Una réplica completa de tal diseño requiere que se recopilen  $2^k$  observaciones y se conoce como diseño factorial  $2^k$ .

El diseño  $2^k$  es particularmente útil en las primeras fases del trabajo experimental, cuando es probable que haya muchos factores por investigar. Conlleva el menor número de corridas con las cuales pueden estudiarse  $k$  factores en un diseño factorial completo.

Como usualmente los recursos son limitados, el número de réplicas que un experimentador puede realizar puede estar limitado. Frecuentemente, los recursos disponibles permiten ejecutar sólo una vez el experimento a menos que el investigador esté dispuesto a desechar algunos factores originales. Sin réplica no hay estimación del error.

Un motivo de preocupación potencial en el uso de diseños factoriales de dos niveles es la suposición de linealidad en los efectos de los factores. Por supuesto, es innecesaria la linealidad perfecta, y el sistema  $2^k$  funcionará bastante bien incluso cuando la suposición de linealidad se cumpla sólo de una manera aproximada. Existe sin embargo un método para replicar ciertos puntos en un diseño factorial  $2^k$ , lo cual lo protegerá contra la curvatura además de permitir obtener estimaciones de error independientes. Dicho método consiste en agregar puntos centrales al diseño  $2^k$ , para lo cual se hacen  $n$  réplicas en los puntos  $x_i=0$  ( $i=1,2,\dots,k$ ).

## 2. METODOLOGÍA

La metodología seguida en esta investigación es la que se resume en el diagrama de flujo siguiente:

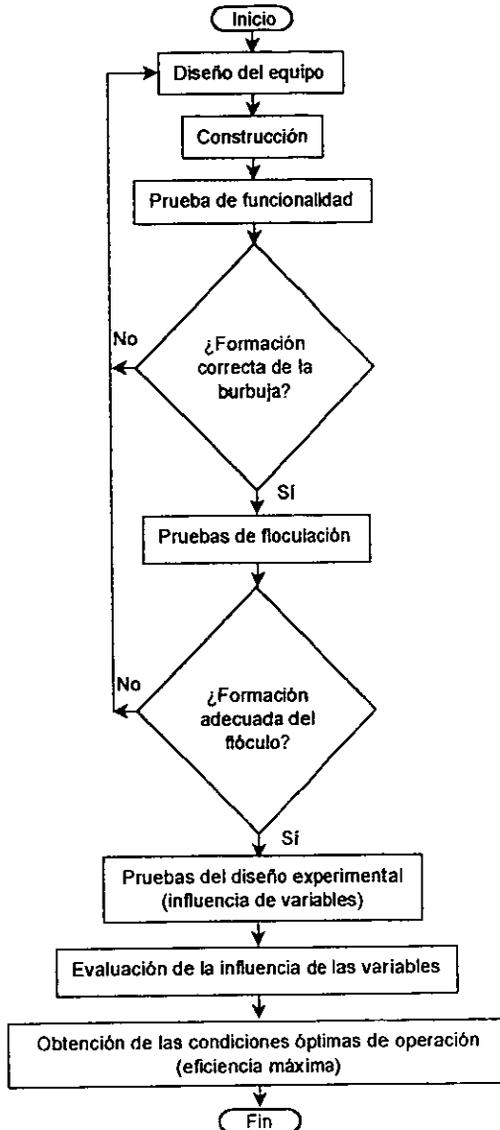


Figura 2.1 Metodología de investigación

## 2.1 Diseño del equipo

Para el diseño se tomó como base el principio de funcionamiento del dispositivo de aireación/circulación (Capítulo 1). El equipo floculador está constituido básicamente por tubo, abierto en sus dos extremos, el cual se instala dentro del tanque que contiene el agua a flocular (Figura 2.2).

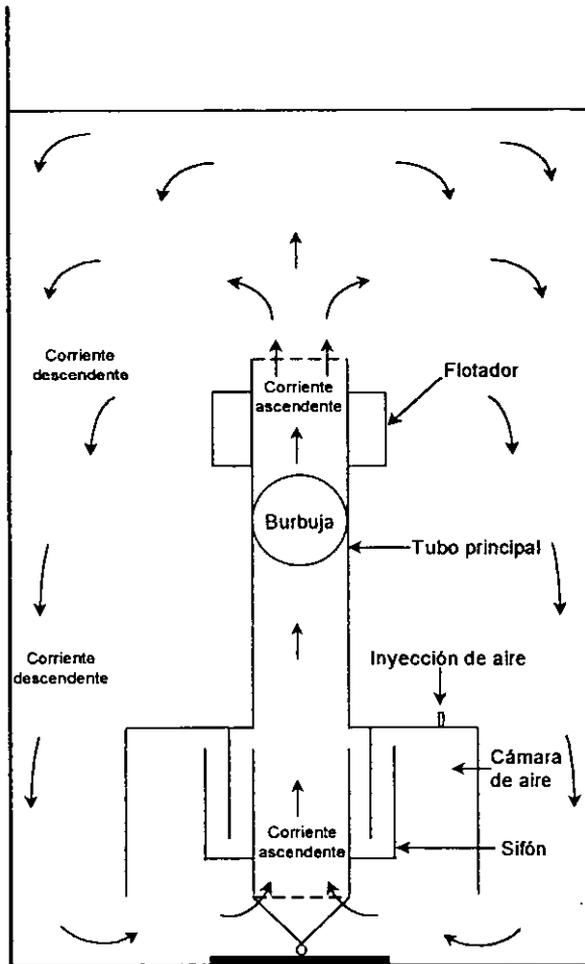


Figura 2.2 Principio de funcionamiento del equipo floculador

Los pasos considerados para el diseño del equipo fueron:

1. Establecer el volumen a tratar y las dimensiones del recipiente de floculación.

Se estableció que las pruebas se realizaran en un volumen de cinco litros, para lo cual se utilizó un recipiente de acrílico con dimensiones de 15 x 15 x 26 cm. Esto con el fin de facilitar la manipulación del equipo en el laboratorio y minimizar las cantidades de agua y coagulante a emplear para la experimentación.

2. Definir la altura del equipo.

La altura del equipo se estableció en función del tirante de agua en el recipiente. Como el tirante en el recipiente es de aproximadamente 24 cm, la altura del equipo estuvo entre 15 y 23 cm.

3. Fijar el diámetro del tubo principal.

Para elegir el diámetro del tubo principal se tomó en cuenta la sección del recipiente de floculación (15 x 15 cm). Se propuso emplear tubos de 1 a 1/2 pulgadas (2.54 a 3.81 cm).

4. Calcular el volumen de la cámara de aire.

La cámara debe ser capaz de almacenar la cantidad de aire requerida para formar la burbuja que debe llenar completamente el diámetro del tubo principal. Por lo tanto, el volumen de la cámara será igual al volumen de la burbuja:

$$V_c = \frac{4}{3} \pi r^3 \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde:

$V_c$  = Volumen de la cámara ( $\text{cm}^3$ ).

$\pi$  = Constante = 3.1416.

$r$  = Radio del tubo principal (cm).

Las dimensiones de la cámara se proponen de tal forma que cumplan con el volumen calculado (ver Anexo I).

### 5. Determinación de los gradientes de velocidad.

Los gradientes de velocidad a determinar en este punto son los que se presentan en las diferentes secciones por las que circula el agua dentro del equipo, desde que ingresa (cerca del fondo del recipiente) hasta que es expulsada para reintegrarse al volumen restante.

Como el recorrido que sigue el agua en el equipo es similar al que se presenta en un floculador hidráulico, el gradiente se calculó empleando la ecuación 1.3:

$$G = \sqrt{\frac{H \gamma Q}{\mu V}}$$

Donde:

$G$  = Gradiente de velocidad ( $s^{-1}$ ).

$H$  = Pérdida de carga (cm).

$\gamma$  = Peso específico del agua ( $1 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^3$ ).

$Q$  = Gasto de agua desplazada ( $\text{cm}^3/\text{s}$ ).

$\mu$  = Viscosidad dinámica (para  $20^\circ\text{C}$ ,  $\mu = 1.03 \times 10^{-8} \text{ kg s/cm}^2$ )

$V$  = Volumen ( $\text{cm}^3$ ).

La pérdida de carga ( $H$ ) puede ser estimada de la fórmula para calcular el gasto a través de un orificio sumergido<sup>11</sup>:

$$Q = C_a \sqrt{2gH} \quad \text{Ec. 2.2}$$

Despejando  $H$ , se tiene:

$$H = \frac{1}{2g} \left( \frac{Q}{C_a} \right)^2 \quad \text{Ec. 2.3}$$

Donde;  $Q$  es el gasto de agua desplazada ( $\text{cm}^3/\text{s}$ ),  $a$  es el área del orificio ( $\text{cm}^2$ ),  $g$  es la fuerza de gravedad ( $981 \text{ cm/s}^2$ ) y  $C$  es el coeficiente de derrame (0.6 para el caso normal de contracción completa).

