

EVALUACIÓN DE MODELOS DE PREDICCIÓN DE EXPANSIÓN DE LECHOS FILTRANTE

Lina I. Ceballos B., Manuel D. Zuluaga A. y Jorge A. Pérez P.
Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas,
Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín
mzuluaga@poseidon.unalmed.edu.co

RESUMEN

Este trabajo evalúa algunos de los métodos que existen para predecir la expansión producida por el retrolavado de filtros granulares en plantas de potabilización de agua. Básicamente se consideraron tres métodos, el Método Clásico, es el más usado en nuestro medio, pues permite conocer de manera rápida y sencilla el valor de la expansión, el segundo, Método de Sholji, más elaborado matemáticamente, predice la expansión a partir de un ajuste lineal entre la expansión y la velocidad de lavado, y el tercero, Método de Dharmarajah y Cleasby, ajusta, mediante una ecuación, dos parámetros que dependen fundamentalmente de la porosidad inicial y de la velocidad de lavado. Para evaluar estos métodos se utilizaron lechos sencillos de arena o antracita y lechos dobles de arena y antracita, que cumplieran con los requisitos exigidos por el RAS-2000. Se muestran los resultados obtenidos para el lecho compuesto por arena estándar y lecho doble de arena y antracita estándar. Los resultados obtenidos para cada uno de los métodos son bastante satisfactorios, con errores en la predicción que no superan el 10% en ninguno de los casos analizados.

PALABRAS CLAVE: Potabilización del agua, Filtración, Expansión.

ABSTRACT

This work evaluates some of the methods that exist to predict the expansion of granular filter media during the backwashing. Basically they were considered three methods, the Classic Method, the more used, allows to know in a quick and simple way the value of the expansion; the second, Sholji's Method, more elaborated mathematically, predicts the expansion starting from a lineal adjustment among the expansion and the backwashing velocity; and the third, Dharmarajah and Cleasby's Method, adjusts by means of an equation, two parameters that depend fundamentally on the initial porosity and of the backwashing velocity. To evaluate these methods single sand or anthracite media and double sand and anthracite media were used, which completed with the requirements demanded by the RAS-2000. The results obtained for the single and double standard media are presented. The results obtained for each one of the methods are quite satisfactory, with prediction errors that don't overcome 10% in none of the analyzed cases.

KEY WORDS: Water treatment, Filtration, Expansion

1. INTRODUCCIÓN

La filtración es el último proceso considerado en el tratamiento de aguas, y consiste básicamente en la remoción de las partículas y microorganismos que no han quedado retenidos en los procesos previos a la purificación. Fundamentalmente el mantenimiento de los filtros consiste en un apropiado lavado del medio, debido a que en este proceso los granos se cubren de material depositado en ellos, obstruyendo paulatinamente el paso del flujo y así aumentando el grado de colmatación.

El lavado se hace invirtiendo el sentido del flujo en él, inyectando agua por la parte inferior y recolectándola en la parte superior. Este retrolavado hace que el medio se expanda durante un lapso de tiempo, de forma que el material retenido sea arrastrado y así lograr una limpieza. Esta expansión depende fundamentalmente de la velocidad de lavado, la granulometría del lecho, la forma y densidad de los granos y de la temperatura del agua. Para estimar dicha expansión se han desarrollado en los últimos treinta años diversos métodos de predicción del comportamiento del medio bajo flujo ascendente, destacándose el trabajo de Cleasby J.L., y modificaciones propuestas por otros autores.

Con este trabajo no se pretende encontrar nuevas fórmulas ni nuevos modelos que predigan la expansión de medios filtrantes, simplemente se quiere hacer una revisión de los métodos de predicción de expansión de medios filtrantes durante el retrolavado utilizados comúnmente en el diseño de filtros para plantas de tratamiento de aguas, tales como la arena y la antracita, basados fundamentalmente en criterios empíricos y semi-empíricos, y que han sido evaluados en proyectos de grado anteriores y de otros modelos posteriores a dichos trabajos basados en fundamentos físicos que requieren una calibración a partir de trabajo experimental en laboratorio.

2. MÉTODOS DE PREDICCIÓN

Las expresiones que relacionan los procesos hidrodinámicos del lavado de medios filtrantes están gobernadas por la naturaleza de las condiciones de flujo, sin embargo el poco entendimiento de los procesos hidrodinámicos (principalmente la determinación del régimen de flujo) durante la fluidización de medios filtrantes es una de las causas más frecuentes de las fallas durante la operación de los filtros. Los métodos de

predicción más usados en nuestro medio son, en su mayoría empíricos o semi-empíricos, dentro de los que se cuentan los propuestos por Cleasby y Wood, 1974, Fair y Geyer, 1973 y correcciones realizadas por diversos investigadores entre los que se cuentan Richter (en Pérez, 1997) y Pérez, J.A., 1977. Estos modelos han sido estudiados en trabajos de investigación anteriores (Carmona e Hincapié, 1980 y Munera y Quiceno, 1978). En la actualidad se cuenta con nuevos modelos de predicción que se basan en suposiciones físicas mucho más acertadas, desarrollados por autores tales como Cleasby y Dharmarajah, 1986 y Sholji, 1987, que presentan resultados mucho mejores que los obtenidos con los métodos clásicos.

