

# Estudio de Factibilidad para el Cambio de Tasa Constante a Tasa Declinante en el Sistema de Filtración de una Planta de Potabilización

Muñoz, Marcelo<sup>1</sup>; Huaraca, Miriam<sup>1</sup>; Aldás, María Belén<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito, Ecuador

**Resumen:** Se ha estudiado el comportamiento hidrodinámico de un filtro piloto de una planta de potabilización que presenta problemas de presiones negativas que liberan burbujas de aire, que a su vez impiden el funcionamiento del filtro. Para resolver esta problemática se plantea la modificación de la operación mediante un orificio normalizado y una estructura hidráulica que funciona como vertedero. Se evalúan parámetros como: caudal, pérdida de carga, turbiedad efluente y carrera de filtración. El vertedero con altura de 10 cm, cumple de manera deficiente con los parámetros de diseño ya que presenta altas tasas de filtración en carreras cortas. El orificio de 230 mm cumple satisfactoriamente los parámetros de diseño, registrando una carrera de 54 horas, un caudal medio de 160 l/s y un gradiente de caudal de 1,6 l/s.h. Adicionalmente se verifica que la calidad del agua potable cumple con la NTE INEN 1108:2014.

**Palabras clave:** Filtración, potabilización, tasa declinante, tasa constante.

## Feasibility Study of the Change from Constant to Declining Rate of Filtration in a Water Treatment Plant

**Abstract:** The hydraulic performance of a pilot filter in a water treatment plant is studied. This filter has been operated with negative pressures releasing air bubbles that clog the filter. In order to solve this problem, a modification in the filter operation is proposed. Two hydraulic structures are evaluated, an orifice and a structure working as a dump. Several hydraulic parameters are evaluated: flow, pressure drop, effluent turbidity and filter run length. The dump with height of 10 cm work poorly under the design parameters due to high rates in small run length values. The 230 mm orifice works adequately with the design parameters, with a run length of 54 hours, a mean flow of 160 l/s and a gradient flow rate of 1,6 l/s. h. In addition, water quality is verified with NTE INEN 1108:2014.

**Keywords:** Filtration, water purification, declining rate, constant rate.

### 1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se ha evidenciado la necesidad de modificar las tecnologías de diseño de las plantas de potabilización, principalmente para cubrir las altas demandas poblacionales, maximizar el uso sostenible de los recursos y mitigar la contaminación ambiental derivada de los efluentes.

En Sudamérica existen diversos estudios referentes a la caracterización de efluentes de una planta de potabilización, como es el caso de Lezema-Argentina, del cual se infiere la necesidad de un control minucioso de las operaciones unitarias, es decir, se requiere una automatización de la planta (Aguinaga y Crisanto, 2014).

La planta de potabilización objeto del estudio no dispone de un sistema de automatización que permita tener un control permanente y detallado de las operaciones unitarias

involucradas en el proceso de potabilización. Actualmente se evidencia problemas en el proceso de filtración, mismo que no ha sido modificado desde su inauguración en 1977 (Ojeda, 2013).

La planta cuenta con filtros de nivel y tasa constante de filtrado, cuyo funcionamiento depende de una válvula que tiene dispositivos complejos que requieren de un mantenimiento continuo para lograr las condiciones esperadas de caudal del flujo.

La válvula reguladora tiene mecanismos móviles que con el paso del tiempo han sufrido desgastes y fisuras, mostrando falencias en su operación, ya que genera presiones negativas que a su vez liberan burbujas de aire que obstruyen el filtro afectando su proceso de remoción, lo cual incrementa la pérdida de carga y disminuye el tiempo de operación, así como la calidad del efluente (Villalba, 2004).

maria.aldas@epn.edu.ec  
Recibido: 19/06/2015  
Aceptado: 02/09/2016  
Publicado: 20/01/2017

Para el fortalecimiento operativo del proceso de filtración, la presente investigación plantea el estudio de dos estructuras hidráulicas fijas con sistema de tasa declinante: un orificio y una estructura que funciona como vertedero, que suplan la función de la actual válvula y que no requieren de ningún sistema de regulación.