El gasto ( $Q$ ) se calcula dividiendo el volumen de agua desplazada ( $V_d$ ) entre el tiempo entre la emisión de una y otra burbuja ( $t$ ):

$$Q = \frac{V_d}{t} \quad \text{Ec. 2.4}$$

El volumen de agua desplazada ( $\text{cm}^3$ ) es igual al área que ocupa la burbuja (área del tubo principal) multiplicada por la longitud que recorre la burbuja durante su ascenso:

$$V_d = A L = \pi r^2 L \quad \text{Ec. 2.5}$$

y el tiempo entre la emisión de una y otra burbuja resulta de dividir el volumen de la cámara de aire ( $\text{cm}^3$ ) entre el gasto de aire que se inyecta al equipo ( $\text{cm}^3/\text{s}$ ):

$$t = \frac{V_c}{Q_{\text{AIRE}}} \quad \text{Ec. 2.6}$$

## 2.2 Construcción

Al principio se empleó acrílico como material de construcción, pero después se optó por utilizar el PVC porque es más económico y la construcción se realiza en un tiempo menor.

## 2.3 Prueba de funcionalidad

Estas pruebas se realizaron con agua de la llave teniendo como finalidad evaluar visualmente la formación de la burbuja y el movimiento del agua en el recipiente de floculación.

## 2.4 Pruebas de floculación

Para la realización de estas pruebas se empleó una solución sintética, es decir, agua acondicionada con sustancias húmicas y barro negro que permitieron darle color y turbiedad a la misma. La concentración de sustancias húmicas utilizada

fue de 5 a 12 mg/L y la de barro negro de 0.3 a 0.8 g/L obteniéndose con esto turbiedades en un rango de 20 a 70 UTN.

Para la realización esta prueba es necesario caracterizar previamente la solución sintética con la que se va a trabajar (medir color y turbiedad) así como, determinarle su dosis óptima de coagulante (sulfato de aluminio). Esto se hace mediante una prueba de jarras (punto 1.1.3).

Una vez efectuado lo anterior se procede a la realización de la prueba de floculación de la siguiente manera:

1. Colocar el volumen a tratar (5 litros de la solución) en el equipo de jarras. Como las jarras disponibles en el laboratorio son de 2 litros, se emplearon tres de ellas.
2. Encender el equipo haciendo girar las paletas a la velocidad máxima (300 rpm).
3. Aplicar simultáneamente, con la ayuda de jeringas, la dosis óptima de sulfato de aluminio a cada una de las jarras.
4. Mantener la velocidad de agitación durante 10 segundos.
5. Apagar el equipo, levantar las paletas y verter el contenido de las jarras en el recipiente que deberá tener el floculador ya instalado. Esto debe hacerse en el menor tiempo posible.
6. Regular la cantidad de aire y mantenerla durante el tiempo de floculación (10-30 min).
7. Cerrar la válvula de aire una vez que transcurrió el tiempo de floculación y dejar sedimentar (20-30 min).
8. Tomar la muestra una vez transcurrido el tiempo de sedimentación y medir el color y la turbiedad de la misma.

## **2.5 Pruebas del diseño experimental**

Para el experimento se establecieron como factores o variables independientes: el tiempo de floculación, el gasto de aire (intensidad de agitación), la dosis de sulfato de aluminio y la turbiedad inicial del agua, ya que éstas son las que

intervienen principalmente en el proceso de coagulación-floculación (Capítulo 1). Los niveles de variación de éstos factores fueron:

**Tabla 2.1 Niveles de los factores**

FACTOR	NIVELES
Tiempo de floculación (min)	10 – 20
Gasto de aire (L/min)	0.5 – 1.5
Dosis de sulfato de Aluminio (mg/L)	35 – 50
Turbiedad del agua (UTN)	20 –70

El rango de tiempo recomendado para la floculación varía entre 10 y 30 minutos. Por tal razón el nivel inferior se fijó en 10 minutos, en cuanto al nivel superior éste se estableció en 20 minutos, debido a que se observó que a un mayor tiempo los flóculos formados se fragmentaban en lugar de incrementar su tamaño.

Como en este equipo floculador el gradiente de velocidad aplicado es función del gasto de aire que se inyecta, los niveles de esta variable se fijaron en 0.5 y 1.5 L/min ya que son valores que permiten obtener gradientes promedios de 21 y 59 s<sup>-1</sup> respectivamente (Tabla I.5 de los Anexos), los cuales están dentro del rango óptimo de gradientes para la floculación.

Los niveles inferior y superior de la dosis de coagulante a emplear se determinaron mediante pruebas de jarras. Para agua con turbiedades de 20 y 70 UTN, las dosis fueron 35 y 50 mg/L respectivamente (Anexo II).

El nivel inferior de turbiedad se fijó en 20 UTN debido a que en la práctica, cuando el agua que llega a la planta potabilizadora tiene una turbiedad menor a ésta, es muy común emplear filtración directa excluyendo a los floculadores, es decir, la floculación se realiza en línea y/o lecho. El nivel superior se estableció tomando como referencia las turbiedades observadas en la Planta Potabilizadora de Los Berros, del sistema Cutzamala.

La variable dependiente o de respuesta que se tomó para evaluar el funcionamiento del equipo fue la remoción de turbiedad, la cual está dada por la fórmula:

$$R(\%) = \frac{T_i - T_f}{T_i} \times 100 \quad \text{Ec. 2.7}$$

Donde:

R (%) = Porcentaje de remoción de la turbiedad.

T<sub>i</sub> = Turbiedad inicial (UTN).

T<sub>f</sub> = Turbiedad final (UTN).

Para la experimentación se planteó un diseño factorial 2<sup>4</sup> sin réplica, adicionándole 4 puntos centrales para poder estimar el error y obtener la indicación de curvatura. Las pruebas del diseño experimental se realizaron aleatoriamente, ya que esto ayuda a "cancelar" los efectos extraños que pudieran estar presentes. En la Tabla 2.2 se presentan los casos (combinaciones de los niveles de las variables) y el orden aleatorio en el que se realizaron las pruebas.

**Tabla 2.2 Casos del diseño factorial 2<sup>4</sup> con 4 puntos centrales**

No. CASO	No. PRUEBA	TIEMPO (min)	AIRE (L/min)	DOSIS (mg/L)	TURBIEDAD (UTN)
1	14	10	0.5	35	20
2	8	20	0.5	35	20
3	5	10	1.5	35	20
4	3	20	1.5	35	20
5	16	10	0.5	50	20
6	4	20	0.5	50	20
7	13	10	1.5	50	20
8	12	20	1.5	50	20
9	10	10	0.5	35	70
10	7	20	0.5	35	70
11	6	10	1.5	35	70
12	9	20	1.5	35	70
13	11	10	0.5	50	70
14	15	20	0.5	50	70
15	2	10	1.5	50	70
16	1	20	1.5	50	70
17	17	15	1.0	42.5	45
18	18	15	1.0	42.5	45
19	19	15	1.0	42.5	45
20	20	15	1.0	42.5	45

El procedimiento para realizar las pruebas del diseño experimental es similar al descrito para las pruebas de floculación (punto 2.4), sólo que aquí es necesario preparar la solución sintética con la turbiedad requerida en cada caso, así como aplicar la dosis de sulfato de aluminio, gasto de aire y tiempo de floculación que corresponda.

## **2.6 Evaluación de la influencia de variables**

Los resultados obtenidos en las pruebas experimentales fueron procesados en el paquete de computo STATISTICA de donde se obtuvieron los coeficientes de regresión, el análisis de variancia, los efectos estimados que indican la magnitud y el sentido en el que se ve afectada la variable de respuesta y las gráficas de superficie.

Cabe señalar que existen ciertas suposiciones que fundamentan el análisis de variancia, dichos supuestos consisten en que los errores sean independientes y estén normalmente distribuidos con media cero y variancia constante. Por esta razón se recomienda que la comprobación de estas suposiciones sea un paso de rutina en cada proyecto de diseño experimental.

## **2.7 Obtención de las condiciones óptimas de operación**

Una vez realizado el análisis estadístico se obtuvieron las condiciones óptimas de operación del equipo floculador. Es decir, aquellas que permitieron obtener la eficiencia de remoción máxima.

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Este capítulo está dividido en dos partes, en la primera se describen las modificaciones o ajustes realizados al diseño del equipo floculador y en la segunda se presentan los resultados de las pruebas experimentales a las que se sometió el equipo obtenido.

#### **3.1 Equipo Floculador**

##### **3.1.1 Equipo1**

###### **a) Diseño**

Se llevó a pequeña escala el equipo descrito en el capítulo 1 (Figura 1.6). Debido a sus dimensiones pequeñas los sifones de la cámara se sustituyeron por un solo sifón que rodea al tubo principal. El material de construcción fue acrílico. Las dimensiones propuestas se indican en la Figura 3.1.

###### **b) Resultados**

Se probó su funcionamiento y se observó que el rompimiento de la burbuja en la superficie del agua fue muy fuerte, lo que provocó gran turbulencia. Además la succión en la parte inferior fue demasiado violenta, características que no son favorables para la floculación debido a que se impide la formación de los flóculos.