2.1. Método Clásico

La velocidad de sedimentación de los granos del lecho está relacionada con el número de Reynolds mediante la siguiente expresión:

$$v_s = \frac{\nu R_e}{d} \quad (1)$$

Donde, v_s es la velocidad de sedimentación de los granos y ν es la viscosidad cinemática del fluido. Luego el número de Reynolds viene dado por la expresión:

$$R_e = \alpha G_a'' \quad (2)$$

donde, los valores de m y a son valores empíricos obtenidos para cada tipo de material empleado (Ritcher, s.p.i.) y G_a es el número de Galileo dado por la ecuación:

$$G_a = \frac{g(S_s - 1)d^3}{\nu^2} \quad (3)$$

en la ecuación, g es la aceleración de la gravedad, S_s es la densidad relativa de los granos y d es el diámetro de las partículas. Luego, se debe expresar la expansión del lecho en términos de la porosidad, así, Richardson y Zaki (1954) definen la porosidad del lecho expandido como:

$$P_e = \left(\frac{V_a}{V_s} \right)^{\beta R_e^\theta} \quad (4)$$

Igualmente, los valores de β y θ son obtenidos experimentalmente para cada tipo de material. En esta ecuación, V_a es la velocidad ascensional de lavado. Por último, luego de haber hallado la porosidad expandida del lecho de la ecuación 4, para estimar la expansión se parte del principio que el peso de los granos es el mismo antes y después de la expansión, por lo tanto:

$$L_o(1-p_o) = L_e(1-p_e) \quad (5)$$

Entonces la expansión es,

$$\xi = \frac{L_e - L_o}{L_o} = \frac{L_e}{L_o} - 1 = \frac{p_e - p_o}{1 - p_e} \quad (6)$$

donde, L_o y L_e son los espesores del lecho antes y después de la expansión, p_o y p_e es la porosidad inicial y expandida respectivamente. Como el lecho filtrante se encuentra estratificado, el cálculo de la expansión debe ser hecho por capas, tomando el diámetro medio entre dos tamices consecutivos. La longitud expandida parcial de cada capa es en este caso, $\Delta L_i = \xi_i x_i L_{o,i}$ donde x_i es el porcentaje de material en cada capa, y $L_{o,i}$ es el espesor del lecho del material filtrante. Adicionalmente es importante anotar que este método no considera lechos dobles que pueden presentar entremezcla durante el lavado.

2.2. Método de Dharmarajah y Cleasby

Este método involucra un parámetro que no había sido considerado por los métodos anteriores, como lo es la forma de los granos, representada en la esfericidad, que tiene gran influencia en el comportamiento de la fluidización del medio filtrante. La esfericidad, y , se define como la relación del área superficial de la esfera de igual volumen que la partícula, con el área superficial de la misma. De aquí se desprende que d_h , es el diámetro de la esfera con igual volumen que la partícula. Estos parámetros son calculados mediante conteo y peso de las partículas que componen el medio, calculando primero el valor de d_h y luego, usando relaciones empíricas, se calcula el valor de y (Cleasby, 1981).

Este método trata de relacionar dos números adimensionales para obtener una ecuación que exprese la porosidad expandida en términos de variables tales como la velocidad de lavado, la esfericidad densidad del lecho y del fluido, etc.

Los autores parten de una ecuación para el número de Reynolds presentado por Blake y que está definida como:

$$Re_1 = \left(\frac{v_s}{P_e} \right) \left[\frac{P_e}{(1-p_e)s} \right] \left(\frac{\rho}{\mu} \right) = \frac{\rho v}{s \mu (1-p)} \quad (7)$$

además, utilizan un parámetro A_1 (Dharmarajah y Cleasby, 1986), que es igual a:

$$A_1 = \left[\frac{p_o^3}{(1-p_o)^2} \right] \left[\frac{\rho(\rho_s - \rho)g}{s^3 \mu^2} \right] \quad (8)$$

Para partículas esféricas el área superficial específica está definida como, $s = 6/d$ y para partículas no esféricas $s = 6/\psi d_h$. Según los autores del método, s se halla mediante el conteo y peso de las partículas que componen el medio, calculando primero el valor del diámetro equivalente, d_h , y luego el valor de y , usando relaciones empíricas (Cleasby, 1981).

