



II-080 - UN APORTE A LA MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL PROCESO DE FLOCULACIÓN EN POTABILIZACIÓN DE AGUAS

Danilo Ríos⁽¹⁾

Ingeniero Civil Op. Hidráulica y Sanitaria por la Universidad de la República Oriental del Uruguay (UdelaR). Ingeniero de la Administración de las Obras Sanitarias del Estado (OSE): Sub Gerente de Producción de la Región Metropolitana, Encargado de Tratamiento del Sistema Montevideo. Profesor Asistente del Depto. de Ingeniería Ambiental del Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la UdelaR.

Elizabeth González

Ingeniera Civil Op. Hidráulica y Sanitaria por la UdelaR y Doctora en Ingeniería Ambiental por la misma Universidad. Profesora Adjunta del Depto. de Ingeniería Ambiental del Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la UdelaR. Consultora independiente desde 1990 en las áreas de ingeniería sanitaria y ambiental.

Julieta López

Ingeniera Civil Op. Hidráulica y Ambiental por la UdelaR. Ingeniera de la División Saneamiento de la Intendencia Municipal de Montevideo. Profesora Asistente del Depto. de Ingeniería Ambiental del Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la UdelaR.

Daniela Plottier

Bachiller. Profesora Ayudante del Depto. de Ingeniería Ambiental del Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la UdelaR.

Giuliana Broggi

Bachiller

Cecilia Gómez

Bachiller

Armando Lanfranconi

Bachiller

Dirección⁽¹⁾: Julio Herrera y Reissig, 565 - Montevideo - CP: 11300 - Uruguay - Tel: 598 (2) 7115278 int.131 - Fax: 598 (2) 7115277 - e-mail: drrios@fing.edu.uy

RESUMEN

La floculación tiene una gran importancia dentro del proceso de clarificación de agua, ya que condiciona la efectividad de los procesos que le siguen en el tratamiento. El interés en esta etapa del proceso ha motivado que diversos autores, a lo largo del tiempo, desarrollaran modelos matemáticos para representar dicho fenómeno.

El proceso de floculación puede considerarse, desde el punto de vista conceptual, como la interacción de dos fenómenos: uno de agregación de partículas primarias, y otro de desagregación. El presente trabajo consiste en la aproximación a un modelo matemático que permita describir el fenómeno de floculación, a partir de expresiones que representen la formación de los flóculos y la desagregación o ruptura de los mismos. El término de agregación, de la ecuación propuesta por Argaman y Kaufman (1970), es hoy universalmente aceptado, por lo que se toma como válido en el presente trabajo. En cambio hasta el presente, el avance en el conocimiento cuantitativo del proceso de desagregación ha sido limitado.

A partir de las observaciones resultantes de los ensayos de jarras realizados, se propone una expresión matemática para describir el proceso de desagregación de partículas, la cual se ajusta a los resultados experimentales. Esta función, en conjunto con la función de agregación, representan el proceso de floculación, para las condiciones analizadas.

PALABRAS-CLAVE: Agua Potable, Floculación, Modelación Matemática, Ensayos de Jarras.

**FOTOGRAFIA
NÃO
DISPONÍVEL**



INTRODUCCIÓN

Son muchos y muy variados los factores que afectan el proceso de floculación, y por lo tanto los intentos en desarrollar modelos matemáticos que describan este proceso han sido a lo largo del tiempo de relativa aplicación práctica, especialmente cuando se pretende generalizar resultados y promover su aplicación en sistemas de tratamiento de agua.

El presente trabajo consiste en la aproximación a un modelo matemático, que surge a partir de la observación de ensayos de jarras realizados dentro del marco de evaluación de unidades potabilizadoras, que pretende describir el fenómeno de floculación ortocinética mediante la determinación de expresiones matemáticas que describan las funciones de agregación y desagregación de flóculos.

CONSIDERACIONES TEÓRICAS

La voluntad de expresar matemáticamente este complejo fenómeno ha llevado numerosos estudios, especialmente a partir de Argaman y Kaufman (1970), quienes en su trabajo propusieron la existencia de una función de agregación (concepto ya manejado en trabajos anteriores por Harris y Kaufman en 1966), y una función de desagregación, que actúa sobre flóculos ya formados.