###### **c) Recomendaciones**

Se deben minimizar los efectos violentos provocados por la succión y rompimiento de la burbuja.

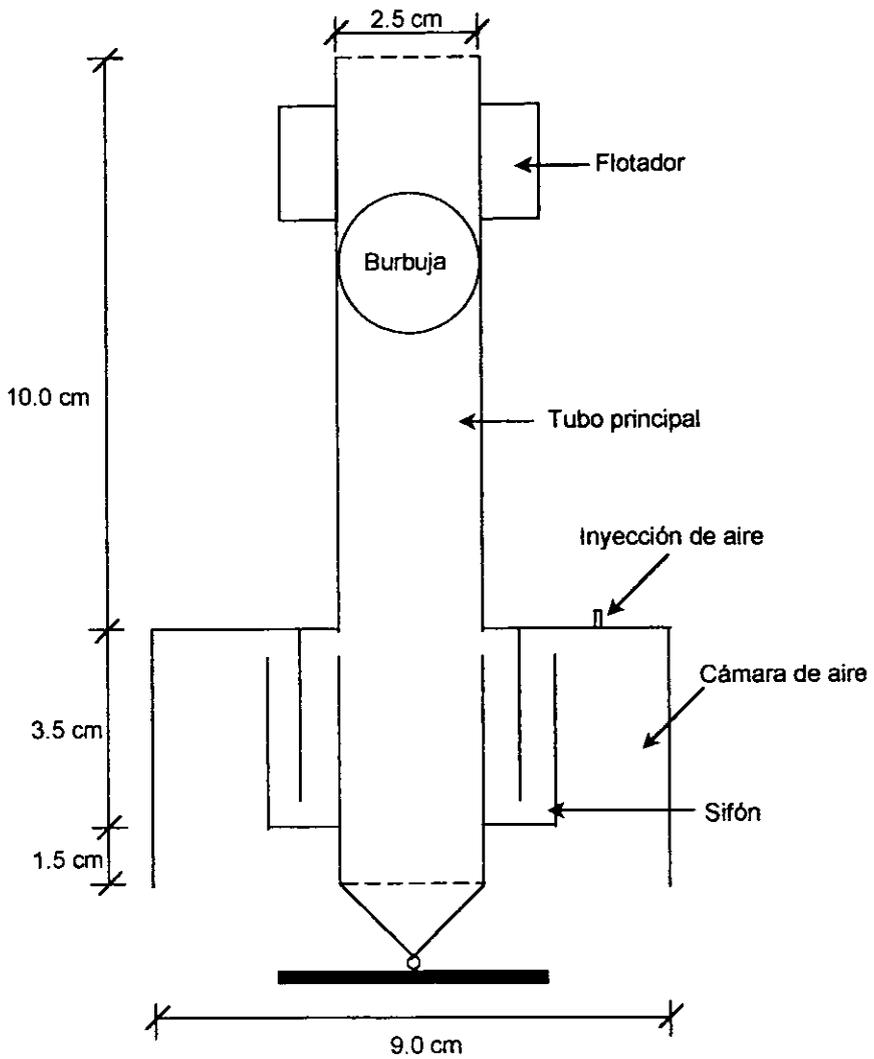


Figura 3.1 Equipo 1

### 3.1.2 Equipo 2

#### a) Diseño

Para evitar que el agua fuera succionada bruscamente y rompiera violentamente en la superficie, se modificó el paso del agua en el equipo de la siguiente manera:

1. Se construyó la cámara en la parte inferior del tubo principal, lo que originó que la succión del agua ya no fuera directa.
2. El ingreso del agua hacia el tubo principal se realizó siguiendo un recorrido por la lateral del tubo principal.
3. Se colocó en la parte superior (salida de la burbuja) un tubo con orificios repartidos en la base del mismo, el cual fue de mayor diámetro que el tubo principal. Esto con el fin de contener el estallamiento de la burbuja y crear corrientes de salida de agua que proporcionaran el movimiento requerido para realizar la floculación (Figura 3.2). El equipo se construyó de PVC.

#### b) Resultados

El rompimiento de la burbuja en la parte superior y la succión del agua en la parte inferior disminuyeron considerablemente, ocasionando que en el centro de la jarra el movimiento fuera demasiado lento. Esto último no es recomendable debido a que no existen los choques y contactos requeridos para que las partículas se aglomeren.

#### c) Recomendaciones

Se debe orientar la salida del agua hacia el centro de la jarra, disminuyendo el recorrido que sigue el agua al ingresar al equipo, para favorecer el movimiento en el centro de la jarra.

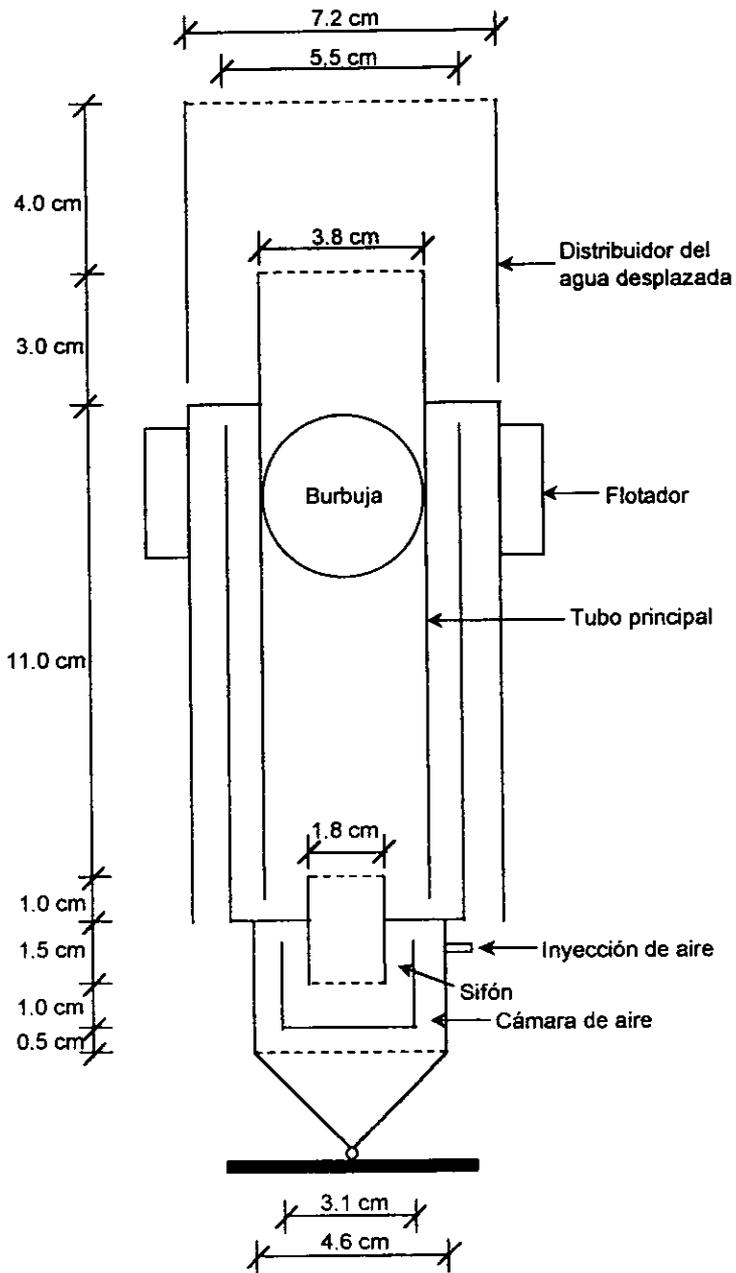


Figura 3.2 Equipo 2

### 3.1.3 Equipo 3

#### a) Diseño

Se conservaron las dimensiones de la cámara de aire del equipo anterior pero se modificó la longitud de recorrido del agua de entrada, de tal forma que los orificios de salida del agua desplazada quedaron aproximadamente a la mitad de la longitud del equipo, con la finalidad de lograr más movimiento en el centro de la jarra (Figura 3.3).

Se determinaron los gradientes de velocidad en el equipo de acuerdo a lo indicado en el paso 5 del punto 2.1 (ver ejemplo en el Anexo I). Los gradientes calculados para un flujo de aire de 0.5 L/min se presentan en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1 Gradientes de velocidad en el equipo 3**

PUNTO	GRADIENTES (s <sup>-1</sup> )
A	20
B	154
C	26
D	292
E	95
F	14
G	19
H	285

#### b) Resultados

Se observó gran movimiento en el centro de la jarra cuya influencia llegaba hasta la superficie. Además, la succión del agua por la parte inferior ayudó a que el movimiento se diera en toda la jarra.