Debido a las dificultades que presenta este procedimiento para el cálculo de la esfericidad, Quaye B.A, propone un método alternativo para calcular el valor de d_h y ψ . Este método consiste en medir el tiempo de caída de 20 partículas en una distancia de 1,0 m en un tubo que contiene agua a una temperatura igual a la de fluidización. Así, hallando el valor de la velocidad de sedimentación a partir del tiempo de caída de las partículas y con la ayuda de las relaciones de Camp (Sholji, 1987), se encuentra la siguiente relación:

$$v_s = \left[\frac{4g(\rho_s - \rho)d_h}{3\rho \left(\frac{24}{\rho v_s d_h} + \frac{3}{\rho v_s d_h} + 0.34 \right)} \right]^{1/2} \quad (9)$$

Con el valor de v_s y despejando el valor de d_h , puede ser hallada la esfericidad del material, sabiendo que $\psi = d_h/d$ y que el valor de d es el diámetro geométrico entre tamices definido como $d = (d_i d_o)/2$.

Luego de haber realizado el cálculo de la esfericidad, se tienen dos ecuaciones adimensionales (ecuaciones 7 y 8) que dependen entre otros factores de la velocidad ascensional de lavado y de la porosidad expandida del lecho, entonces los autores propone graficar A_1 contra Re_1 , obtener un ajuste de puntos en la gráfica y mediante una ecuación de cuarto grado de la forma:

$$\log A_1 = k_1 + k_2 \log Re_1 + k_3 (\log Re_1)^2 + k_4 (\log Re_1)^3 + k_5 (\log Re_1)^4 \quad (10)$$

calcular la expansión del lecho para cualquier velocidad ascensional.

2.3. Método de Ihsan Sholji

Este método, similar al anterior, nuevamente involucra los cálculos el parámetro ψ para realizar la predicción de la expansión. Este método, que puede ser usado para cualquier condición hidráulica, trata de incorporar todas las variables anteriores en una ecuación a través de suposiciones físicas y de la ecuación de continuidad. Además supone, de manera ideal, que todos los granos del lecho son de igual tamaño.

Utilizando la ecuación de *Bond*, (Sholji, 1987) basada en una consideración axiomática de continuidad para cualquier régimen de flujo, en lugar de la de Richardson y Zaki (ecuación 4), se tiene que:

$$\frac{v_h}{v_s} = 1 - k_f C_e^2, \quad (11)$$

donde v_h es la velocidad de sedimentación autointerferida de los granos fluidizados y C_e viene de la ecuación 5 y está definido como:

$$C_e = \left(\frac{L_o}{L_e} \right) (1 - p_o) \quad (12)$$

Por tanto, de las ecuaciones 11 y 12, puede encontrarse para cada material una ecuación de la forma

$$\frac{L_e}{L_o} = \frac{k_{ds}(1 - p_o)}{\left[1 - \left(\frac{v}{v_s} \right) \right]^2} + k_3 \quad (13)$$

Donde los términos de ambos lados de la ecuación, son grupos adimensionales y las constantes k_{ds} y k_3 , pueden ser halladas mediante una regresión lineal de la forma $y = k_{ds}x + k_3$, evaluando experimentalmente caudal de lavado contra expansión del lecho, obteniendo una ecuación particular para cada tipo de material empleado. Es de anotar que el valor de v_s puede ser hallado mediante el procedimiento descrito el numeral anterior (ecuación 9).

3. METODOLOGÍA

Este trabajo analiza el comportamiento de lechos fluidizados, utilizando los medios granulares más usados en las plantas de tratamiento de nuestro medio, es decir, arena y antracita, y evaluar los métodos para la predicción de la expansión de los lechos. Para ello se realizó un procedimiento experimental que consiste en la reproducción en filtros piloto de las condiciones existentes en una planta de tratamiento de agua cuando se realiza el lavado de los filtros. El material se escogió de manera tal que cumpliera con las especificaciones dadas por el RAS-2000, que establece y regula criterios y requisitos mínimos para el diseño, construcción y supervisión técnica de todo lo relacionado con la potabilización del agua.

TABLA 1. Características de la arena para filtros rápidos (RAS-2000)

| Tipo de material | Tamaño efectivo | | Coeficiente de uniformidad | |
|------------------|-----------------|----------------|----------------------------|--------|
| | Mínimo (mm) | Máximo (mm) | Mínimo | Máximo |
| Arena Fina | 0,35 | 0,45 | | |
| Arena Estándar | 0,45 | 0,55 | 1,35 | 1,70 |
| Arena Gruesa | 0,55 | 0,65 | | |

La arena utilizada fue suministrada por Arenas Industriales y sus especificaciones se ajustan a las proporcionadas por el RAS-2000. La Tabla 1 muestra las características de las arenas empleadas. Además de emplear arenas, se utilizó lechos dobles, montando sobre estas un lecho de antracita. El tamaño de la antracita fue escogido mediante un procedimiento descrito por el CEPIS (Pérez, 1997) y verificando que los resultados se ajustaran a los propuestos en la norma. Esto es, se propone la ecuación

$$d_{90(\text{Antracita})} = C \cdot d_{10(\text{Arena})} \quad (14)$$

donde d_{90} y d_{10} , son los diámetros de tamices que dejan pasar el 90% y 10% de material respectivamente y C es una constante que depende del grado de entremezcla de los lechos. La profundidad de los lechos se eligió de acuerdo a las especificaciones de la norma que dice que debe estar entre 0,6 m y 0,9 m. Además es peso específico del material debe ser mayor que 2,0 para la arena y 1,4 para la antracita.