Erro! Indicador não definido. = $-(4\alpha/\pi) \phi G N + K_B G^2 N_0$
ecuación (1)

- $(4\alpha/\pi) \phi = K_A$ (constante de agregación)
- K_B : constante de desagregación
- N es la concentración de partículas primarias no floculadas y G el gradiente medio de velocidad. A los efectos de obtener resultados que puedan ser de aplicación práctica, al ser N proporcional a la turbiedad, se utiliza generalmente dicho parámetro, hipótesis que también se realiza en el presente trabajo.

El primer término representa el fenómeno de agregación de partículas primarias, mientras que el segundo término representa el fenómeno de desagregación. La ecuación anterior sugiere la acción simultánea de ambos fenómenos, concepto aceptado universalmente para entender conceptualmente el proceso de floculación. Mediante el uso del equipo de jarras, es posible la determinación de las constantes K_A y K_B .

La agregación de partículas, que ocurre a una alta tasa al inicio del proceso de floculación, representa por sí sola el fenómeno de floculación durante los primeros instantes del proceso, en que la agregación predomina sobre los procesos de desagregación. El primer término de la ecuación, es hoy universalmente aceptado como función de agregación de partículas, y se tomará como válida en el presente trabajo.

En cambio hasta el presente, sólo limitados progresos se han tenido en cuanto al conocimiento cuantitativo del proceso de desagregación de flóculos, en comparación con el proceso de agregación. No obstante, se acepta que la desagregación es el producto de dos mecanismos que actúan paralelamente, que consisten en la erosión de la superficie de los flóculos, y en la fractura de los mismos para formar agregados menores, lo cual da origen luego de un tiempo de floculación determinado, a un tamaño de floc "estable", que depende fuertemente del gradiente de velocidad.

Según estudios realizados por Lagvankar y Gemmel, los fragmentos provocados por la fractura de flóculos de mayor tamaño, dan como resultado partículas de mayor densidad, lo cual lleva a pensar que a tiempos de floculación extensos, se tiende a un tamaño de floc relativamente estable, poco probable de ser desagregado de no variarse el gradiente de velocidad.

Villegas y Letterman (1976) realizaron una discusión de la ecuación (1), y concluyeron, basados en sus ensayos de laboratorio, que la misma no describe fielmente el fenómeno de floculación, puesto que la aplicación de la misma no representa el mínimo que generalmente se obtiene al construir las curvas N vs. *Tiempo de floculación*, para G constante.



HIPÓTESIS DE TRABAJO

Como se mencionó anteriormente, se toma como hipótesis la validez de la función de agregación de partículas, descrita por la siguiente expresión:

Erro! Indicador não definido.= - $K_A G N$
ecuación (2)

OBJETIVOS

El presente trabajo consiste en determinar una expresión matemática que se ajuste a los resultados experimentales, de la función de desagregación de partículas, que en conjunto con la función de agregación, represente el proceso de floculación, dentro de los tiempos de retención y gradientes de velocidad habitualmente utilizados en los sistemas de tratamiento.

PRIMERA ETAPA

METODOLOGÍA PARA LA PRIMERA ETAPA

Los estudios se basaron en trabajos de laboratorio, que consistieron en ensayos de jarras, los cuales se desarrollaron bajo las condiciones indicadas en la Tabla 1.

Tabla 1: Condiciones de los Ensayos de Jarras realizados.

PROCESO	VELOCIDAD DE AGITACIÓN	TIEMPO
Mezcla Rápida	300 rpm	30 s
Floculación	1 a 100 s ⁻¹	0 a 90 min
Sedimentación		10 min

Para cada agua bruta ensayada se obtuvieron las curvas de variación de la turbiedad en función del tiempo, para el rango de gradientes considerado. A partir de esos resultados, y asumiendo válida la ecuación de agregación para los primeros instantes del proceso de floculación, se determinó, en cada caso, el valor de la constante de agregación K_A .

Obtenidas las curvas de agregación, a través del parámetro K_A , y conocidas las curvas de floculación experimentales, se determinó, por diferencia entre ambas, las curvas correspondientes al proceso de desagregación.

