

ENSAYO MODIFICADO DE JARRAS PARA LA SELECCIÓN DE PARÁMETROS DE DISEÑO DE FLOCULACIÓN Y SEDIMENTACIÓN

*Jorge Arturo Pérez Parra
Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos
Universidad Nacional de Colombia, Medellín*

RESUMEN

La selección de los parámetros de diseño de los diferentes reactores que conforman una planta de potabilización de agua, ha sido tradicionalmente realizada por los ingenieros proyectistas con base en las recomendaciones de tipo general que se encuentran en los textos especializados en el tema, sin tener en cuenta la calidad del agua de la fuente de abastecimiento. En este artículo se propone el empleo de una metodología alterna consistente en la utilización de los resultados obtenidos en el ensayo modificado de jarras, con el objeto de relacionar la calidad del agua cruda con los parámetros de diseño de las unidades de floculación y sedimentación, presentando los resultados obtenidos en 11 fuentes de agua diferentes, los cuales confirman que la escogencia de los parámetros que optimizan los procesos están íntimamente ligados con la calidad del agua que se va a acondicionar.

ABSTRACT

Traditionally, the practice of selection of design parameters of water treatment plants is based upon general recommendation found in textbooks which ignores the specific characteristics of the supply water quality. We propose an alternative methodology for the design based on the modified jar test. Results of 11 cases are presented to illustrate the method and verify the results. The main conclusion is the quality of the water to be is of fundamental importance in the design of treatment plants.

1. INTRODUCCION

Tradicionalmente el ensayo modificado de jarras ha sido utilizado como una herramienta en la operación de plantas de potabilización de agua para la determinación de las variables químicas del proceso de coagulación tales como selección del tipo y dosis óptimas de coagulantes, pH óptimo de coagulación, concentración de la solución de aplicación y evaluación de la eficiencia del empleo de ayudantes de floculación.

Estudios realizados entre otros investigadores por Villegas, Letterman, Lay, Hudson, Singley,

Camp y Conkling, permiten determinar la influencia de la energía disipada, expresada como gradiente de velocidad, en los procesos de clarificación, utilizando el ensayo de prueba de jarras con el fin de evaluar y caracterizar la eficiencia de los procesos de floculación y sedimentación. Con base en estas investigaciones, el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), propone una metodología para la ejecución del citado ensayo introduciendo algunas variaciones en el equipo tradicionalmente utilizado en el laboratorio de control en las plantas, con el objeto primordial de evaluar los procesos en plantas de potabilización en operación.

La presente investigación tiene como objetivo específico encontrar las relaciones entre la calidad del agua que se va a acondicionar o agua cruda y los parámetros de diseño de las unidades de floculación y sedimentación, empleando la metodología del CEPIS e introduciendo algunas modificaciones en la ejecución del ensayo. El estudio es realizado utilizando 11 fuentes diferentes de agua, haciendo en dos de ellas en particular ensayos en condiciones de alta y baja turbiedad, con el propósito de establecer las características dentro de un ciclo hidrológico completo que abarque condiciones de invierno y verano, y definir de esta forma cuales son los parámetros que deben ser utilizados en el diseño de los reactores en que se realizan los citados procesos.

En síntesis, se considera que el ensayo modificado de jarras representa una valiosa herramienta para ser utilizada por los ingenieros en el diseño de plantas de potabilización, ya que proporciona elementos para la selección de los parámetros de diseño de las unidades de floculación y sedimentación utilizando los resultados obtenidos a nivel de laboratorio, lo cual permite el reemplazo de la extendida costumbre de emplear parámetros de diseño de tipo general, los cuales no necesariamente conducen a soluciones óptimas, ya que en este caso no es tomada en cuenta la calidad del agua de la fuente de abastecimiento.

2. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE ENSAYO DE JARRAS

El equipo básico para realizar el ensayo, está compuesto por un sistema de agitación múltiple de seis paletas que mezcla el agua depositada en recipientes cilíndricos de vidrio, dentro de los cuales son acoplados estatores (la Figura 1 muestra un esquema del equipo requerido).

La descripción de los diferentes componentes se muestra a continuación.

2.1 Sistema de agitación

La variable más importante en el ensayo de jarras es la intensidad de la agitación, la cual se expresa como gradiente de velocidad; para lograr el efecto de agitación en el ensayo se utilizan paletas accionadas mecánicamente. Con el fin de dar versatilidad al ensayo, la experimentación es efectuada mediante un agitador mecánico comercial, de velocidad variable de 0 a 100 rpm, marca PHIPPS y BIRD, modelo muy utilizado en el medio.

2.2 Recipientes de agitación

Se utilizan vasos de vidrio de forma circular, de 2000 ml de capacidad.