Así, obtenidas las granulometrías de los lechos y de acuerdo a las especificaciones en cuanto a tamaño del lecho propuesta por el RAS-2000, se procedió al montaje de lechos sencillos de arena y antracita y lechos dobles del mismo material para los tamaños estándar y gruesa según la norma. La altura del material en el filtro se usó igual a 0,40 m para la antracita y 0,25 m para la arena en la evaluación de los lechos sencillos, pero al usar lechos dobles se debió reducir el tamaño a 0,30 y 0,20 respectivamente debido a limitaciones del montaje en las baterías de filtración. Se utilizaron filtros circulares de acrílico de 0,40 m de diámetro y 1,25 m de altura. Las especificaciones de estos se encuentran en el trabajo de Álvarez y Salas, 1996.

Una de las variables más importantes y más difíciles de estimar, para la predicción de la expansión es quizás la porosidad inicial del lecho, debido a que cualquier muestra que se tome del lecho es una muestra alterada y

no va a reproducir las condiciones reales del mismo. Es por ello que se tuvo cuidado en reproducir las mismas condiciones cuando realizaron los cálculos de p_o en el laboratorio y en el momento de llenado de los filtros, de tal manera que el valor de p_o encontrado sea similar a la porosidad inicial del lecho en el filtro.

4. RESULTADOS

El proceso de experimentación se realizó de manera separada para las arenas y para las antracitas y para los lechos dobles (grueso y estándar), con el fin de obtener las expansiones para diferentes velocidades de lavado, para luego aplicar los modelos presentados. La Tabla 2 muestra las características generales de los lechos utilizados. El cálculo de v_s y ψ fue realizado mediante el procedimiento propuesto por Quaye B.A. y descrito en el numeral 2.2.

TABLA 2. Características de los materiales utilizados.

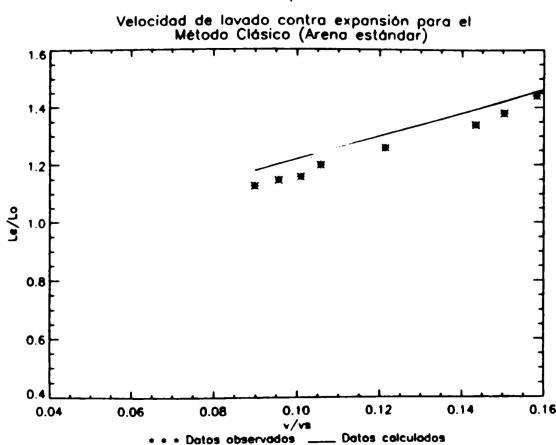
| Material | ρ_s | T_E (mm) | CU | p_o | L_o (m) | v_s (cm/s) | ψ |
|--------------------|----------|---------------|-----|-------|--------------|-----------------|--------|
| Arena estándar | 2,63 | 0,48 | 1,5 | 0,43 | 0,25 | 9,45 | 0,82 |
| Arena Gruesa | 2,63 | 0,56 | 1,5 | 0,42 | 0,25 | 11,75 | 0,75 |
| Antracita estándar | 1,39 | 1,0 | 1,5 | 0,47 | 0,40 | 6,63 | 0,69 |
| Antracita gruesa | 1,39 | 1,28 | 1,5 | 0,46 | 0,40 | 7,17 | 0,59 |

Se presentan únicamente los resultados encontrados para la arena estándar y el lecho doble estándar. Los resultados para la arena y antracita gruesa se encuentran en el trabajo de grado de Ceballos, L.I. y Zuluaga M.D., 2001.

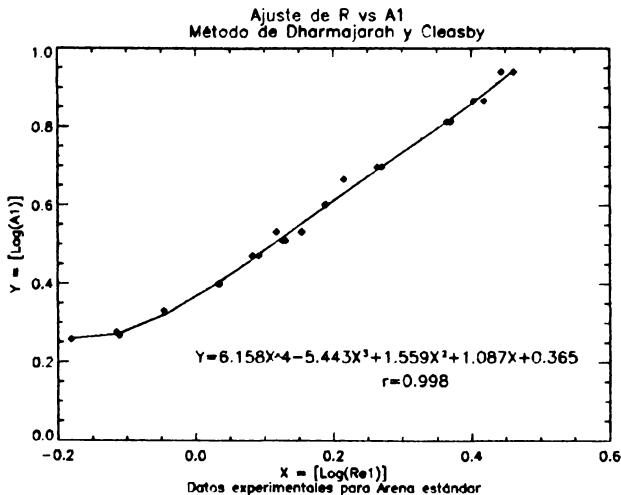
Como el Método Clásico es de directa aplicación la Figura 1a. muestra los resultados observados y calculados utilizando este método para la arena estándar, además se calcula el error en porcentaje. Además la Figura 1b. muestra un gráfico de L/L_o contra v/v_s para valores observados y calculados con el Método Clásico.