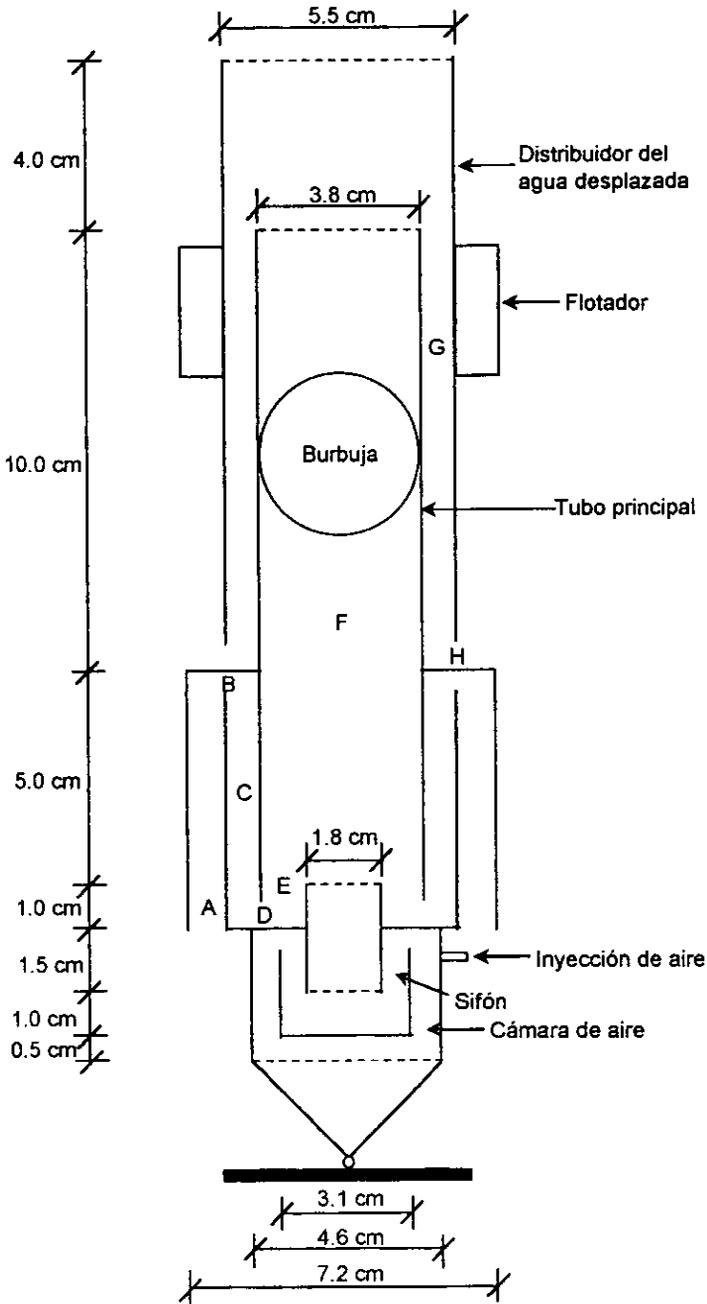


Figura 3.3 Equipo 3

Por lo anterior, se decidió realizar una prueba de floculación, en la cual se observó la formación de flóculos muy pequeños, los cuales debido a su tamaño no sedimentaron adecuadamente, quedando gran parte de ellos suspendidos y por lo tanto la remoción de turbiedad obtenida fue baja (Tabla 3.2).

**Tabla 3.2 Prueba de floculación efectuada con el equipo 3**

SOLUCIÓN SINTÉTICA		COAGULANTE		CONDICIONES DE LA PRUEBA	
Color: 300 PtCo Turbiedad: 36.1 UTN		Nombre: Sulfato de Aluminio Concentración: 1% (10 mg/ml). Dosis: 40 mg/L		Volumen Jarra: 5000 ml M.Rápida: 10 seg a 300 rpm Tiempo de floculación: 15 min. $Q_{\text{AIRE}}=0.5$ L/min. Sedimentación: 20, 25 y 30 min.	
Tiempo de sedimentación (min)	RESULTADOS		REMOCIÓN (%)		
	Color (PtCo)	Turbiedad (UTN)	Color	Turbiedad	
20	229	29.4	24	19	
25	172	21.3	43	41	
30	145	17.4	52	52	

La formación de flóculos muy pequeños es resultado sin duda de que los gradientes de velocidad en el equipo no sean uniformes, sobre todo porque se tienen puntos de gradiente sumamente alto (B, D, E y H), que en lugar de contribuir a la aglomeración de las partículas, provocan el rompimiento de los flóculos que han logrado formarse.

### c) Recomendaciones

Diseñar un equipo que en su interior genere gradientes similares entre sí para no provocar el rompimiento de los flóculos.

### 3.1.4 Equipo 4

#### a) Diseño

Para lograr que los gradientes de velocidad en el equipo fueran más homogéneos se realizaron los siguientes cambios:

1. Se aumentó el área de orificio para disminuir el gradiente en los puntos D y H.
2. La entrada del agua se dejó lo más directa posible, pero cuidando que el ingreso de la misma se realice a la altura del extremo inferior de la cámara para que exista movimiento cerca del fondo de la jarra.
3. Se dejó el tubo del sifón al ras de la cámara de aire. Esto para evitar que se genere el gradiente del punto E.

Tomando en consideración lo anterior se ajustaron los gradientes variando el diámetro de los tubos y las dimensiones de las secciones (Figura 3.4). Los gradientes de velocidad obtenidos para el flujo de aire utilizado en la prueba (1.5 L/min) se presentan en la Tabla 3.3.

**Tabla 3.3 Gradientes de velocidad en el equipo 4**

PUNTO	GRADIENTES (s <sup>-1</sup> )
A	68
B	79
C	85
D	15
E	81

#### b) Resultados

Como los orificios de salida del agua desplazada son más grandes que en equipo anterior las corrientes que se generaron tuvieron una mayor influencia dentro del recipiente, es decir, se observó un movimiento del agua mejor que el originado por el equipo 3.

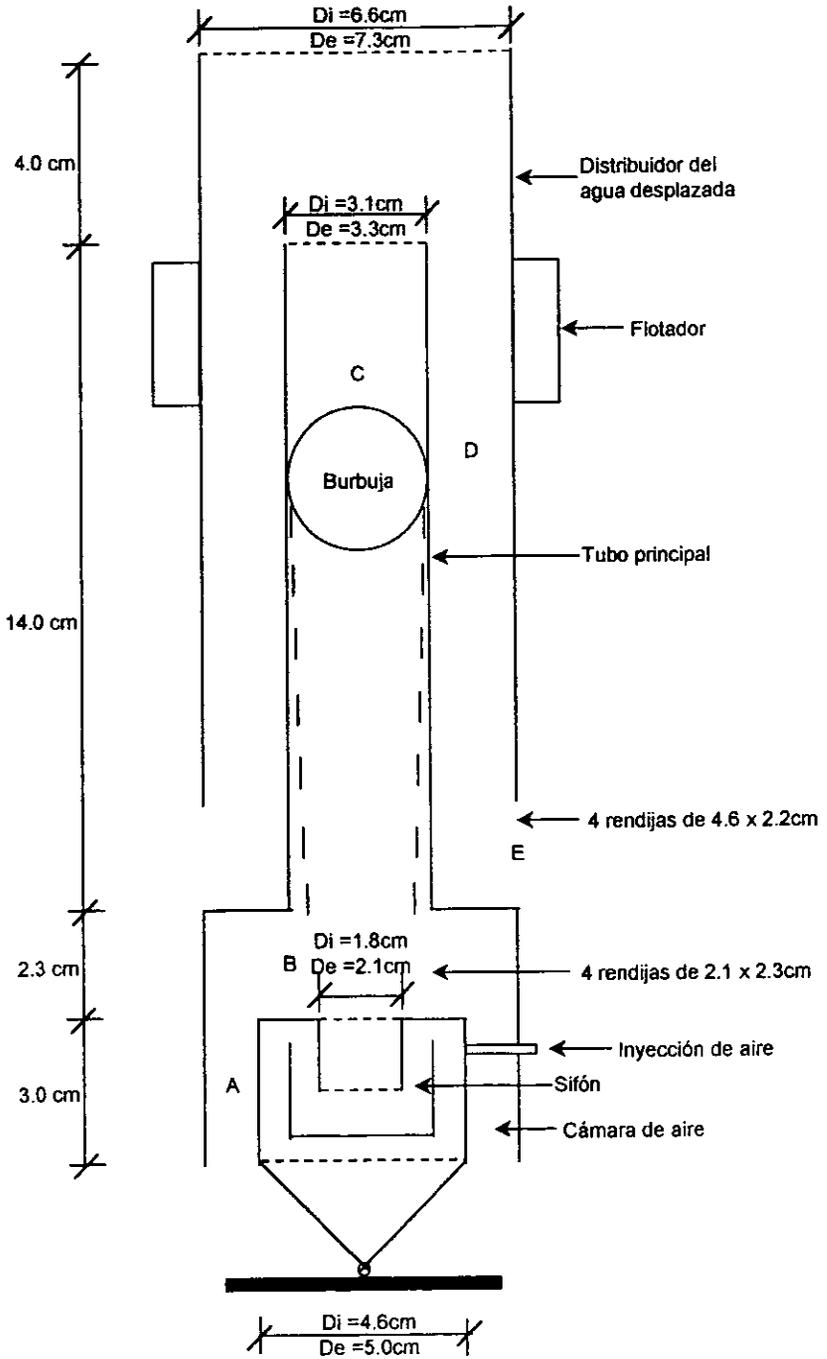


Figura 3.4 Equipo 4

Los resultados obtenidos en la prueba de floculación (Tabla 3.4), muestran que la eficiencia de remoción de turbiedad también mejoró en comparación con la obtenida con el equipo 3.