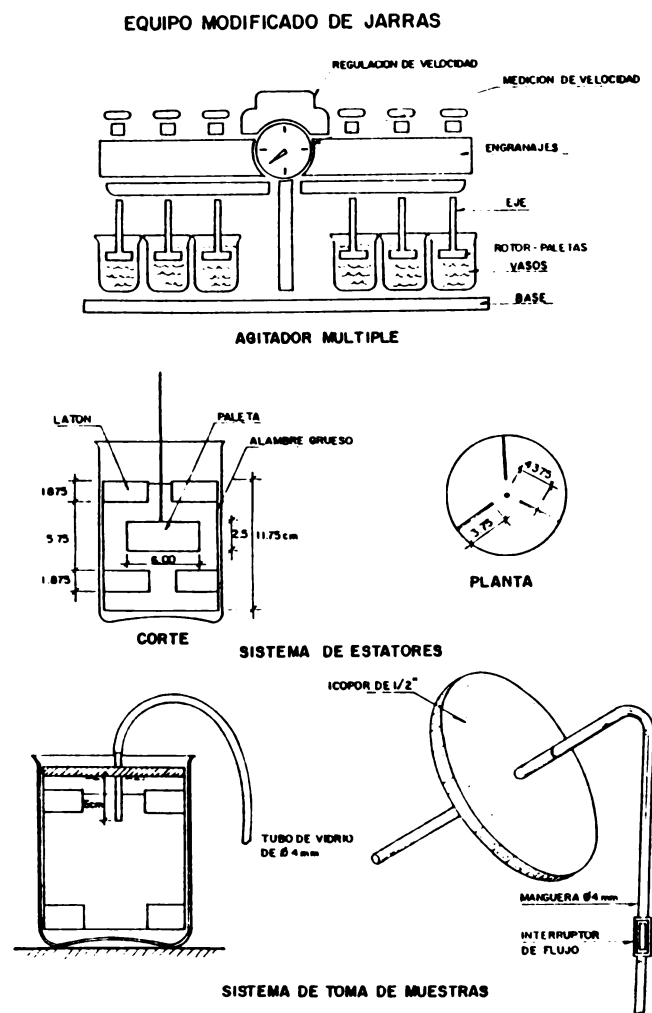
2.3 Sistemas de estatores

Para obtener los altos gradientes de velocidad requeridos en el proceso de coagulación y lograr una adecuada dispersión del coagulante en el agua, es necesario elevar la velocidad de rotación al tope del rango de agitación del equipo de agitación, lo cual produce los siguientes efectos adversos que generarían resultados erróneos en el ensayo:

- Formación de vórtice durante el período de agitación, lo cual disminuye el grado de intensidad de la mezcla;
- Movimiento helicoidal de la muestra al suspender la agitación luego de la simulación de floculación, lo cual hace que la sedimentación de los flóculos producidos conserve la misma tendencia de movimiento en el proceso de decantación, situación que aleja el comportamiento del ensayo de la forma como ocurre la sedimentación en el decantador de una planta.

Con el fin de evitar la formación de dicho vórtice y minimizar los efectos adversos anteriores,

se coloca dentro de cada vaso un estator o deflector.



3. COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DEL CONJUNTO AGITADOR

El grado de agitación está caracterizado por el gradiente medio de velocidad, comúnmente denotado por la letra G . Según la Ley de Newton de viscosidad para un líquido Newtoniano, el esfuerzo de cizalladura está denotado por :

$$\tau = \frac{dv}{dz}$$

La potencia por unidad de volumen es proporcional al τ .

$$\frac{P}{V} = \mu \left(\frac{dv}{dz} \right)^2$$

El gradiente de velocidad es la variación de la velocidad en la dirección normal al movimiento del fluido, esto es:

$$G = \frac{dv}{dz}$$

De donde resulta:

$$\frac{P}{V} = \mu \cdot G^2$$

Despejando:

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu \cdot V}} = \sqrt{\frac{\text{kgf} \cdot \text{m} / \text{s}}{(\text{kgf} \cdot \text{s} / \text{m}^2) \cdot \text{m}^3}} [\text{s}^{-1}] \quad (1)$$

La potencia P, puede ser calculada en función de la pérdida de carga en dispositivos de mezcla hidráulica; en equipos de mezcla mecánica la potencia es suministrada por un rotor.

En el equipo de jarras, la potencia teórica está dada por:

$$P = K \cdot a \cdot C_f \cdot N^3 \quad (2)$$

Donde:

K = Coeficiente.

a = Area proyectada de las paletas normal a la dirección tangencial.

C_f = Coeficiente de dragado.

N³ = Velocidad de rotación.

El coeficiente K involucra tanto la forma de las paletas como la geometría del vaso. Ruey, Hudson, Singley y Camp, determinaron los gradientes de velocidad para diferentes velocidades de rotación.

4. LIMITACIONES DEL ENSAYO

Con el equipo descrito anteriormente se busca simular las condiciones en las cuales se efectúan los procesos de coagulación, floculación y sedimentación; sin embargo la prueba de jarras solo constituye una reproducción parcial de los procesos que tienen lugar en el prototipo, entre otras por las siguientes razones:

- Las jarras utilizadas, por su pequeño volumen, el material en que están construidas y su forma circular, en poco se pueden comparar con los tanques reales.
- En los reactores existe un flujo continuo que presenta zonas muertas y cortocircuitos, en cambio en las jarras no hay flujo.

Esto hace que en los primeros la masa de agua esté sometida a un tratamiento desigual, debido a que parte de ella queda retenida durante largo tiempo, mientras que otra parte pasa casi de inmediato. En cambio en la prueba de jarras, el agua queda retenida durante todo el tiempo que dura el ensayo.

- La escala de las jarras no guarda relación con la escala del floc, por cuanto éste se produce a escala natural y, en cambio, las jarras son cientos de veces más pequeñas que los reactores. Por tanto, la proporción entre la escala de turbulencia que se produce en uno y otro caso y el tamaño del floc es diferente, lo cual afecta la velocidad de aglutinamiento de las partículas.
- La dosificación de los coagulantes y la agitación de la masa de agua puede ser mucho mejor controlada en la prueba de jarras que en una planta de tratamiento.

5. APLICACIONES DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO

Los resultados del ensayo pueden ser utilizados para la definición de los siguientes parámetros:

- Tiempo óptimo de floculación. Mediante el ensayo puede ser seleccionado el tiempo de floculación que optimiza el proceso, esto es el tiempo en el cual la turbiedad residual toma un valor mínimo, permitiendo definir el tiempo más adecuado de residencia en el reactor.
- Número de cámaras o zonas de floculación y sus correspondientes gradientes. La relación entre el gradiente de velocidad y el tiempo de floculación que se establece a través del ensayo permite seleccionar el número de zonas de floculación y el gradiente a aplicar en cada una de ellas.
- Velocidad de sedimentación crítica. Mediante la prueba se puede seleccionar la

velocidad de sedimentación de diseño de las unidades de decantación de tal forma que la turbiedad efluente de dichas estructuras sea la adecuada para la alimentación de los filtros.

6. METODOLOGÍA

La técnica del ensayo de jarras ha sido utilizada en la evaluación de plantas en operación; sin embargo se considera posible utilizar el ensayo modificado para determinar los parámetros de diseño de una planta, efectuando pruebas directamente en el agua que va a ser objeto de tratamiento.