| v (cm/s) | v (m/min) | L/L_o | | |
|---------------|----------------|-----------|-----------|--------------|
| | | Observado | Calculado | Error (%) |
| 1,56 | 0,94 | 1,44 | 1,48 | 2,93 |
| 1,49 | 0,90 | 1,44 | 1,45 | 0,99 |
| 1,42 | 0,85 | 1,38 | 1,42 | 3,06 |
| 1,35 | 0,81 | 1,34 | 1,39 | 4,03 |
| 1,15 | 0,69 | 1,26 | 1,31 | 3,67 |
| 1,00 | 0,60 | 1,20 | 1,24 | 3,66 |
| 0,95 | 0,57 | 1,16 | 1,22 | 5,57 |
| 0,90 | 0,54 | 1,15 | 1,20 | 4,83 |
| 0,85 | 0,51 | 1,13 | 1,18 | 4,65 |

* $L_o = 25$ cm



En este estudio los caudales de lavado no superaron los 2,0 l/s (velocidad de lavado igual a 1,0 m/min), pues para este valor se producían expansiones que oscilaban entre el 40 y el 50% de la longitud inicial del lecho, y considerando que en la práctica las expansiones utilizadas son hasta el 30% se estaba cubriendo un rango amplio de expansiones.



Como los dos métodos restantes, *Dharmarajah-Cleasby* y *Sholji*, proponen hallar una expresión que permita encontrar el valor de la expansión, los resultados de estos modelos se presentan en las Figura 2 y Figura 3. Allí se presentan las expresiones obtenidas para cada método y más adelante se hace una verificación de las mismas, es decir, se predice el valor de la expansión, utilizándolas.

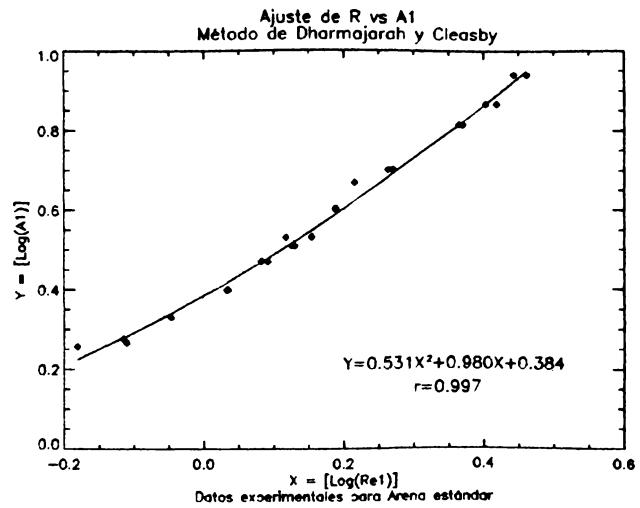


FIGURA 2. Gráfico de A , contra Re , para arena estándar, Método de Dharmarajah-Cleasby.
a. Ajustando una ecuación de cuarto orden. b. Ajustando una ecuación de segundo orden

Como se puede observar en la Figura 2, los ajustes realizados empleando una ecuación de segundo orden y una de cuarto no difieren mucho entre sí, es por ello que se decidió presentar, para los otros materiales los

resultados correspondientes a la ecuación de segundo orden, pues es más fácil de manipular que la de grado cuarto y los resultados obtenidos son igualmente satisfactorios.

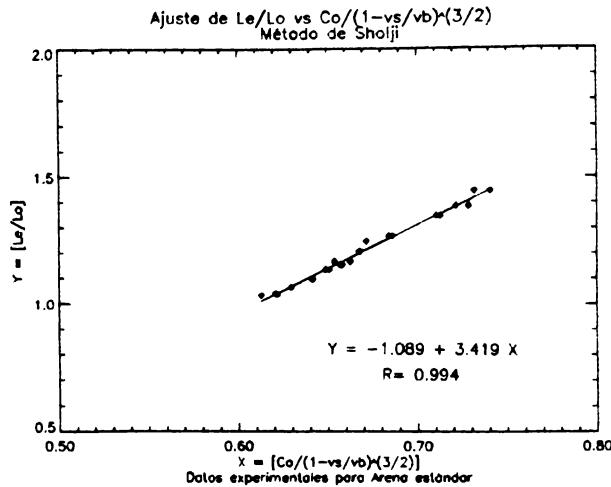


FIGURA 3. Gráfico de L_e/L_o contra $C_o/(1-v/v_s)^{3/2}$ para arena estándar, Método de Ishan Sholji

4.1. Predicción de la expansión

Como se mencionó, los métodos de Dharmarajah-Cleasby y Sholji requieren una fase de calibración, obtención de la ecuación, y una de validación, en la que se predice el

valor de la expansión y se compara con la observada; para ello fue necesario volver a realizar mediciones en el laboratorio de expansión contra caudal de lavado. Los resultados de la última fase se presentan a continuación para la arena estándar y para el lecho doble estándar.