**Tabla 3.4 Prueba de floculación efectuada con el equipo 4**

SOLUCIÓN SINTÉTICA		COAGULANTE		CONDICIONES DE LA PRUEBA	
Color: 313 PtCo Turbiedad: 39 UTN		Nombre: Sulfato de Aluminio Concentración: 1% (10 mg/ml). Dosis: 40 mg/L		Volumen Jarra: 5000 ml M.Rápida: 10 seg a 300 rpm. Tiempo de floculación: 15 min. $Q_{AIRE}=1.5$ L/min. Sedimentación: 30 min.	
No. Prueba	RESULTADOS		REMOCIÓN (%)		
	Color (PtCo)	Turbiedad (UTN)	Color	Turbiedad	
1	132	15.3	58	61	
2	127	15.2	59	61	

Como no fue posible construir un equipo que presentara un mismo gradiente en su interior, debido a la limitación de los diámetros comerciales de los tubos de PVC. Se concluyó que con el equipo 4 se realizaran las pruebas del diseño experimental, ya que es el que logra los gradientes más similares en cada una de sus secciones.

### 3.2 Pruebas experimentales

Los valores de la variable de respuesta (% de remoción de turbiedad) obtenidos para el diseño  $2^4$  con puntos centrales se presentan en la Tabla 3.5.

**Tabla 3.5 Porcentajes de remoción obtenidos para los casos del diseño experimental**

No. CASO	TIEMPO (min)	AIRE (L/min)	DOSIS (mg/L)	TURBIEDAD (UTN)	% REMOCIÓN
1	10	0.5	35	20	55
2	20	0.5	35	20	43
3	10	1.5	35	20	24
4	20	1.5	35	20	35
5	10	0.5	50	20	67
6	20	0.5	50	20	52
7	10	1.5	50	20	42
8	20	1.5	50	20	43
9	10	0.5	35	70	71
10	20	0.5	35	70	79
11	10	1.5	35	70	67
12	20	1.5	35	70	66
13	10	0.5	50	70	82
14	20	0.5	50	70	83
15	10	1.5	50	70	60
16	20	1.5	50	70	57
PUNTOS CENTRALES					
17	15	1.0	42.5	45	70
18	15	1.0	42.5	45	70
19	15	1.0	42.5	45	69
20	15	1.0	42.5	45	72

Antes de adoptar conclusiones sobre el análisis de variancia de estos resultados se comprobó la idoneidad del modelo; es decir, se realizaron pruebas para determinar si se cumplen las suposiciones de normalidad, independencia e igualdad de variancia, en el Anexo III se presenta el desarrollo de estas pruebas, de las cuales se concluye que las suposiciones que fundamentan el análisis de variancia si se satisfacen.

En la Tabla 3.6 se presenta el análisis de variancia, el cual indica que de los cuatro factores analizados los que tuvieron un efecto significativo sobre la variable de

respuesta (remoción de la turbiedad) fueron: la turbiedad inicial del agua y el gasto de aire (gradiente) en ese orden de importancia, ya que su media de cuadrados correspondientes (2601 y 1190) fue mucho mayor comparada con la del error (33).

**Tabla 3.6 Análisis de variancia**

Diseño Experimental	ANOVA			
	R <sup>2</sup> =0.94671; Media de cuadrados residual =33.125			
Factor	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F <sub>0</sub>
Curvatura	490.050*	1*	490.050*	14.79396*
(1) T. Floc.	6.250	1	6.250	0.18868
(2) Aire	1190.250*	1*	1190.250*	35.93208*
(3) Dosis	132.250	1	132.250	3.99245
(4) Turb.	2601.000*	1*	2601.000*	78.52075*
1 por 2	42.250	1	42.250	1.27547
1 por 3	30.250	1	30.250	0.91321
1 por 4	25.000	1	25.000	0.75472
2 por 3	42.250	1	42.250	1.27547
2 por 4	4.000	1	4.000	0.12075
3 por 4	144.000	1	144.000	4.34717
Error	265.000	8	33.125	
Total	4972.550	19		

\* significativo al 5%.

Más formalmente, se puede calcular la razón F<sub>0</sub>:

$$F_0 = \text{Media de cuadrados del tratamiento} / \text{Media de cuadrados del error}$$

que al ser comparada con F de tablas (F<sub>0.05,1,8</sub>=5.32), da por resultado la aceptación o rechazo de que el factor es significativo sobre la variable de respuesta. En otras palabras el factor es significativo si:

$$F_0 > F_{0.05,1,8}$$

Los resultados de esta prueba son presentados también en la Tabla 3.6, donde los valores de F<sub>0</sub> marcados con un asterisco (\*) indican que el factor es significativo.

En otras palabras la remoción de la turbiedad se ve afectada mayormente por la turbiedad inicial y el gasto de aire (gradiente) que por el tiempo de floculación y la dosis de sulfato de aluminio.

Otro aspecto que destaca del análisis de variancia es que existe curvatura en la respuesta de la región explorada. Por lo que, el comportamiento del sistema estudiado no es lineal.

Adicionalmente se pueden establecer los efectos sobre la variable de respuesta a través de los datos que se presentan en la Tabla 3.7.

**Tabla 3.7 Estimación de los efectos**

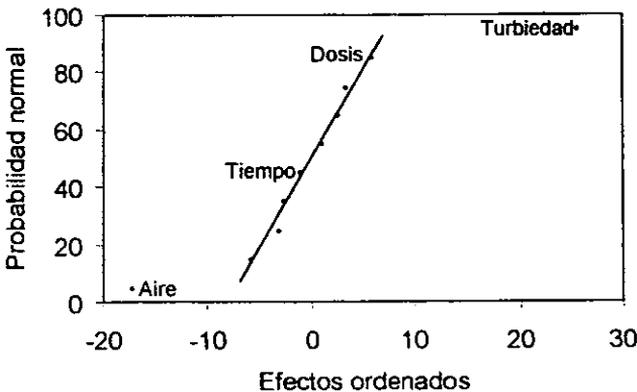
Factor	Efectos
Constante	60.3500
(1) T. Floc.	-1.2500
(2) Aire	-17.2500
(3) Dosis	5.7500
(4) Turb.	25.5000
1 por 2	3.2500
1 por 3	-2.7500
1 por 4	2.5000
2 por 3	-3.2500
2 por 4	1.0000
3 por 4	-6.0000

Con la finalidad de analizar los efectos, se ordenaron de mayor a menor como se muestran en la Tabla 3.8 y se calculó la probabilidad normal para cada uno de ellos. Estos valores se graficaron para visualizar que efectos son los de mayor significancia (Gráfica 3.1).

**Tabla 3.8 Efectos ordenados**

Orden (j)	Factor	Efecto	$(j - 0.5) / 10$
10	(4) Turb.	25.5000	0.95
9	(3) Dosis	5.7500	0.85
8	1 por 2	3.2500	0.75
7	1 por 4	2.5000	0.65
6	2 por 4	1.0000	0.55
5	(1) T. Floc.	-1.2500	0.45
4	1 por 3	-2.7500	0.35
3	2 por 3	-3.2500	0.25
2	3 por 4	-6.0000	0.15
1	(2) Aire	-17.2500	0.05

Los efectos que son despreciables se distribuyen normalmente con media cero y tienden a ubicarse a lo largo de una línea recta, mientras que los efectos significativos tendrán medias distintas a cero y no se ubicarán en la línea recta<sup>15</sup>.

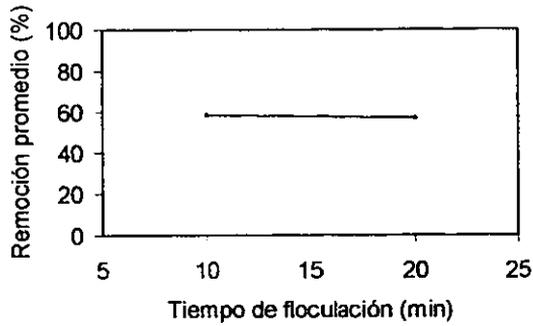


**Gráfica 3.1 Efectos ordenados**

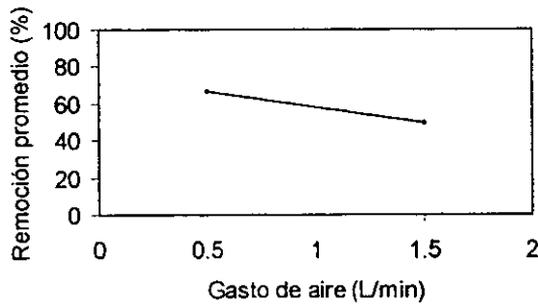
Los efectos significativos que se observan en la Gráfica 3.1 son los originados por la turbiedad inicial del agua y el gasto de aire (gradiente de velocidad). El signo del efecto indica si la variable de respuesta crece o decrece al aumentar el valor de la variable independiente. En este caso se obtuvo que:

- a) a mayor turbiedad inicial del agua mayor eficiencia de remoción.
- b) a mayor gasto de aire (gradiente de velocidad) menor eficiencia de remoción.