En el presente trabajo se incluye la presentación del método, el procedimiento de experimentación y los parámetros obtenidos para el caso de las fuentes seleccionadas las cuales se enumeran a continuación:

- Quebrada La Culebra, municipio de Remedios, Antioquia.
- Quebrada La Chaparrala, municipio de Andes, Antioquia.
- Quebrada La Temperatura, municipio de Zaragoza, Antioquia.
- Quebrada San Juan, corregimiento de Pato, municipio de Zaragoza, Antioquia.
- Quebrada La Pontezuela, municipio de Rionegro, Antioquia.
- Laguna de Ayapel, municipio de Ayapel, Córdoba.
- Río Sinú, municipio de San Pelayo, Córdoba.
- Quebrada La Piedrahíta, municipio de Don Matías, Antioquia.

- Quebrada La Cascada, corregimiento de Santa Elena, municipio de Medellín, Antioquia.
- Quebrada El Guásimo, municipio de La Ceja, Antioquia.
- Quebradas la Chata, La Larga, La Afluente, La Manguala y Despensas (muestra compuesta), corregimiento de San Antonio de Prado, municipio de Medellín, Antioquia.

En el caso de la muestra compuesta de San Antonio de Prado y de la quebrada El Guásimo, municipio de La Ceja, fueron ejecutados ensayos cubriendo valores de alta y baja turbiedad; en los demás casos los ensayos fueron puntuales.

Se ilustra en detalle la aplicación del método con una muestra de agua de la quebrada El Guásimo, para el caso de una turbiedad de 4,5 UTN.

Los ensayos fueron realizados en época de verano, habiendo presentado las siguientes condiciones iniciales:

- Temperatura: 15°C.
- Turbiedad: 4,5 UTN.

Los ensayos de tratabilidad efectuados son en resumen los siguientes:

- Dosis óptima de coagulante (alumbre)
- Tiempo total de floculación
- Gradientes de floculación
- Velocidad de sedimentación crítica.

6.1 Determinación de la dosis optima de coagulante

Se efectuó un ensayo cuyos resultados se muestran a continuación.

Condiciones del ensayo, aplicando como coagulante alumbre tipo B:
Mezcla rápida: 100 rpm, 1 min.

- Floculación: 40 rpm, 30 min, h = 6 cm.
- Sedimentación: Reposo, 30 min, h = 6 cm.

TABLA 1. Dosis óptima de coagulante. Quebrada El Guásimo. $T_0 = 4,5$ UTN.

Jarra	1	2	3	4	5	6
Dosis [mg/l]	3	4	5	6	7	8
Dosis [ml]	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
T_f [UTN]	3,4	2,6	2,4*	3,4	4,1	4,4

* Dosis óptima

En resumen los resultados obtenidos son los siguientes, para una dosis óptima de coagulante (alumbre tipo B) de 5 mg/l:

- Turbiedad del agua cruda, $T_0 = 4,5$ UTN
- Turbiedad final, $T_f = 2,4$ UTN.

6.2 Determinación de los parámetros óptimos de floculación

En este ensayo se determinan el tiempo total de floculación, los gradientes de velocidad en cada zona de floculación y el número de zonas.

TABLA 2. Turbiedades residuales para diferentes gradiente y tiempos de floculación. Quebrada El Guásimo. $T_0 = 4,5$ UTN.

G [s ⁻¹]	7		14		21		28		35		42	
	T_f	T_f/T_0	T_f	T_f/T_0	T_f	T_f/T_0	T_f	T_f/T_0	T_f	T_f/T_0	T_f	T_f/T_0
120	3,7	82,22	3,4	75,56	3,4	75,56	3,1	68,89	2,9	64,44	3,1	68,89
100	3,6	80,00	3,2	71,11	2,8	62,22	3,1	68,89	2,8	62,22	3,0	66,67
80	3,6	80,00	2,7	60,00	2,6	57,78	2,2	48,89	2,2	48,89	1,6	35,56
60	3,4	75,56	2,6	57,78	2,1	46,67	1,9	42,22	1,9	42,22	1,7	37,78
40	3,6	80,00	2,8	62,22	2,1	46,67	1,6	35,56	1,1	24,44	0,9	20,00
20	4,1	91,11	3,8	84,44	3,0	66,67	1,8	40,00	1,7	37,78	1,3	28,89

De la Figura 2 se obtiene el tiempo total de floculación, esto es 30 min.

De la Figura 3 se obtiene el gradiente que produce la mínima turbiedad residual [%], para cada tiempo de floculación. Ver Tabla 3.

TABLA 3 Gradiente de velocidad versus tiempo de floculación.

T [min]	7	14	21	28	35	42
G [s ⁻¹]	60	60	50	40	40	40

El procedimiento consiste en seleccionar un determinado gradiente, en este caso 120, 100, 80, 60, 40 y 20 s⁻¹, y para cada uno de ellos variar el tiempo de floculación. El ensayo se realiza para la dosis óptima de alumbre previamente encontrada.

Las condiciones de mezcla rápida son: 100 rpm, 1 min.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2. Con base en dichos datos se elaboran la Figura 2, turbiedad remanente versus período de floculación y la Figura 3, turbiedad remanente versus gradiente de velocidad.

Con el fin de ajustar los puntos anteriores a una línea, se hace una regresión lineal por el método de los mínimos cuadrados.

Se obtiene entonces :

$$G = \left[\frac{2,40 \times 10^7}{T} \right]^{1/3,6127} \quad (3)$$

Donde:

G = Gradiente de velocidad [s⁻¹].
T = Tiempo de floculación [min].

Con base en la ecuación (3) se elabora la Tabla 4.

TABLA 4 G versus T.

T[min]	7	14	21	28	35	42
G[s^{-1}]	64,41	53,16	47,52	43,88	41,25	39,22

La ecuación (3) da origen a la Figura 4, gradiente de velocidad versus período de floculación.