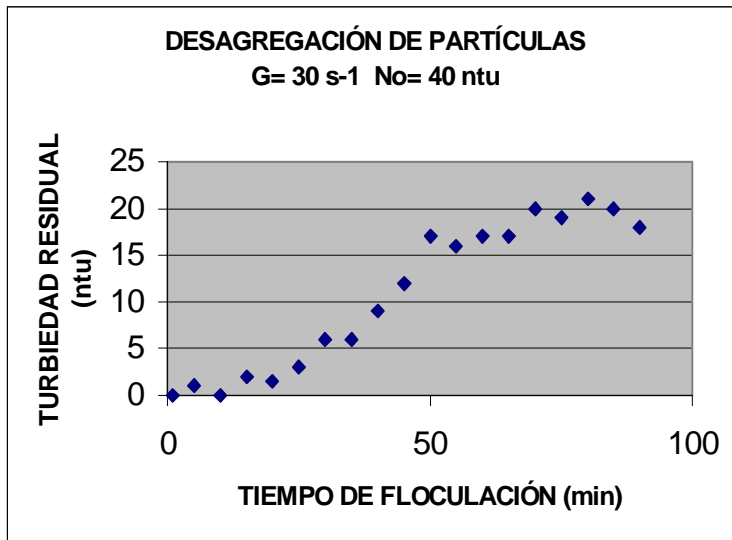
Luego se ajustaron las curvas de desagregación obtenidas, mediante una expresión matemática.

ACTIVIDADES DESARROLLADAS DURANTE LA PRIMERA ETAPA

Se efectuaron diversos ensayos de jarras con agua bruta proveniente de tres fuentes superficiales, cuyos resultados fueron tratados de acuerdo a la metodología descrita anteriormente. Las curvas de desagregación obtenidas presentan el aspecto que se observa en la Figura 1.



Figura 1: Curva de Desagregación de Partículas.



- La función de desagregación es creciente con el tiempo de floculación, y tiende a un valor asintótico para tiempos de floculación elevados.
- Al comienzo del proceso de floculación, la función de desagregación tiene escasa relevancia frente a la agregación (condición impuesta en el cálculo de K_A).
- La ecuación de desagregación que se proponga deberá tener valor nulo a tiempo cero, y su derivada deberá ser nula en tiempo cero.

La expresión matemática que se propone para representar el proceso de desagregación de partículas está dada por la ecuación (3) que se presenta a continuación.

$$N = C_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 e^{-\lambda_2 t} + N_0^* \quad \text{ecuación (3)}$$

- N_0^* turbiedad residual final, valor correspondiente al tamaño de floc "estable"
- C_1 , C_2 , λ_1 y λ_2 parámetros del modelo, que verifican las siguientes relaciones:

$$C_2 = -C_1 - N_0^* \quad \text{ecuación (4)}$$

$$\lambda_2 = (\lambda_1 C_1) / (N_0^* + C_1) \quad \text{ecuación (5)}$$

La ecuación (3) representa el aumento de turbiedad en función del tiempo provocado por la desagregación de flóculos ya formados, el cual se da en forma lenta para los primeros instantes de floculación, crece rápidamente luego de ese primer momento y tiende a estabilizarse para tiempos grandes, en el valor de turbiedad final N_0^* .

Combinando las expresiones para los procesos de agregación y desagregación de partículas, se obtiene la expresión final para describir la variación de la turbiedad en función del tiempo de floculación:

$$N = N_0 e^{-K_A G t} + C_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 e^{-\lambda_2 t} + N_0^* \quad \text{ecuación (4)}$$

SEGUNDA ETAPA

METODOLOGÍA PARA LA SEGUNDA ETAPA

A través de ensayos de jarras, se determinaron las curvas de N vs. *Tiempo de floculación* para cuatro tipos de agua bruta diferente, considerando distintas condiciones de gradiente de velocidad aplicado. Las condiciones bajo las cuales se realizaron dichos ensayos se indican en la Tabla 2.