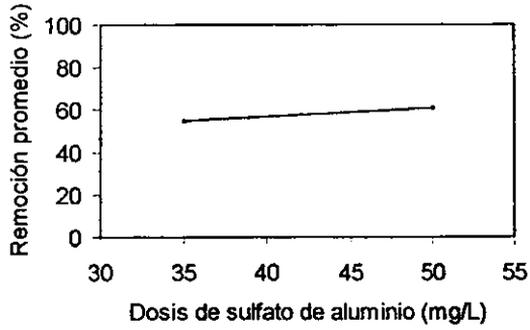
Lo anterior también puede ser observado en las gráficas de remoción promedio.



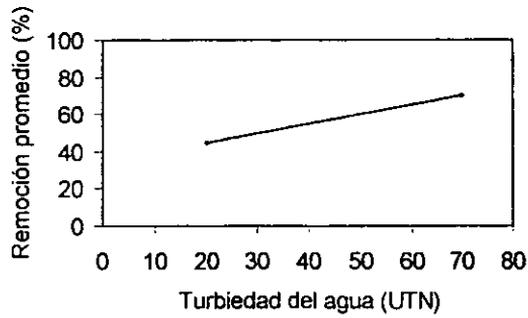
Gráfica 3.2 Remoción promedio obtenida con respecto a la variable 1



Gráfica 3.3 Remoción promedio obtenida con respecto a la variable 2



**Gráfica 3.4 Remoción promedio obtenida con respecto a la variable 3**



**Gráfica 3.5 Remoción promedio obtenida con respecto a la variable 4**

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. Conclusiones

1. El proceso de floculación se puede realizar empleando el equipo floculador accionado con aire, obteniendo eficiencias de remoción de turbiedad hasta del 82%.
2. Las variables que afectaron mayormente la eficiencia de remoción de la turbiedad fueron la turbiedad inicial del agua y el gasto de aire en ese orden de importancia.
3. Este equipo permite obtener mejores eficiencias de remoción de turbiedad cuando la turbiedad inicial del agua es alta.
4. Las condiciones óptimas de operación que permitieron alcanzar la eficiencia máxima fueron: tiempo de floculación de 10 minutos, gasto de aire de 0.5 L/min (gradiente promedio de  $21 \text{ seg}^{-1}$ ), dosis de sulfato de aluminio de 50 mg/L y turbiedad inicial del agua de 70 UTN.
5. Las secciones del equipo floculador por las que circula el agua deben tener las dimensiones apropiadas para evitar que se generen gradientes altos ya que estos hacen que disminuya la eficiencia de remoción.

### 4.2 Recomendaciones

1. Continuar la investigación con la construcción de un equipo que presente gradientes más uniformes en su interior, para lograr que mejore la eficiencia del equipo.
2. Estudiar la influencia radial del equipo para establecer la relación óptima que debe existir el diámetro del equipo y la sección del tanque o cámara de floculación.
3. Realizar pruebas a mayor escala, para corroborar la eficiencia del equipo.

**REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

1. NALCO. Manual del Agua. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones. Tomo I. Mc. Graw Hill. 1989.
2. CEPIS. Programa regional HPE/OPS/CEPIS de mejoramiento de la calidad del agua para consumo humano. Ciclo: tratamiento, Serie: Filtración rápida, Manual III: Teoría. Julio, 1992.
3. Potencial zeta: Un curso Completo en 5 minutos. Zeta meter, Inc.
4. Everything you want to know about Coagulation & Flocculation, Zeta Meter, Inc., 1993.
5. IMTA. Manual de evaluación de plantas potabilizadoras. Coordinación de tratamiento y calidad del agua. Subcoordinación de potabilización. 1998.
6. HARRIS, H.S.; KAUFMAN, W.J.; KRONE, R.B. Orthokinetic flocculation in water purification. Journal of the Sanitary Engineering Division, Proceedings, ASCE, Dec. 1966.
7. HUDSON, H.E. Physical aspects of flocculation. Journal of the American Water Works Association, Jul. 1965.
8. TEKIPPE & HAM. Velocity-gradient paths in coagulation. Journal AWWA. Jul. 1971.
9. VILLEGAS & LETTERMAN. Optimizing flocculator power input. Journal of the Environmental Engineering Division Proceedings, ASCE, 1976.
10. CAMP, T.R. Flocculation and flocculation basins. Trans. ASCE, Vol. 120, Feb. 1955.

11. SOTELO A.G. Hidráulica General. Volumen I: Fundamentos. Limusa. México, 1993.
12. ARBOLEDA J. Teoría y práctica de la purificación del agua. Colombia, 1990.
13. REYNOLDS T.D. Unit Operations and Processes in Environmental Engineering. USA, 1982.
14. IMTA. Transporte de contaminantes en cuencas y embalses HC-9617. Coordinación de tecnología hidráulica. Subcoordinación de hidráulica ambiental. Diciembre, 1996.
15. MONTGOMERY, Douglas. Diseño y análisis de experimentos. México D.F., Agosto 1998.

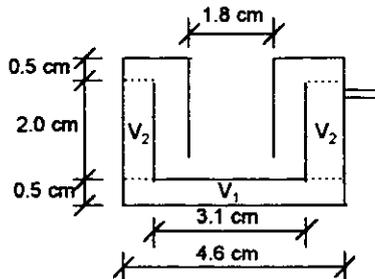
## ANEXO I. Diseño del equipo 4

### 1. Volumen de la cámara

Si se propone un diámetro del tubo principal de 3.1 cm ( $r = 1.55$  cm), entonces:

$$V_c = \frac{4}{3} \pi (1.55)^3 = 15.60 \text{ cm}^3$$

Proponiendo las siguientes dimensiones para la cámara, se tiene:



**Figura I.1 Dimensiones de la cámara de aire del equipo floculador**

$$V_1 = \pi (2.3 \text{ cm})^2 (0.5 \text{ cm}) = 8.31 \text{ cm}^3$$

$$V_2 = \pi [(2.3 \text{ cm})^2 - (1.65 \text{ cm})^2] (2.0 \text{ cm}) = 16.13 \text{ cm}^3$$

$$V_T = V_1 + V_2 = 8.31 + 16.13 = 24.44 \text{ cm}^3$$

Como  $24.44 \text{ cm}^3 > 15.60 \text{ cm}^3$  se aceptan las dimensiones propuestas. Es decir, la cámara con estas dimensiones puede almacenar el aire requerido para formar la burbuja.

### 2. Volumen de agua desplazada

Como la burbuja se forma a la salida del sifón esta tiene inicialmente un diámetro de 1.8 cm y conforme asciende se ensancha hasta cubrir el diámetro del tubo

principal. Para cuestiones de calculo se considerará un diámetro promedio de la burbuja:

$$\phi \text{ prom. burbuja} = \frac{1.8 \text{ cm} + 3.1 \text{ cm}}{2} = 2.45 \text{ cm} \quad \therefore \quad r = 1.225 \text{ cm}$$

y el volumen de agua desplazada será:

$$Vd = \pi (1.225 \text{ cm})^2 (14 \text{ cm}) = 66 \text{ cm}^3$$

3. El tiempo entre la emisión de una y otra burbuja se calcula de acuerdo a lo indicado en la tabla siguiente:

**Tabla I.1 Cálculo del tiempo entre la salida de una y otra burbuja**

Q <sub>AIRE</sub>		V <sub>c</sub> (cm <sup>3</sup> ) (3)	TIEMPO (s) (4) = (3) / (2)
(L/min) (1)	(cm <sup>3</sup> /s) (2)		
0.5	8.33	24.44	2.933
1.0	16.67	24.44	1.466
1.5	25.00	24.44	0.978
2.0	33.33	24.44	0.733

4. El gasto de agua desplazada será entonces:

**Tabla I.2 Cálculo del gasto de agua desplazada**

Q <sub>AIRE</sub> (L/min) (1)	V <sub>d</sub> (cm <sup>3</sup> ) (2)	TIEMPO (s) (3)	Q (cm <sup>3</sup> /s) (4) = (2) / (3)
0.5	66	2.933	22.50
1.0	66	1.466	45.02
1.5	66	0.978	67.48
2.0	66	0.733	90.04

5. Y por lo tanto los gradientes de velocidad son:

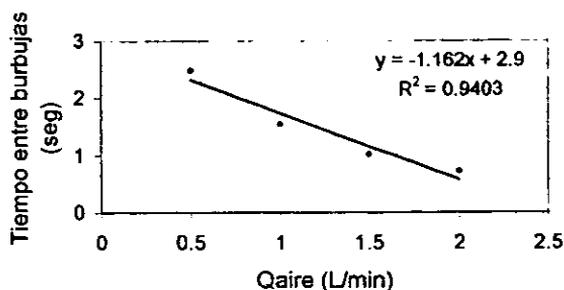
**Tabla I.3 Cálculo de los gradientes de velocidad**