Con ayuda de la Figura 4 se seleccionan el número de cámaras y los respectivos gradientes:

- Primera cámara
 - Gradiente: 58 s^{-1}
 - Tiempo de floculación: 10 min.
- Segunda cámara.
 - Gradiente: 48 s^{-1}
 - Tiempo de floculación: 10 min.
- Tercera cámara.
 - Gradiente: 43 s^{-1}
 - Tiempo de floculación: 10 min.

6.3 Determinación de los parámetros de sedimentación

En esta etapa de la experimentación se determina la velocidad de sedimentación crítica, así:

- En el laboratorio se reproducen los parámetros óptimos de dosificación, mezcla rápida y mezcla lenta. Finalizando este proceso se toman muestras de agua decantada para diferentes tiempos, t_s , iniciando con 1 min, continuando con 2 min, 3 min y así sucesivamente hasta 6 min, y a una profundidad de $h = 6 \text{ cm}$.
- Se calcula la velocidad de sedimentación, v_s , como la relación entre $h = 6 \text{ cm}$ y el respectivo t_s .

- En escala aritmética se grafican los valores de T_f versus v_s , donde T_f turbiedad final.

Las condiciones del ensayo son:

- Mezcla rápida: 100 rpm, 1 min.
- Floculación:
 - $t_1 = 10 \text{ min}$, $G_1 = 58 \text{ s}^{-1}$
 - $t_2 = 10 \text{ min}$, $G_2 = 48 \text{ s}^{-1}$
 - $t_3 = 10 \text{ min}$, $G_3 = 43 \text{ s}^{-1}$
- Sedimentación. Profundidad toma de muestra $h = 6 \text{ cm}$.

En la Tabla 5 y la Figura 5 se muestran los resultados de la prueba de sedimentación.

TABLA 5 Resultados de la prueba de sedimentación.

t_s [s]	v_s [cm/s]	T_f [UTN]
60	0,1000	3,6
120	0,0500	3,4
180	0,0333	3,4
240	0,0250	3,4
300	0,0200	3,3
360	0,0167	3,2

De la Figura 5 se selecciona una velocidad de sedimentación crítica de $v_{sc} = 0,02 \text{ cm/s}$ ($17,28 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$).

7. RESULTADOS

Utilizando un procedimiento similar al descrito en el numeral anterior se presentan los resultados obtenidos para la quebrada El Guásimo, para el caso de una turbiedad de 80 UTN, los cuales pueden observarse en las Figuras 4, 5, 6 y 7.

Así mismo la muestra compuesta de las quebradas La Chata, La Larga, La Afluente, La Manguala y Despensas, cuya mezcla constituye el influente de la planta de tratamiento del corregimiento de San Antonio de Prado, municipio de Medellín, fue sometida al mismo proce-

dimiento anteriormente descrito, para los casos de baja y alta turbiedad, esto es 9,5 UTN y 268 UTN respectivamente. Los resultados obtenidos se presentan en las Figuras 4, 5, 8, 9, 10 y 11.

Para las demás fuentes evaluadas, como se muestra en el numeral 6, se presenta la relación obtenida entre el gradiente de velocidad y el tiempo de floculación, el tiempo de floculación total y la velocidad de sedimentación crítica o de diseño de los decantadores, resultados que se sintetizan en la Figura 12 y en la Tabla 6.

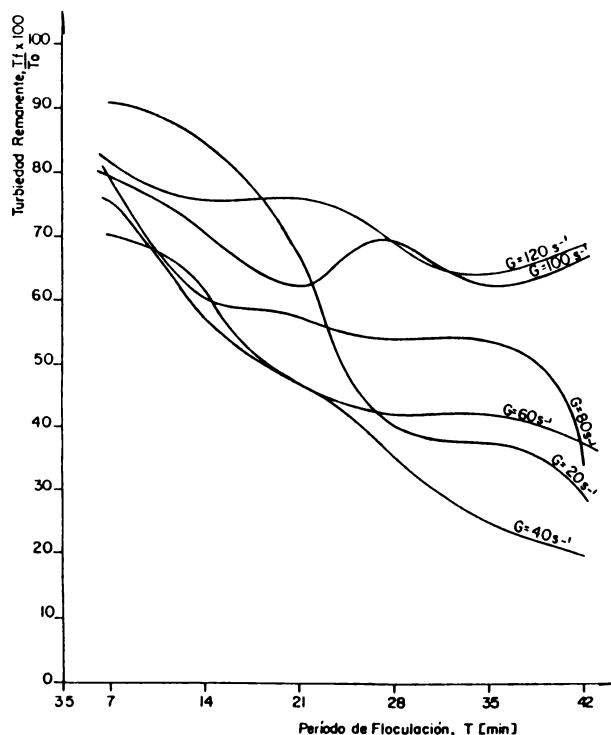


Figura 2 Turbiedad remanente versus período de floculación. Quebrada El Guásimo. $T_o = 4,5$ UTN.

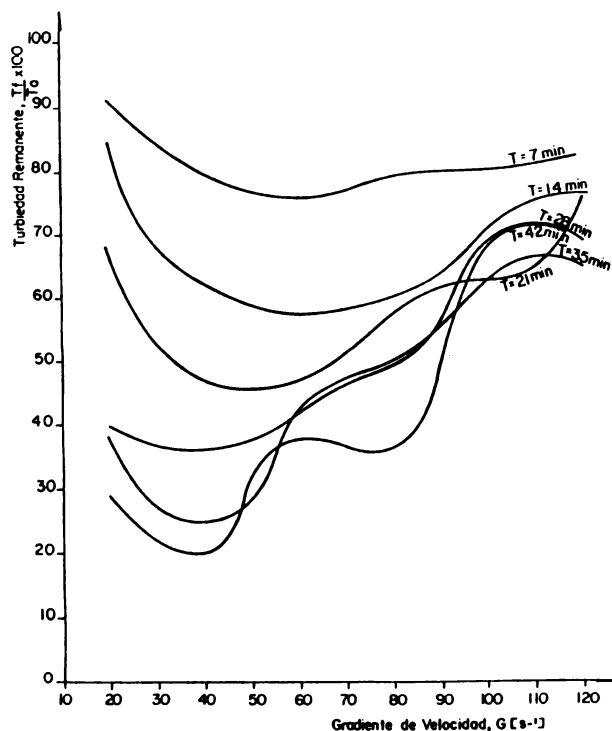


Figura 3 Turbiedad remanente versus período de floculación. Quebrada El Guásimo $T_o = 4,5$ UTN.