**Tabla 2: Condiciones de los Ensayos de Jarras realizados.**

PROCESO	VELOCIDAD DE AGITACIÓN	TIEMPO
Mezcla Rápida	300 rpm	30 s
Floculación	7 a 130 s ⁻¹	0 a 90 min
Sedimentación		10 min

Las curvas obtenidas de los ensayos de jarras fueron las utilizadas para ajustar la expresión matemática propuesta para el proceso de floculación. El método consistió en determinar, para cada una de las curvas, el valor de los distintos parámetros de manera de que las curvas teóricas se aproximaran a las experimentales.

ACTIVIDADES DESARROLLADAS DURANTE LA SEGUNDA ETAPA

Se han ajustado hasta el momento las curvas correspondientes a cuatro tipos de agua bruta, para gradientes de velocidad comprendidos entre 7 y 130 s⁻¹. Se determinó, en cada uno de esos casos, los valores de los parámetros del modelo y, a continuación, se analizó la variación de cada uno de ellos con el gradiente de velocidad aplicado. A continuación se presentan los resultados de los ajustes realizados.

AGUA 1: LOCALIDAD DE TALA

Tabla 3: características del agua bruta.

TURBIEDAD (NTU)	ALCALINIDAD (mg/L CaCO ₃)	COLOR APARENTE	COLOR VERDADERO	PH	TEMPERATURA (°C)
61	77	280	130	7	18

Tabla 4: valores de los parámetros del modelo para distintos gradientes de velocidad.

PARAMETRO	G = 7,5 s ⁻¹	G = 19,1 s ⁻¹	G = 45,3 s ⁻¹	G = 73,5 s ⁻¹	G = 106,1 s ⁻¹	G = 134,4 s ⁻¹
K _A	0,017	0,013	0,008	0,004	0,002	0,001
No*	2,3	2,6	3,9	6,2	11,2	13,6
C ₁	20	20	20	20	20	20
λ ₁	0,75	0,60	0,45	0,25	0,25	0,25
C ₂	-22	-23	-24	-26	-31	-34
λ ₂	0,673	0,531	0,377	0,191	0,160	0,149

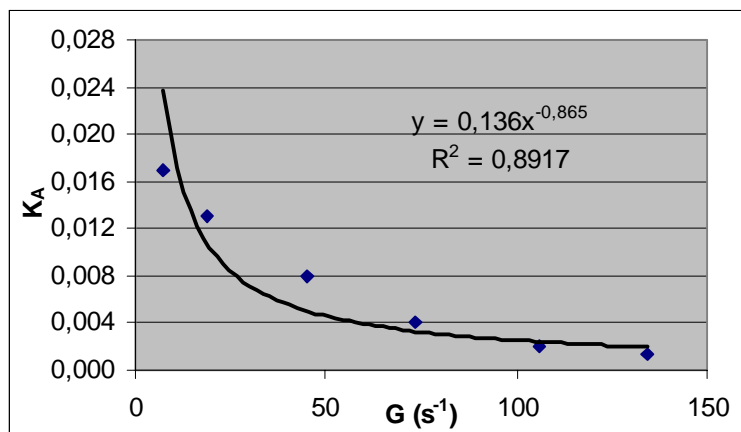
Figura 2: variación de K_A con el gradiente de velocidad aplicado.



Figura 3: variación de No^* con el gradiente de velocidad aplicado.