| v (cm/s) | v (m/min) | L_e/L_o | | |
|---------------|----------------|-----------|-----------|-----------|
| | | Observado | Calculado | Error (%) |
| 1,22 | 0,73 | 1,32 | 1,33 | 0,30 |
| 1,09 | 0,66 | 1,27 | 1,25 | 1,80 |
| 0,99 | 0,59 | 1,23 | 1,22 | 0,46 |
| 0,90 | 0,54 | 1,18 | 1,18 | 0,03 |
| 0,81 | 0,49 | 1,14 | 1,15 | 1,21 |
| 0,69 | 0,42 | 1,09 | 1,09 | 0,18 |
| 0,56 | 0,34 | 1,07 | 1,06 | 0,86 |

* $L_o = 24,4$ cm

a.

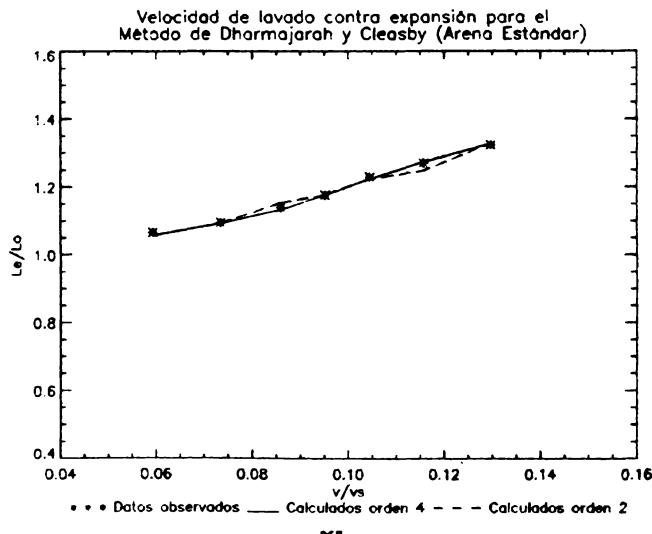
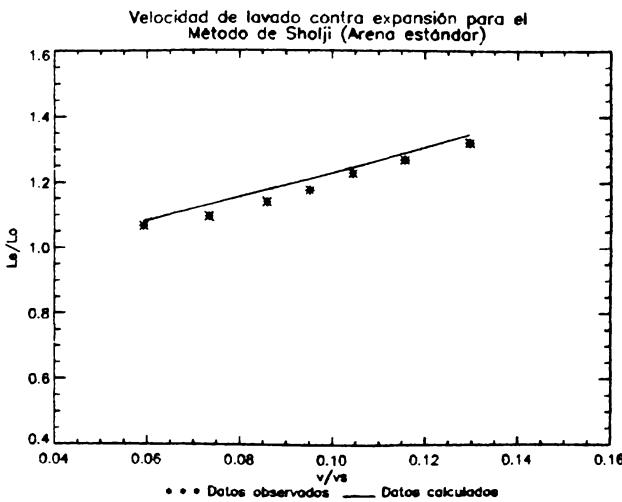


FIGURA 4. Expansiones obtenidas para la arena estándar utilizando el Método de Dharmarajah-Cleasby

| v (cm/s) | v (m/min) | L_e/L_o | | |
|---------------|----------------|-----------|-----------|-----------|
| | | Observado | Calculado | Error (%) |
| 1,22 | 0,73 | 1,32 | 1,35 | 1,85 |
| 1,09 | 0,66 | 1,27 | 1,29 | 1,57 |
| 0,99 | 0,59 | 1,23 | 1,25 | 1,35 |
| 0,90 | 0,54 | 1,18 | 1,21 | 2,90 |
| 0,81 | 0,49 | 1,14 | 1,18 | 3,17 |
| 0,69 | 0,42 | 1,09 | 1,13 | 3,26 |
| 0,56 | 0,34 | 1,07 | 1,08 | 1,35 |

* $L_o = 24,4$ cm

a.



b.

FIGURA 5. Expansiones obtenidas para la arena estándar utilizando el Método de Sholji

| v (cm/s) | v (m/min) | L/L_0 | | | Error (%) |
|---------------|----------------|-----------|-----------|--|--------------|
| | | Observado | Calculado | | |
| 1,24 | 0,75 | 1,55 | 1,46 | | 5,64 |
| 1,10 | 0,66 | 1,48 | 1,39 | | 5,99 |
| 1,08 | 0,65 | 1,42 | 1,38 | | 2,34 |
| 0,96 | 0,58 | 1,33 | 1,30 | | 1,99 |
| 0,88 | 0,53 | 1,25 | 1,27 | | 1,55 |
| 0,79 | 0,48 | 1,21 | 1,22 | | 1,03 |
| 0,67 | 0,40 | 1,13 | 1,17 | | 3,72 |
| 0,55 | 0,33 | 1,08 | 1,12 | | 3,26 |