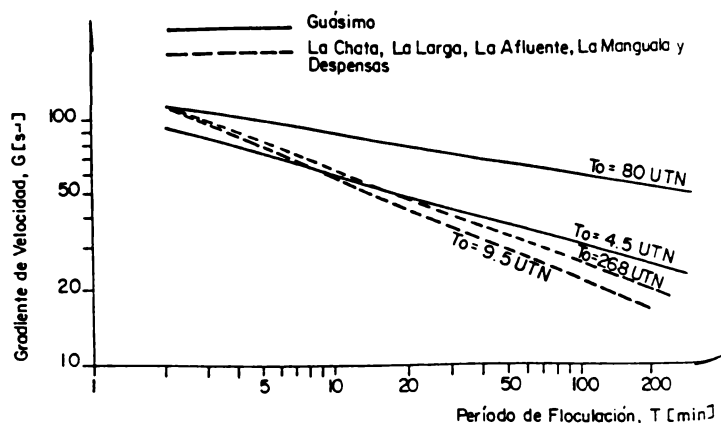


Figura 4 Gradiente de velocidad versus período de floculación. Quebrada El Guásimo. Quebradas La Chata, La Larga, La Afluente, La Manguala y Despensas.

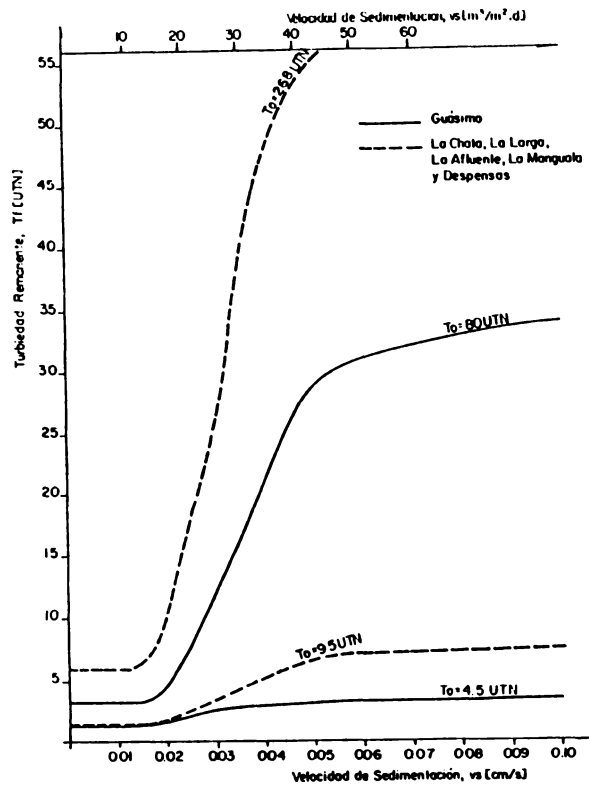


Figura 5 Turbiedad final versus velocidad de sedimentación. Quebrada El Guásimo. Quebradas La Chata, La Larga, La Afluente, La Manguala y Despensas.

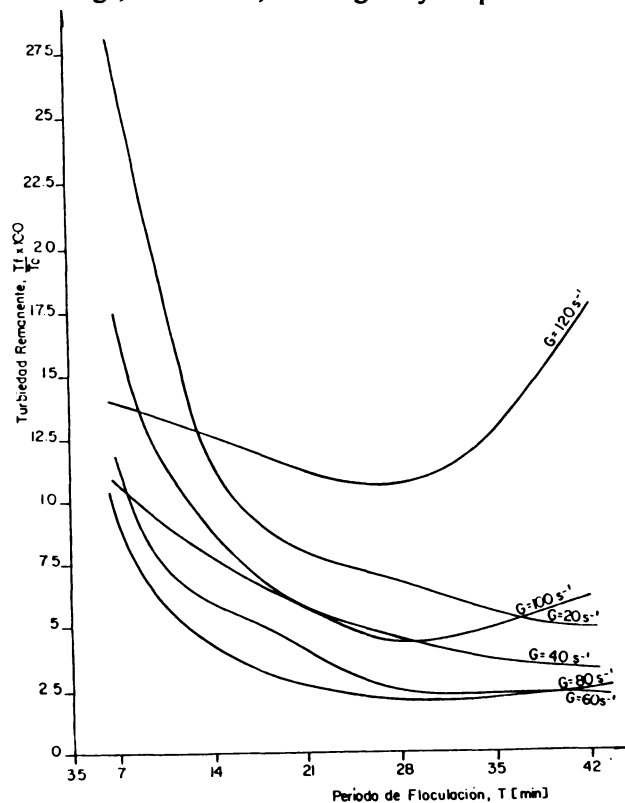


Figura 6 Gradiente de velocidad versus periodo de floculación. Quebrada El Guásimo. $T_o = 80$ UTN.