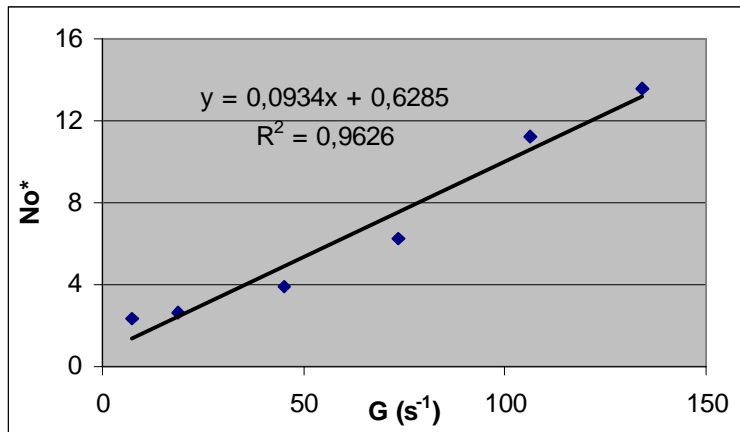
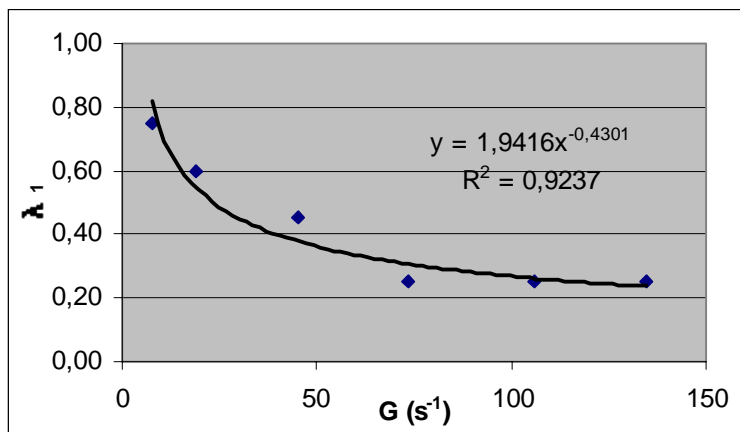


Figura 4: variación de λ_1 con el gradiente de velocidad aplicado.



AGUA 2: LOCALIDAD DE PANDO

Tabla 5: características del agua bruta.

TURBIEDAD (NTU)	ALCALINIDAD (mg/L CaCO ₃)	COLOR APARENTE	COLOR VERDADERO	PH	TEMPERATURA (°C)
78	76	480	80	6,5	17,5

Tabla 6: valores de los parámetros del modelo para distintos gradientes de velocidad.

PARAMETRO	G = 7,5 s ⁻¹	G = 19,1 s ⁻¹	G = 31,1 s ⁻¹	G = 45,3 s ⁻¹	G = 76,5 s ⁻¹	G = 106,1 s ⁻¹
K _A	0,019	0,011	0,009	0,006	0,004	0,003
No*	2,7	3,0	2,7	4,0	6,8	9,5
C ₁	20	20	20	20	20	20
λ ₁	0,55	0,45	0,35	0,27	0,23	0,25
C ₂	-23	-23	-23	-24	-27	-30
λ ₂	0,485	0,391	0,308	0,225	0,172	0,169



Figura 5: variação de K_A com o gradiente de velocidade aplicado.

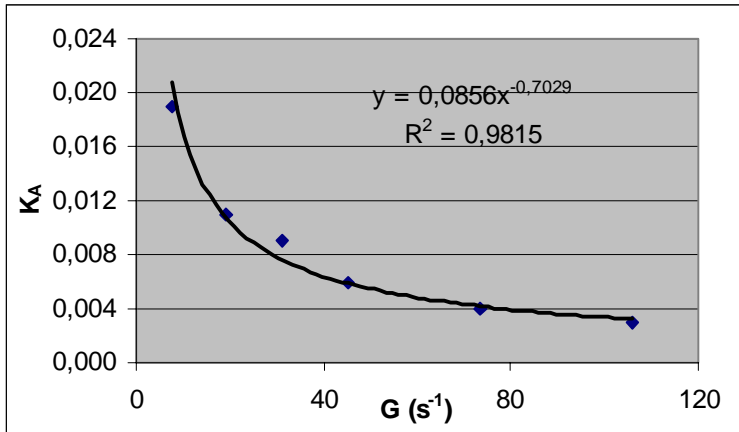


Figura 6: variação de No^* com o gradiente de velocidade aplicado.