* Referida a $L_0 = 45,5$ cm

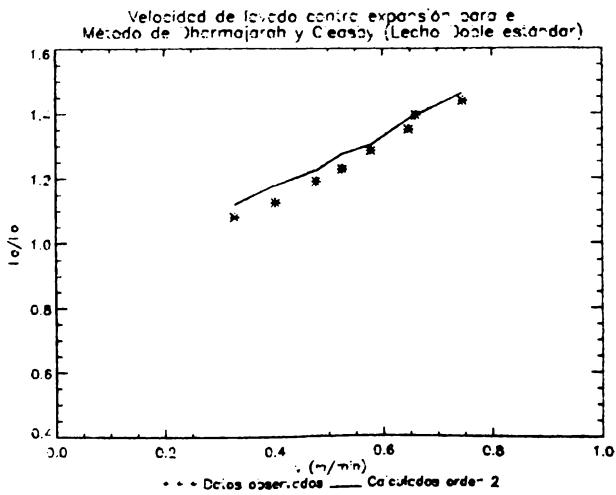


FIGURA 6. Expansiones obtenidas para el lecho doble estándar, Método de Dharmarajah-Cleasby.

| v (cm/s) | v (m/min) | L/L_0 | | | Error (%) |
|---------------|----------------|-----------|-----------|--|--------------|
| | | Observado | Calculado | | |
| 1,24 | 0,75 | 1,55 | 1,49 | | 3,81 |
| 1,10 | 0,66 | 1,48 | 1,41 | | 5,17 |
| 1,08 | 0,65 | 1,42 | 1,39 | | 1,63 |
| 0,96 | 0,58 | 1,33 | 1,33 | | 0,14 |
| 0,88 | 0,53 | 1,25 | 1,29 | | 2,44 |
| 0,79 | 0,48 | 1,21 | 1,24 | | 2,90 |
| 0,67 | 0,40 | 1,13 | 1,18 | | 4,49 |
| 0,55 | 0,33 | 1,08 | 1,12 | | 4,01 |

* Referida a $L_0 = 45,5$ cm

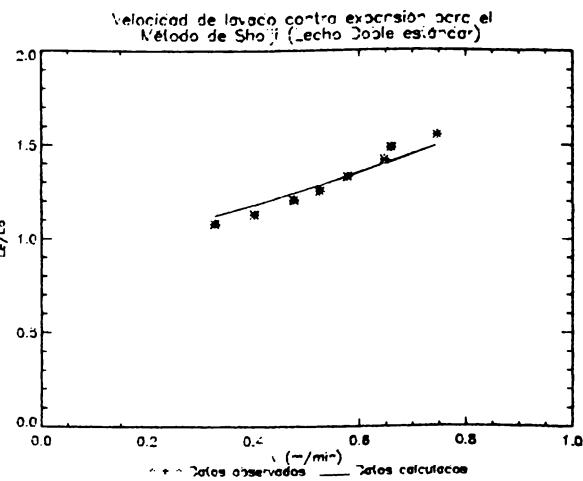


FIGURA 7. Expansiones obtenidas para el lecho doble estándar, Método de Sholji.

De la Figura 4 a la Figura 7 se presentan las expansiones observadas y las predichas por los métodos de Dharamrajah-Cleasby y Sholji, para el lecho sencillo y doble estándar y se muestran además estos resultados de manera gráfica. Nótese además que el eje de las abscisas no se divide por v_s , debido a que se tienen dos materiales con velocidades de sedimentación diferentes.

5. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Cuando se comparan los resultados de las predicciones por los tres métodos se encuentran errores muy similares y pequeños en todos ellos, lo cual se cumple también para los lechos no mostrados en este artículo (lechos

gruesos de arena y antracita). Esto quiere decir que los modelos predicen bien expansiones para diferentes velocidades de lavado, como lo muestran los errores obtenidos (menores del 10%). Como se ve, las expansiones están calculadas a partir de valores de L/L_0 como lo utilizan Sholji y Dharamrajah-Cleasby en sus trabajos, esto es aplicado también para el Método Clásico para unificar un criterio de comparación entre los modelos.

El método Clásico tiene la gran ventaja de ser un procedimiento de aplicación directa, es decir, no requiere experimentación en laboratorio para su calibración, y así predecir la expansión. Sin embargo, el método tiene ciertas desventajas, entre las que se puede mencionar que

no tiene en cuenta para nada la forma de los granos que influye, como se ha dicho, en la expansión del lecho. Además, este método presenta deficiencias en cuanto a la predicción de la expansión de capas gruesas de lecho para velocidades de lavado bajas, debido a que arroja valores negativos de expansión lo que podría significar la no expansión de esas capas. El método propuesto por Dharmrajah-Cleasby tiene la ventaja de utilizar un parámetro adicional y, que considera la influencia de la forma de los granos en expansión de los lechos, reproduciendo mejor el fenómeno físico. En caso tal de utilizar lechos con especificaciones diferentes a las utilizadas en este trabajo, el método debe ser nuevamente calibrado lo que implica realizar mediciones de expansión contra caudal de lavado en un laboratorio, para luego ajustar y evaluar, las ecuaciones de predicción. De todas formas, el método requiere para su utilización que las ecuaciones de predicción sean evaluadas mediante iteraciones, debido a que tanto los términos A , y R_e , dependen ambos de la porosidad expandida, por supuesto esto no es una limitación, debido a la facilidad que presentan las herramientas computacionales.