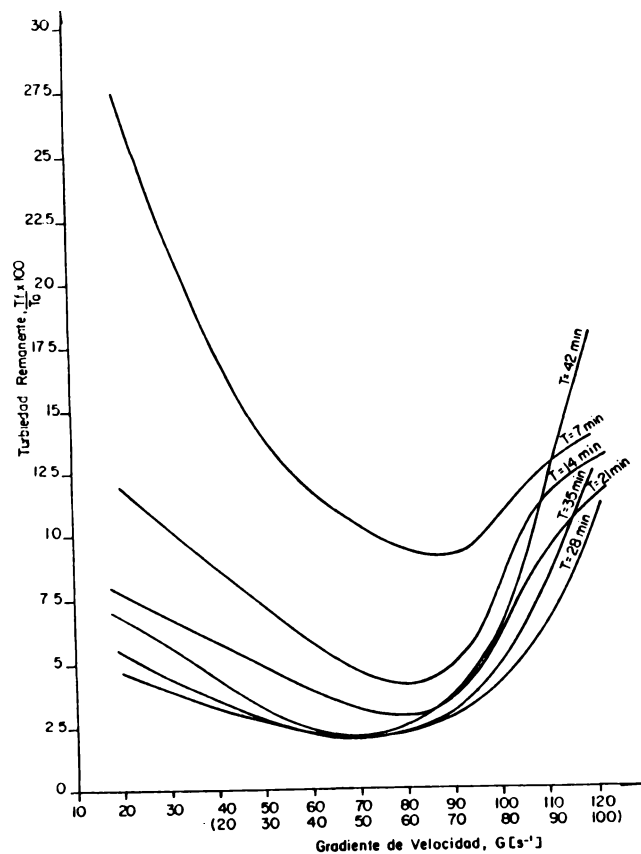


Figura 7 Turbiedad remanente versus gradiente de velocidad. Quebrada El Guasimo. $T_0 = 80$ UTN.

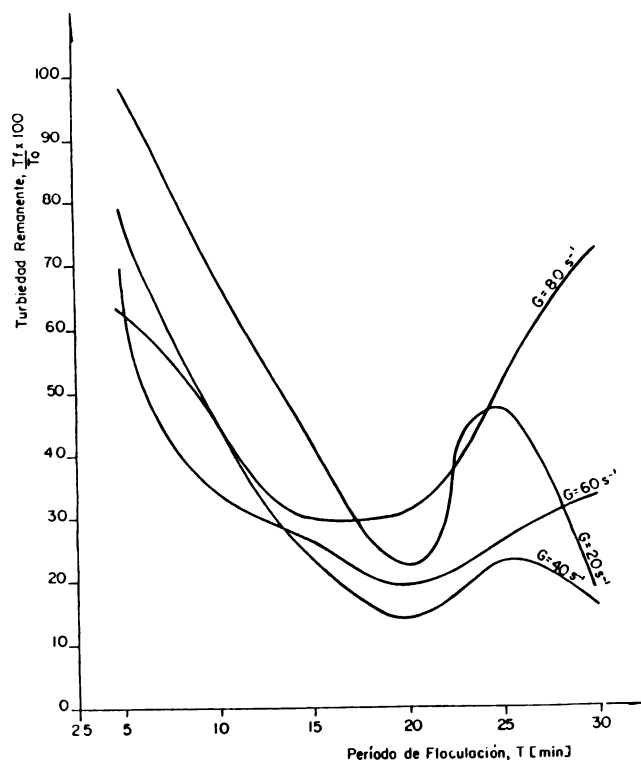


Figura 8 Turbiedad remanente versus período de floculación. Quebradas La Chata, La Larga, La Afluente, La Manguala y Despensas. $T_0 = 9,5$ UTN.

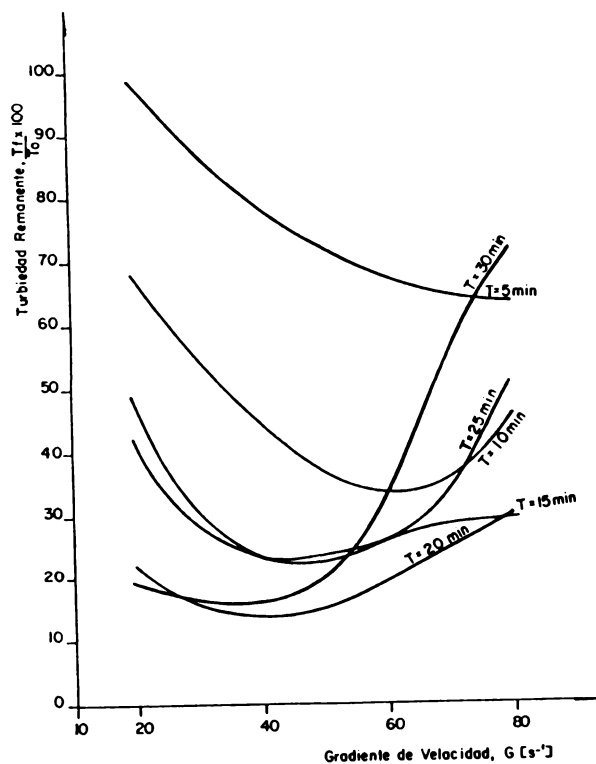


Figura 9 Turbiedad remanente versus gradiente de velocidad. Quebradas La Chata, La Larga, La Afluente, La Manguala y Despensas. $T_0 = 9,5$ UTN.

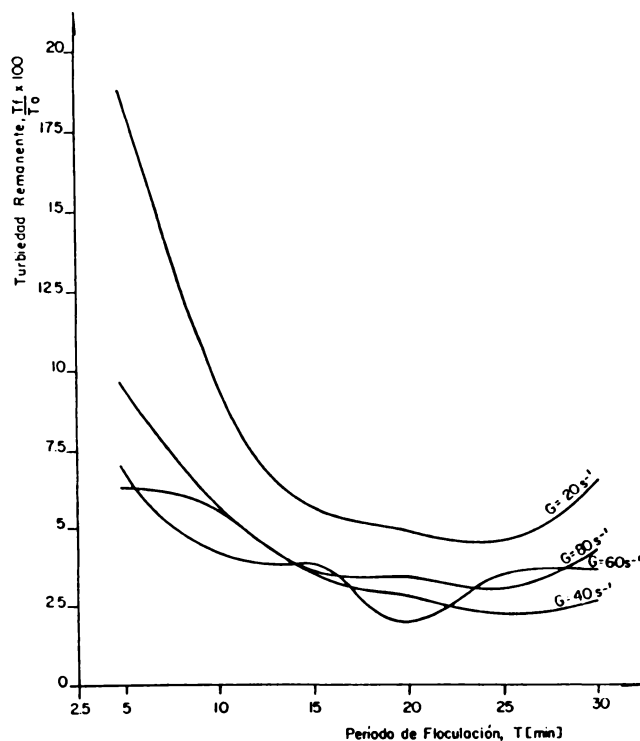


Figura 10 Turbiedad remanente versus periodo de floculación. Quebradas La Chata, La Larga, La Afluente, La Manguala y Despensas. $T_0 = 268$ UTN.