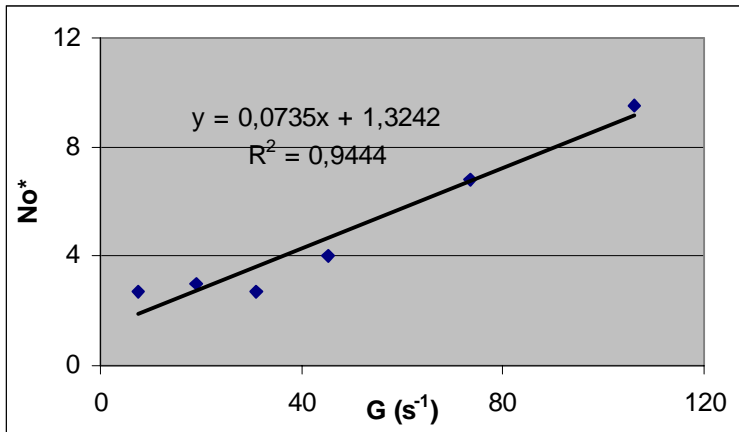
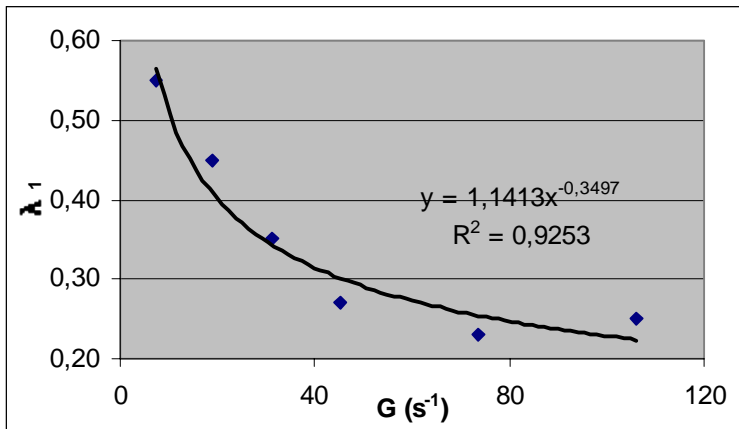


Figura 7: variação de λ_1 com o gradiente de velocidade aplicado.



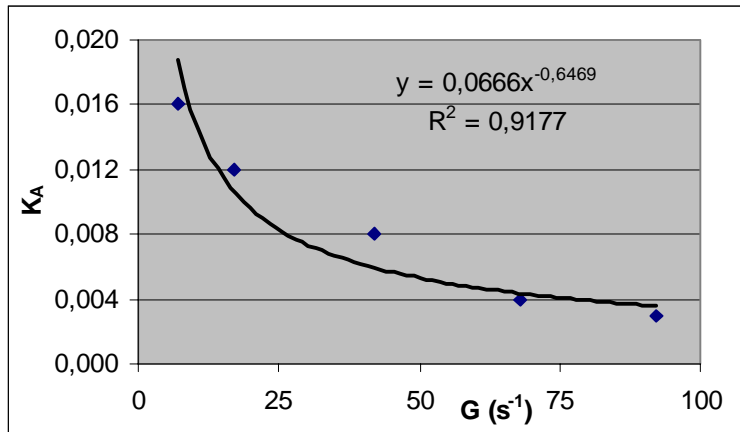
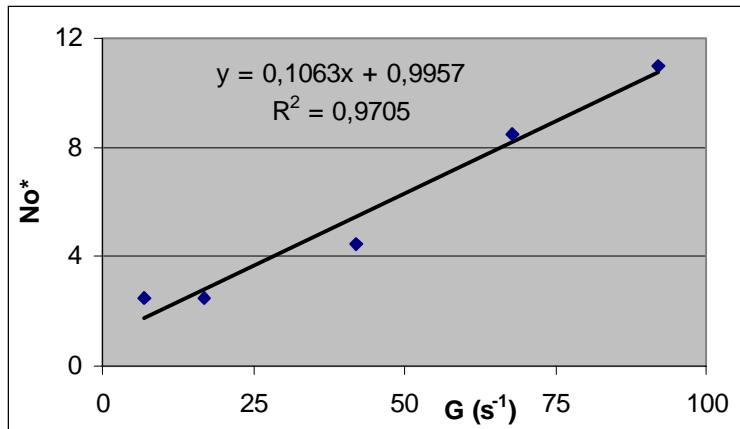
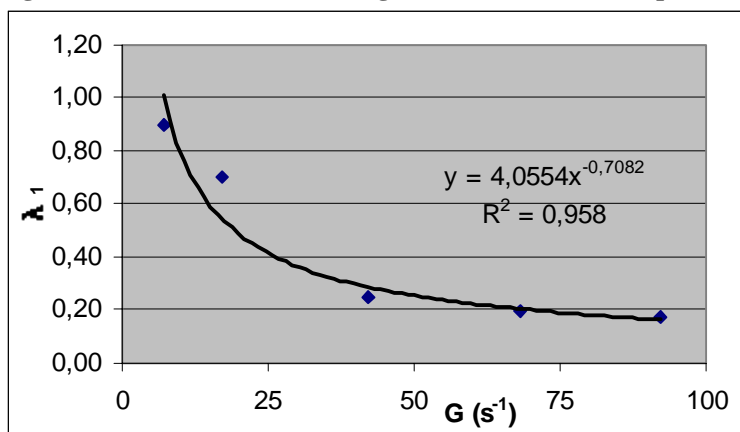
AGUA 3: LOCALIDADE DE PANDO