Se podría decir que el Método de Sholji representa la condición intermedia entre el Método Clásico y el de Dharmrajah-Cleasby, pues considera la forma de los granos y a pesar de que requiere una fase de calibración, la ecuación de predicción que se obtiene es de fácil uso, pues relaciona los términos de manera lineal y para hallar el valor de la expansión del material basta con reemplazar los valores de la velocidad de lavado, la porosidad inicial y el valor de la esfericidad del material. La expansión, definida como (L_e/L_0) tal como lo proponen Dharmrajah-Cleasby y Sholji, que en nuestro concepto es más acertada porque permite predecir fácilmente para cualquier profundidad del lecho empleado, cuando éste es sometido a un flujo ascendente. De esta forma es sumamente útil para el diseñador, para la colocación de las canaletas de recolección del agua y para el diseño definitivo de las unidades de filtración en la planta. Otro factor importante por el cual nos interesa calcular la longitud del lecho expandido, es para saber cuál es la porosidad óptima a la cual, el lecho se lava adecuadamente. Es fácil, entonces, para una porosidad óptima, encontrar la velocidad de lavado necesaria para fluidificar el lecho. Sobre este último tema, no se ha encontrado suficiente bibliografía, que indique cuál es la porosidad óptima a la cual el lecho se lava adecuadamente.

En conclusión, si se utiliza en el diseño de los filtros de una planta de potabilización de agua, materiales con las mismas características de las presentadas en este trabajo, es posible entonces utilizar las ecuaciones de calibración propuestas para predecir la expansión que sufre un lecho filtrante sometido a un flujo ascendente. Para ello, la metodología sugerida debido a la facilidad de aplicación y buenos resultados, puede ser la obtenida a partir del Método de Sholji; en caso de que las características del material usado difieran de las empleadas en este trabajo, las predicciones deben ser estimadas utilizando el Método Clásico por su aplicación directa.

6. REFERENCIAS

- Arboleda, J., 2000. Teoría y Práctica de la Purificación del Agua. Tomo 2. Tercera Edición. Bogotá. Ed. McGraw Hill.
- Bowles, J., 1980. Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil. Bogotá. Ed. McGraw Hill. 1980. p 215.
- Carmona, M.C. y Hincapie, P.D., 1980. Retrolavado de Filtros Granulares. TDG Ingeniería Civil. Medellín. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas.
- Ceballos, L.C. Zuluaga, M.D. 2001. Evaluación de modelos de predicción de expansión de lechos filtrantes. TDG Ingeniería Civil. Medellín. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas.
- Cleasby, J.L. y Fan, K., 1981. Predicting Fluidization and Expansion of Filter Media, Journal of Environmental Engineering Division, ASCE. Vol 107, No EE3. pp 456-471.
- Dharmrajah, A.H. y Cleasby J.L., 1986. Predicting the Expansion Behavior of Filter Media, Journal AWWA. 78:66.
- Munera, J.G. y Quiceno, C.A., 1978. Retrolavado de Filtros Granulares. TDG Ingeniería Civil. Medellín. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. 99 p.
- Pérez, J.A., 1977. Expansión de Lecho contra Caudal de Lavado en un Filtro. Tesis Magister Ingeniería Civil. Medellín. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. 51p
- Pérez, J.A., 1997. Manual de Potabilización del Agua. 3^a ed., Medellín. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. 504 p.
- Quaye, B.A., Discussion, 1982. Predicting Fluidization and Expansion of Filter Media, Journal of Environmental Engineering Division, ASCE. Vol 108, No EE2. pp 433-435.

Ministerio de Desarrollo Económico. Colombia.
Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y
Saneamiento Básico. s.p.i. RAS-2000.

Richter, C.A., y Scremin, P. R. Lavagem dos Filtros. s.p.i.
13 p.

Salas, W. y Alvarez, F., 1996. Filtros Piloto para
Experimentación con Diferentes Medios Filtrantes.
TDG Ingeniería Civil. Medellín. Universidad Nacional
de Colombia. Facultad de Minas. 110 p.

Sholji, I., 1987. Expansion of Granular Filters During
Backwashing, Journal of Environmental Engineering
Division, ASCE. Vol 113, No 3. pp 516-531.

Sholji, I. y Johnson, A., 1987. Comparison of Backwash
Models for Granular Media, .Journal of Environmental
Engineering Division, ASCE. Vol 113, No 3. pp 532-
549.