Q <sub>AIRE</sub> (L/min)	Punto	a (cm <sup>2</sup> )	Q (cm <sup>3</sup> /s)	H (cm)	L* (cm)	v (cm <sup>3</sup> )	G (s <sup>-1</sup> )
(1)	(2)	(3)	(4)	(5) = $\frac{1}{1962} \left( \frac{(4)}{0.6(3)} \right)^2$	(6)	(7)=(3)(6)	(8) = $\sqrt{\frac{(5)(1 \times 10^{-3})(4)}{(1.03 \times 10^{-8})(7)}}$
0.5	A	14.58	22.50	0.00337	3	43.74	13
	B	19.32		0.00192	0.95	18.35	15
	C	7.55		0.01258	14	105.70	16
	D	25.66		0.00109	11.8	302.79	3
	E	40.48		0.00044	0.1	4.05	16
1.0	A	14.58	45.02	0.01350	3	43.74	37
	B	19.32		0.00769	0.95	18.35	43
	C	7.55		0.05037	14	105.70	46
	D	25.66		0.00436	11.8	302.79	8
	E	40.48		0.00175	0.1	4.05	44
1.5	A	14.58	67.48	0.03034	3	43.74	68
	B	19.32		0.01727	0.95	18.35	79
	C	7.55		0.11317	14	105.70	85
	D	25.66		0.00979	11.8	302.79	15
	E	40.48		0.00393	0.1	4.05	81
2.0	A	14.58	90.04	0.05402	3	43.74	105
	B	19.32		0.03075	0.95	18.35	122
	C	7.55		0.20148	14	105.70	130
	D	25.66		0.01743	11.8	302.79	23
	E	40.48		0.00700	0.1	4.05	124

\* Nota: L se refiere a la longitud o espesor de la sección.

## 6. Gradientes de velocidad operacionales

Para calcular los gradientes de operación se procedió a calibrar el equipo, es decir, medir el tiempo entre la salida de una y otra burbuja para los diferentes gastos de aire, así como determinar el volumen de agua desplazada. Los valores promedio obtenidos como resultado de cronometrar el tiempo entre la salida de una y otra burbuja para los diferentes gastos de aire fueron: 2.49, 1.55, 1.02 y 0.73 segundos para 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 L/min de aire respectivamente. Estos valores se graficaron y se obtuvo la recta de regresión (Gráfica I.1).



**Gráfica 1.1 Gasto de aire contra tiempo entre burbujas**

Sustituyendo los valores de 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 L/min en la ecuación de regresión se obtuvieron tiempos de 2.32, 1.74, 1.16 y 0.58 segundos respectivamente.

Se midió el volumen de agua desplazada cerrando los orificios del tubo distribuidor con cinta canela y se fijó una regla graduada a la pared del tubo. El valor promedio en que se incrementó el tirante de agua por el ascenso de la burbuja fue de 1.9 cm que multiplicado por el área del tubo ( $34.21 \text{ cm}^2$ ) da un volumen de agua desplazada de  $65 \text{ cm}^3$ . Los gastos de operación para los diferentes flujos de aire se presentan en la Tabla 1.4.

**Tabla 1.4 Cálculo de los gastos de operación**

$Q_{\text{AIRE}}$ (L/min)	$V_d$ ( $\text{cm}^3$ )	Tiempo (s)	$Q_{\text{AGUA}}$ ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )
0.5	65	2.32	28.02
1.0	65	1.74	37.36
1.5	65	1.16	56.03
2.0	65	0.58	112.07

Y por lo tanto los gradientes de operación serán:

**Tabla I.5 Cálculo de los gradientes de velocidad de operación**

Q <sub>AIRE</sub> (L/min)	Punto	a (cm <sup>2</sup> )	Q (cm <sup>3</sup> /s)	H (cm)	L (cm)	v (cm <sup>3</sup> )	G (s <sup>-1</sup> )	Gprom.* (s <sup>-1</sup> )
0.5	A	14.58	28.02	0.00523	3	43.73	18	21
	B	19.32		0.00298	0.95	18.35	21	
	C	7.55		0.01951	14	105.67	23	
	D	25.66		0.00169	11.8	302.78	4	
	E	40.48		0.00068	0.1	4.05	22	
1.0	A	14.58	37.36	0.00930	3	43.73	28	32
	B	19.32		0.00529	0.95	18.35	33	
	C	7.55		0.03469	14	105.67	35	
	D	25.66		0.00300	11.8	302.78	6	
	E	40.48		0.00121	0.1	4.05	33	
1.5	A	14.58	56.03	0.02092	3	43.73	52	59
	B	19.32		0.01191	0.95	18.35	60	
	C	7.55		0.07802	14	105.67	64	
	D	25.66		0.00675	11.8	302.78	11	
	E	40.48		0.00271	0.1	4.05	61	
2.0	A	14.58	112.07	0.08368	3	43.73	146	167
	B	19.32		0.04764	0.95	18.35	170	
	C	7.55		0.31214	14	105.67	181	
	D	25.66		0.02701	11.8	302.78	31	
	E	40.48		0.01085	0.1	4.05	172	

\* El gradiente promedio se calculó descartando el que se da en el punto D.

**ANEXO II. Dosis óptima de sulfato de aluminio para turbiedades de 20 y 70 UTN****Tabla II.1 Determinación de la dosis óptima de sulfato para 20 UTN**

SOLUCIÓN SINTÉTICA		COAGULANTE		CONDICIONES DE LA PRUEBA	
Turbiedad: 20 UTN Color: 144 PtCo		Nombre: Sulfato de Aluminio Concentración: 1% (10 mg/ml)		Volumen Jarra: 2000 ml M. Rápida: 10 seg a 300 RPM. M. Lenta: 20 min a 30 RPM. Sedimentación: 20 min.	
No. JARRA	DOSIS COAG. (mg/L)	COAG./JARRA (ml)	TURBIEDAD (UTN)	COLOR (PtCo)	
1	20	4	2.0	18	
2	25	5	1.2	8	
3	30	6	1.15	8	
4	35	7	0.75	3	
5	40	8	1.60	15	
6	45	9	1.05	8	
Dosis óptima: 35 mg/L					

Nota: Para la preparación del agua sintética se pesaron 0.3 g/L de barro negro y midieron 5 mg/L de sustancias húmicas.

**Tabla II.2 Determinación de la dosis óptima de sulfato para 70 UTN**

SOLUCIÓN SINTÉTICA		COAGULANTE		CONDICIONES DE LA PRUEBA	
Turbiedad: 70 UTN Color: 497 PtCo		Nombre: Sulfato de Aluminio Concentración: 1% (10 mg/ml)		Volumen Jarra: 2000 ml M. Rápida: 10 seg a 300 RPM. M. Lenta: 20 min a 30 RPM. Sedimentación: 20 min.	
NO. JARRA	DOSIS COAG. (mg/L)	COAG./JARRA (ml)	TURBIEDAD (UTN)	COLOR (PtCo)	
1	30	6	38	4.2	
2	35	7	36	4.3	
3	40	8	106	16	
4	45	9	15	1.75	
5	50	10	12	1.63	
6	55	11	15	1.8	
Dosis óptima: 50 mg/L					

Nota: Para la preparación del agua sintética se pesaron 0.8 g/L de barro negro y midieron 12 mg/L de sustancias húmicas.

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA

### ANEXO III. Comprobación de la idoneidad del modelo

El paquete de computo STATISTICA da tres opciones para obtener el modelo matemático (no incluir interacciones entre factores, incluir la interacción entre dos factores e incluir la interacción entre tres factores). Para probar la adecuación del modelo se realizó una comparación entre los tres modelos obtenidos. Los coeficientes de regresión de cada modelo se muestran en la Tabla III.1.

**Tabla III.1 Coeficientes de regresión**

Factor	Sin interacción (Modelo 1)	Interacción entre dos factores (Modelo 2)	Interacción entre tres factores (Modelo 3)
Constante	40.2333	-13.8583	63.7417
(1) T. Floc.	-0.1250	0.3333	-1.7800
(2) Aire	-17.2500	-10.3833	-95.6333
(3) Dosis	0.3833	2.0867	1.0867
(4) Turb.	0.5100	1.0000	-0.6300
1 por 2		0.6500	3.2733
1 por 3		-0.0367	-0.0420
1 por 4		0.0100	0.0507
2 por 3		-0.4333	0.7467
2 por 4		0.0400	1.8400
3 por 4		-0.0160	0.0040
1*2*3			-0.0067
1*2*4			-0.0520
1*3*4			0.0003
2*3*4			-0.0240

Con estos coeficientes de regresión se plantearon las ecuaciones matemáticas y se calcularon los porcentajes de remoción esperados. Estos se muestran en la Tabla III.2.