Tabla 7: características del agua bruta

TURBIEDAD (NTU)	ALCALINIDAD (mg/L CaCo ₃)	COLOR APARENTE	COLOR VERDADERO	PH	TEMPERATURA (°C)
69,5	95	480	70	7	11

**Tabla 8: valores de los parámetros del modelo para distintos gradientes de velocidad.**

PARAMETRO	$G = 7,1 \text{ s}^{-1}$	$G = 17 \text{ s}^{-1}$	$G = 42 \text{ s}^{-1}$	$G = 68 \text{ s}^{-1}$	$G = 92 \text{ s}^{-1}$
K_A	0,016	0,012	0,008	0,004	0,003
No^*	2,5	2,5	4,5	8,5	11,0
C_1	20	20	20	20	20
λ_1	0,90	0,70	0,25	0,20	0,17
C_2	-23	-23	-25	-29	-31
λ_2	0,800	0,622	0,204	0,140	0,110

Figura 8: variación de K_A con el gradiente de velocidad aplicado.**Figura 9: variación de No^* con el gradiente de velocidad aplicado.****Figura 10: variación de λ_1 con el gradiente de velocidad aplicado.**

**AGUA 4: LOCALIDAD DE MERCEDES****Tabla 9: características del agua bruta.**

TURBIEDAD (NTU)	ALCALINIDAD (mg/L CaCO ₃)	COLOR APARENTE	COLOR VERDADERO	PH	TEMPERATURA (°C)
25	37	120	60	6,9	15

Tabla 10: valores de los parámetros del modelo para distintos gradientes de velocidad.

PARAMETRO	G = 7,97 s ⁻¹	G = 18,38 s ⁻¹	G = 42,43 s ⁻¹	G = 50,33 s ⁻¹	G = 70,71 s ⁻¹	G = 98,99 s ⁻¹
K _A	0,0175	0,012	0,008	0,0075	0,004	0,003
No*	1,9	2,0	5,2	6,2	11,0	13,0
C ₁	40	20	7	5	1,2	1
λ ₁	1,50	0,70	0,40	0,35	0,60	1,1
C ₂	-42	-22	-12	-11	-12	-14
λ ₂	1,432	0,636	0,230	0,156	0,059	0,079