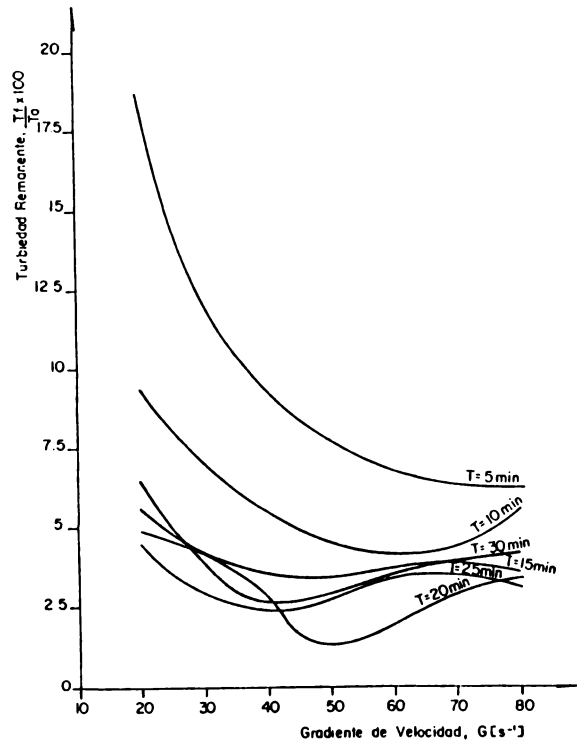


Figura 11 Turbiedad remanente versus gradiente de velocidad. Quebradas La Chata, La Larga, La Afluente, La Manguala y Despensas. $T_0 = 268$ UTN.

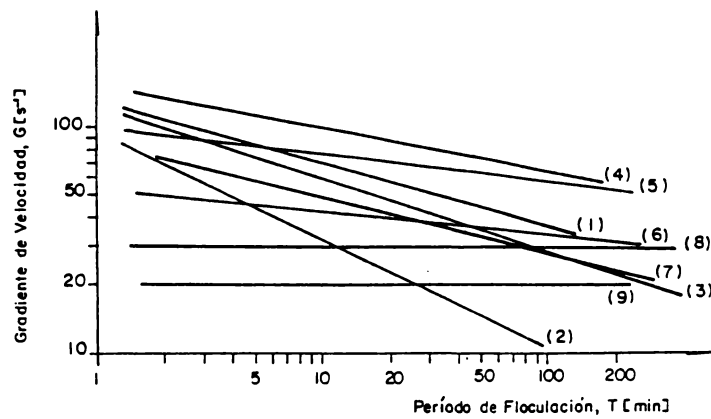


Figura 12 Gradiente de velocidad versus periodo de floculación para diferentes fuentes.

8. CONCLUSIONES

De los resultados anteriormente presentados se obtienen las siguientes conclusiones relacionadas con los parámetros de diseño de las unidades de floculación y sedimentación.

- Tiempo óptimo de floculación. Los ensayos realizados muestran la tendencia hacia un tiempo total de floculación que optimiza el proceso, esto es el tiempo en el cual la turbiedad residual, después del proceso de sedimentación, toma un valor mínimo; por lo general los resultados, presentan un rango de tiempo para diferentes gradientes con una marcada tendencia que permite definir el tiempo más adecuado de residencia en el reactor.
- En el caso de la fuente El Guásimo y de la muestra compuesta de San Antonio de Prado, evaluadas para los casos de baja y alta turbiedad, el tiempo óptimo de floculación permanece invariable para ambas fuentes, independientemente de las condiciones de turbiedad, tal como puede observarse en las Figuras 2, 6, 8 y 10. Para la quebrada El Guásimo el tiempo de floculación óptimo es de 28 min., tanto para baja turbiedad (4,5 UTN) como para alta turbiedad (80 UTN); para la muestra compuesta de San Antonio de Prado, el tiempo de floculación óptimo es de 20 min., para baja turbiedad (9,5 UTN) y alta turbiedad (268 UTN).
- Para las demás fuentes estudiadas, entre las cuales se encuentran ríos de montaña, ríos de llanura y lagunas, con valores de turbiedad que varían entre 1,0 y 250 UTN, los tiempos óptimos de floculación oscilan entre 20 y 30 minutos presentándose un valor promedio de 25 minutos en las 11 fuentes evaluadas en la presente investigación. Sin pretender generalizar este comportamiento para todas las fuentes de agua superficial, se considera significativo este estrecho rango de tiempo que optimiza el proceso de floculación.
- Escalonamiento del gradiente de floculación. De acuerdo con los resultados obtenidos, existe una relación entre el gradiente de velocidad y el tiempo de floculación que corresponde a una ecuación del tipo $G = KT^n$ la cual permite determinar la forma de escalonar el gradiente de floculación en cada una de las cámaras o zonas que conforman el reactor de floculación. En la gran mayoría de las fuentes estudiadas, se presenta el caso que el decrecimiento del gradiente a través del tiempo de floculación optimiza el proceso, tal como puede observarse en la Figura 4 y en la Figura 12 (Gráficas 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7). Adicionalmente se aprecia que para cada una de las diferentes fuentes, la relación G versus T , varía ostensiblemente, presentándose casos para los cuales se requiere la aplicación de altos gradientes de velocidad a lo largo del proceso (gráficas 1, 3, 6 y 7). Sin embargo, contrariamente a lo reportado en las publicaciones especializadas que indican que la mejor condición es la aplicación de un gradiente decreciente, se presenta el caso que para dos de las fuentes es más conveniente aplicar un gradiente de velocidad constante a lo largo de todo el tiempo de floculación, ya que esta condición produce los mejores resultados, como puede observarse en la Figura 12 (gráficas 8 y 9).
- Variación de la relación G versus T para diferentes turbiedades. La relación entre G y T varía, en mayor o menor magnitud para una misma fuente cuando varían las condiciones de turbiedad, tal como puede observarse en la Figura 4. Para el caso de la quebrada El Guásimo, se requiere la aplicación de gradientes mayores en el caso de turbiedad baja (4,5 UTN), lo que obligaría a la utilización de floculador mecánicos de velocidad variable para generar en cada zona los gradientes requeridos en diferentes condiciones de turbiedad o en el caso de tomar la decisión de utilizar un floculador hidráulico, diseñar las diferentes zonas con gradientes promedio entre los valores obteni-