Tabla III.2 Comparación entre la remoción observada y las esperadas

Prueba	Valor observado	Valores esperados		
		Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
1	55.0	54.0	51.3	75.9
2	43.0	52.7	47.1	84.5
3	24.0	36.7	33.1	46.4
4	35.0	38.5	35.3	75.0
5	67.0	59.7	69.1	97.6
6	52.0	58.5	59.3	108.4
7	42.0	42.5	44.3	71.0
8	43.0	41.2	41.1	100.9
9	71.0	79.5	79.3	141.2
10	79.0	78.2	80.1	214.7
11	67.0	62.2	63.1	135.7
12	66.0	61.0	70.3	203.2
13	82.0	85.2	85.1	179.4
14	83.0	84.0	80.3	277.6
15	60.0	68.0	62.3	158.9
16	57.0	66.7	64.1	250.1

Los valores de la Tabla III.2 que se encuentran sombreados son los que se aproximan más a los valores observados, por lo que se concluye que el modelo estadístico lineal que incluye la interacción entre dos factores (modelo 2) es el que mejor se ajusta para describir los resultados obtenidos.

La ecuación matemática de este modelo está dada por la siguiente expresión:

$$R(\%) = -13.8583 + 0.3333x_1 - 10.3833x_2 + 2.0867x_3 + x_4 + 0.65x_1x_2 - 0.0367x_1x_3 \\ + 0.01x_1x_4 - 0.4333x_2x_3 + 0.04x_2x_4 - 0.016x_3x_4$$

Donde:

R(%)= Porcentaje de remoción de la turbiedad.

X<sub>1</sub>= Tiempo de floculación (min).

X<sub>2</sub>= Gasto de aire inyectado al equipo (L/min).

X<sub>3</sub>= Dosis de sulfato de aluminio (mg/L).

X<sub>4</sub>= Turbiedad inicial del agua (UTN).

### III.1 Suposición de normalidad

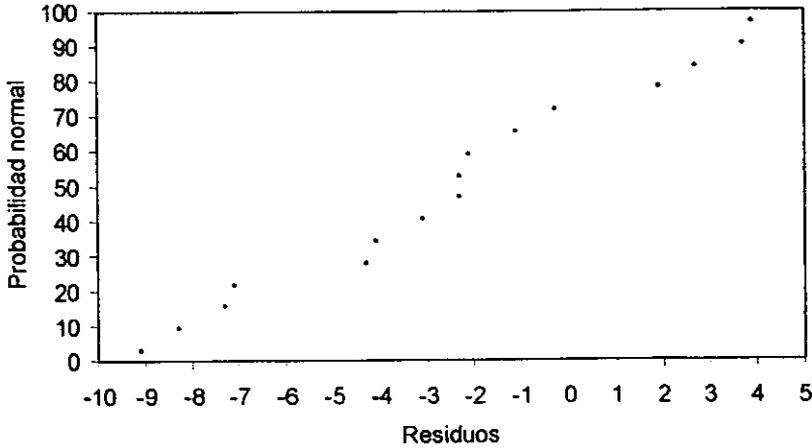
Una forma útil para comprobar la suposición de normalidad consiste en construir una gráfica de probabilidad normal de los residuos. Para construir la gráfica deben disponerse los residuos en orden ascendente y graficar el  $k$ -ésimo de estos residuos ordenados contra su punto de probabilidad acumulada. Si la distribución de los errores es normal, esta gráfica parecerá una línea recta.

En la tabla III.3 se presentan los residuos ordenados de menor a mayor con su respectiva probabilidad. Los residuos se calcularon como el valor observado menos el valor esperado.

**Tabla III.3 Residuos ordenados**

$j$	Residuo	$(j-0.5)/16$
1	-9.1	3
2	-8.3	9
3	-7.3	16
4	-7.1	22
5	-4.3	28
6	-4.1	34
7	-3.1	41
8	-2.3	47
9	-2.3	53
10	-2.1	59
11	-1.1	66
12	-0.3	72
13	1.9	78
14	2.7	84
15	3.7	91
16	3.9	97

La representación gráfica de los residuos contra su probabilidad normal (Gráfica III.1) muestra una distribución ligeramente sesgada, con un extremo izquierdo más largo que el derecho. Sin embargo, esta gráfica no es demasiado anormal y no debe ser motivo de preocupación pues una desviación moderada de la normalidad no necesariamente implica una violación seria a las suposiciones. También se dice que el análisis de variancia es consistente o robusto ante la suposición de normalidad porque la prueba  $F$  se ve afectada muy poco en este caso.

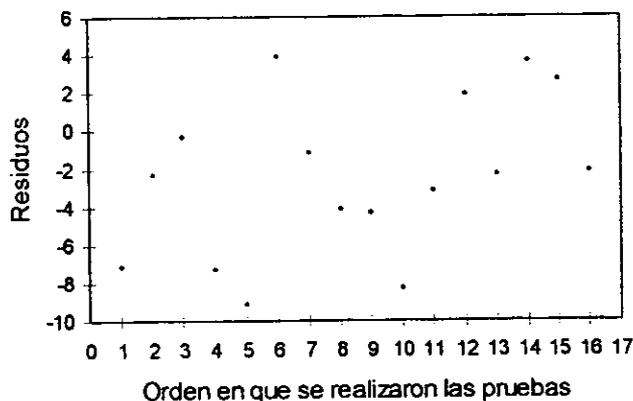


**Gráfica III.1 Probabilidad normal de los residuos**

### III.2 Suposición de independencia

Una forma para detectar si la suposición de independencia de los residuos ha sido violada, consiste en graficar los residuos contra el orden del tiempo en el que se recopilaron los datos. Si la gráfica muestra cierta tendencia o correlación significa que no se cumple la suposición de independencia, lo cual es un problema serio y difícil de corregir. Un paso importante para asegurar la independencia es realizar un procedimiento apropiado de aleatorización.

En la gráfica III.2 se observa que no existe ninguna razón para suponer que no se cumple la suposición de independencia, puesto que los puntos no siguen una tendencia definida.



Gráfica III.2 Residuos contra tiempo

### III.3 Prueba estadística para igualdad de variancia

Para diagnosticar la igualdad en las variancias, se han propuesto algunas pruebas estadísticas. Éstas son pruebas formales para la hipótesis:

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_a^2$$

$H_1$ : lo anterior no es cierto al menos para una  $\sigma_i^2$

Una técnica ampliamente usada es la prueba de Bartlett. Este procedimiento consiste en calcular una estadística cuya distribución muestral es, aproximadamente, ji cuadrada con  $a-1$  grados de libertad cuando las  $a$  muestras aleatorias provienen de poblaciones normales independientes. La estadística de prueba es:

$$X_0^2 = 2.3026 \frac{q}{c}$$

Donde

$$q = (N - a) \log_{10} S_p^2 - \sum_{i=1}^a (n_i - 1) \log_{10} S_i^2$$

$$c = 1 + \frac{1}{3(a-1)} \left( \sum_{i=1}^a (n_i - 1)^{-1} - (N - a)^{-1} \right)$$

$$S_p^2 = \frac{\sum_{i=1}^a (n_i - 1) S_i^2}{N - a}$$

y  $S_i^2$  es la variancia muestral de la  $i$ -ésima población.

El valor de  $q$  es grande cuando hay una gran diferencia entre las variancias muestrales  $S_i^2$  y es igual a cero si todas las  $S_i^2$  son iguales. Por lo tanto, debe rechazarse  $H_0$  para valores grandes de  $X_0^2$ , en otras palabras, se rechaza  $H_0$ , sólo si:

$$X_0^2 > X_{\alpha, a-1}^2$$

en donde  $X_{\alpha, a-1}^2$  es el punto  $\alpha$  porcentual superior de la distribución ji cuadrada con  $a-1$  grados de libertad.

En la Tabla III.4 se presentan los cálculos de la estadística de prueba.

**Tabla III.4 Análisis de igualdad de variancia (Prueba de Bartlett)**

VARIABLE	Nivel	REMOCIÓN (%)								Media	Variancia	$S_p^2$	q	c	$X_0^2$
		1	2	3	4	5	6	7	8						
Tiempo de Floculación	10	55	24	67	42	71	87	82	60	58.50	332.86	319.39	0.0054	1.07	0.012
	20	43	35	52	43	79	66	83	57	57.25	305.93				
Aire	0.5	55	43	67	52	71	79	82	83	66.50	226.29	234.82	0.0040	1.07	0.009
	1.5	24	35	42	43	67	66	60	57	49.25	243.36				
Dosis de Sulfato	35	55	43	24	35	71	79	67	66	55.00	371.71	310.39	0.1210	1.07	0.260
	50	67	52	42	43	82	83	60	57	60.75	249.07				
Turbiedad	20	55	43	24	35	67	52	42	43	45.13	170.13	134.05	0.2285	1.07	0.491
	70	71	79	67	66	82	83	60	57	70.63	97.98				

Como los valores de  $X_0^2$  obtenidos para cada una de las variables son mucho menores que  $X_{0.05, 7}^2 = 14.07$  no se rechaza la hipótesis nula, por lo que se concluye que las variancias son homogéneas.