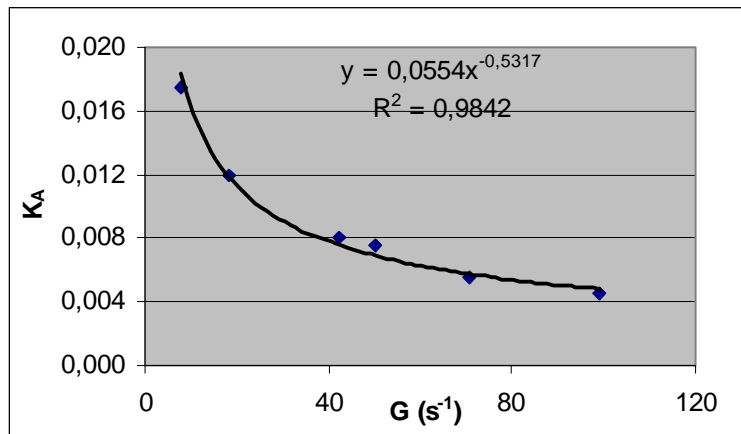
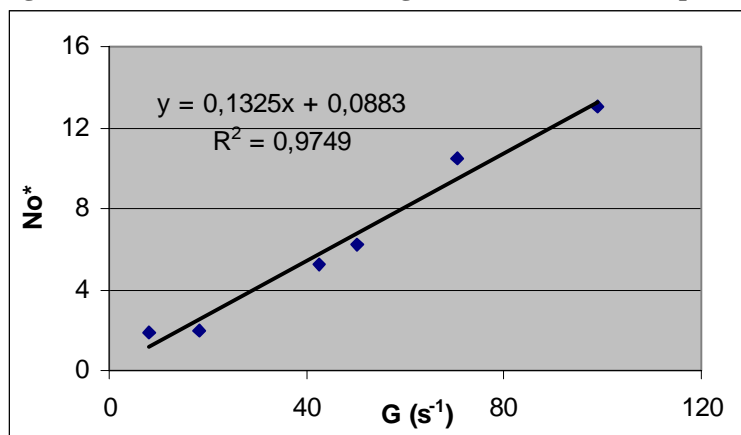
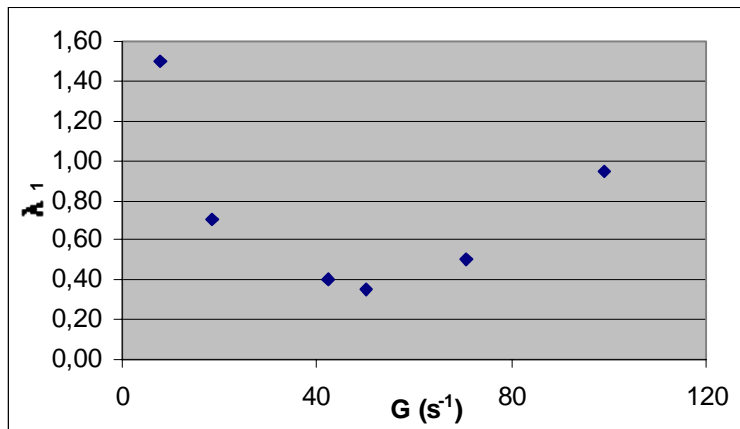
Figura 11: variación de K_A con el gradiente de velocidad aplicado.**Figura 12: variación de No* con el gradiente de velocidad aplicado.**



Figura 13: variación de λ_1 con el gradiente de velocidad aplicado.



CONCLUSIONES

Los parámetros de la ecuación obtenida se ajustan para cada tipo de agua y gradiente de velocidad analizados. Los resultados obtenidos sugieren que para cada tipo de agua, existe una relación entre los parámetros determinados para distintos gradientes de velocidad. Tanto K_A como No^* presentan un comportamiento definido según el gradiente aplicado, de acuerdo a lo que se observa en las Figuras anteriores.

La ecuación propuesta para representar el proceso de floculación es de fácil aplicación, y puede resultar de utilidad como apoyo al diseño, operación y/o evaluación de plantas potabilizadoras, ya que permite determinar la turbiedad esperada luego de sedimentar un agua floculada, bajo condiciones de agitación establecidas por el gradiente medio de velocidades.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. DI BERNARDO, L. Métodos e Técnicas de tratamento de Água. V.I. ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro, Brasil, 1993.
2. ARBOLEDA VALENCIA, J. Teoría y Práctica de la Purificación del Agua. V.I. Mac. Graw Hill. 2000.
3. AZEVEDO NETTO, J. (et al.). Técnica de Abastecimiento e Tratamento de Água. V.II Convenio SETESB/AS SETESB. 1987
4. RICHTER, C. AZEVEDO NETTO, J. Tratamento de Água: Tecnologia autorizada. Edgard Blücher Ltda. 1998
5. AWWA – American Water Works Association. Water Treatment Plant Design. Mac Graw Hill. 1997
6. LETTERMAN, R. Filtration strategies to meet the surface water treatment rule. AWWA – American Water Works Association. 1991
7. ANDREW VILLEGAS, R. LETTERMAN, R. Optimizing flocculator power input. Journal of Environmental Engineering Division, Abril 1976.
8. PARKER, KAUFMAN, JENKINS. Floc breakup in turbulent flocculation processes. Journal of Sanitary Engineering Division, Febrero 1972.