dos experimentalmente. Para el caso de la muestra compuesta de San Antonio de Prado, no se presenta una apreciables diferencia en dicha relación para los casos de baja turbiedad (9,5 UTN) y alta turbiedad (268 UTN), posiblemente debido a que la muestra es la mezcla de cinco fuentes de diferentes microcuencas.

- Número de cámaras o zonas de floculación. Con el fin de hacer que el tiempo real de detención en el floculador sea lo más cercano posible al tiempo obtenido en el ensayo de jarras, es requerido dividir el reactor en varias cámaras o zonas que retengan el agua una fracción del tiempo total, lo cual minimiza la formación de zonas muertas y cortocircuitos. Una manera de determinar el número de cámaras es considerado la tendencia de variación del gradiente de velocidad a través del tiempo de floculación, esto es, si la variación del gradientes es de poca magnitud, se induce que no es requerido una gran número de cámaras, y si por el contrario dicha variación es significativa, el número de cámaras seleccionado puede ser una estructura de hormigón, una excesiva compartimentalización aumenta los costos de construcción.
- Velocidad de sedimentación de diseño. En las pruebas de sedimentación efectuadas se relacionan experimentalmente la velocidad de sedimentación y la turbiedad remanente en el proceso de decantación en jarras. En concepto del autor la función de los decantadores en una planta de tratamiento es la producción de un agua decantada que no sobrepase en ningún caso las 6 UTN, con el fin de evitar la frecuente colmatación de los filtros. Utilizando este criterio y con base en los resultados obtenidos, se seleccionan las velocidades de sedimentación crítica o de diseño, en la quebrada El Guásimo y en la muestra compuesta de San Antonio de Prado, utilizando la Figura 5, y de forma similar en las demás fuentes estudiadas; los

valores seleccionados se presentan en la Tabla 6.

Las pruebas de jarras realizadas en la planta de tratamiento de Prudentópolis con el fin de ajustar la dosificación de coagulantes puso en evidencia que la eficiencia en cuanto a la remoción de turbiedad es mayor en los sedimentadores, de placas de la planta en operación que en el ensayo de jarras, donde se reporta que para diferentes valores de turbiedad de agua cruda, las respectivas turbiedades de agua decantada obtenidas en la prueba de jarras y obtenidas en los decantadores de la planta están en una relación aproximada de 2 a 1. Estos resultados parecen indicar que los resultados obtenidos en la prueba de jarras pueden utilizarse para el diseño de las unidades de decantación, lo cual incluirá un factor de seguridad de un valor cercano a 2. Sin embargo se considera que es necesario obtener más información al respecto, para generalizar este concepto.

REFERENCIAS

- ACODAL. Seminario Internacional sobre Tecnología Simplificada para Potabilización del Agua. Memorias. Cali, Colombia, Agosto de 1987. 627 p.
- OPS, EHP, CEPIS. Programa Regional de Mejoramiento de Calidad de Agua Para Consumo Humano. Determinación de Variables Químicas. Enero de 1992. 59 p.
- PEREZ P., J. A. Método del Ensayo de Jarras para la Determinación de los Parámetros de Diseño de una Planta de Potabilización. s.p.i, 197 p.
- PEREZ P., J. A. Manual de Potabilización del Agua. Medellín, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, 1990, 52 p

TABLA 6 Resultados de los ensayos de floculación y sedimentación para diferentes fuentes.

Gráfica	Fuente	Turbiedad Inicial [UTN]	Ecuación GvsT	Tiempo Total Floculación [min]	Vel. Sed. Crítica [m ³ /m ² .d]
1	Q. La Culebra, municipio de Remedios, Ant.	250	$G = 130,3170T^{-0,2820}$	25	15
2	Q. La Chaparrala, municipio de Andes, Ant.	4,5	$G = 90,7611T^{-0,4736}$	20	17
3	Q. La Temperatura, municipio de Zaragoza, Ant.	3,0	$G = 126,3280T^{-0,3330}$	30	20
4	Q. San Juan, corregimiento de Pato, municipio de Zaragoza, Ant.	170	$G = 152,9355T^{-0,1886}$	25	15
5	Q. La Pontezuela, municipio de Rionegro, Ant.	200	$G = 100,7332T^{-0,0993}$	23	10
6	Laguna de Ayapel, municipio de Ayapel, Córdoba.	11,8	$G = 56,1306T^{-0,1114}$	25	13
7	Q. Río Sinú, municipio de San Pelayo, Córdoba	22	$G = 85,8621T^{-0,2435}$	20	13
8	Q. La Piedrahita, municipio de Don Matías, Ant.	1,7	$G = 30 \text{ s}^{-1}$ (constante)	25	17
9	Q. La Cascada, corregimiento Santa Elena, municipio de Medellín, Ant.	15	$G = 20 \text{ s}^{-1}$ (constante)	28	15
10	Q. El Guásimo, municipio de La Ceja, Ant.	4,5 80	$G = 110,3289T^{-0,2768}$ $G = 131,3254T^{-0,1754}$	28	17
11	Quebradas La Chata, La Larga, La Afluente, La Manguala y Despensas, corregimiento de San Antonio de Prado, municipio de Medellín, Ant.	9,5 268	$G = 152,8813T^{-0,4205}$ $G = 149,1077T^{-0,3910}$	20	14