Con esta investigación se plantea la utilización de un sistema de tasa declinante, para no forzar a la unidad a operar con tasa constante, especialmente, hacia el final de su carrera de filtración cuando el filtro está colmatado.

El cambio del sistema facilitará mantener un funcionamiento eficaz de los filtros, maximizando las acciones correctivas ejecutadas por la planta con el fin de tener el control permanente de los procesos de potabilización, de lo contrario la planta seguirá operando con un sistema sujeto a daños permanentes y filtros fuera de servicio (Villalba, 2004)

Este trabajo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2, se exponen brevemente los conceptos teóricos relacionados con el proceso de filtración como parte un tratamiento de potabilización del agua y la metodología utilizada en la investigación. En la sección 3 se presentan los principales hallazgos y finalmente, en la sección 4 se exponen las conclusiones obtenidas.

## 2. MARCO TEÓRICO

La producción de agua potable es un conjunto de procesos químicos e hidráulicos que se lleva a cabo para retirar los sólidos contenidos en el agua, filtrarla y desinfectarla.

De acuerdo con Acosta (2008), la potabilización comprende procesos como captación, sedimentación, coagulación y floculación, alcalinización, filtración, desinfección, control de calidad y distribución.

Dentro del proceso de potabilización, la etapa de filtración consiste en el paso del agua por mantos de arena con una granulometría adecuada. Este proceso es complejo, con efectos de sedimentación, adsorción, floculación y acción biológica, que además elimina turbiedad, microorganismos y quistes de ameba que son resistentes a la cloración (García, 2010).

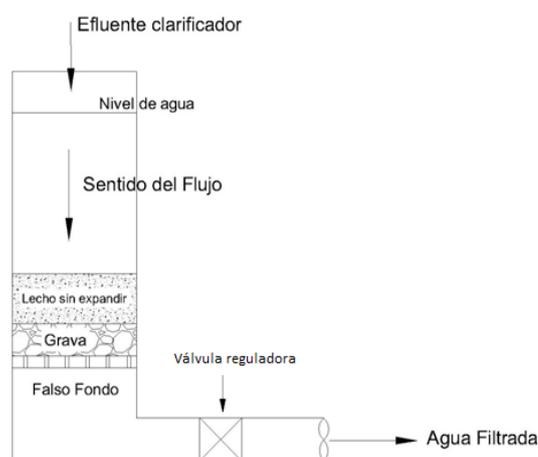
Un filtro puede operar básicamente de dos formas: una a tasa constante de filtrado y otra a tasa declinante de filtrado. En el primer caso, el caudal de filtrado se mantiene constante a lo largo de la carrera de filtración, ya que el nivel del agua no varía debido a la acción de una válvula de control de accionamiento automático. Al principio de la carrera, la mayor parte de la carga disponible es disipada sobre la válvula de control, a medida que la pérdida de carga a través de los medios aumenta la válvula de control se abre para mantener la fuerza motriz total y por lo tanto el nivel de agua y velocidad constante (Thompson et al., 2004).

Mientras que en el segundo caso, el caudal varía ligeramente entre un mínimo y un máximo aceptable ya que no hay válvula de control de efluente, este tipo de control generalmente se lo

usa por razones económicas pues la calidad del efluente es igual a los filtros de tasa constante. En el diseño de estos filtros, se fija una carga hidráulica con el fin de garantizar la máxima tasa, este sistema de control declinante genera beneficios económicos a través de la mejora de la carrera de filtración y la reducción de la frecuencia de limpieza del filtro (Perea et al., 2014).

El sistema de tasa constante requiere de un mecanismo regulador con piezas móviles que sufren desperfectos con su uso y hacen que el caudal no se mantenga constante. El sistema de tasa declinante, por su parte, permite una variación de caudal mediante el uso de un dispositivo hidráulico que regula dicha variación.

La planta potabilizadora en estudio posee 8 filtros con material filtrante de antracita, arena y granate, una capa de grava y un fondo de bloque de cerámica. Cada filtro es regulado con una válvula que gobierna el sistema hidráulico, que está instalada en el tubo de salida. Un esquema de la instalación se muestra en la Figura 1.



**Figura 1.** Esquema de un filtro y ubicación de la válvula reguladora en el sistema de filtración

La válvula reguladora actual que aparece en la Figura 2, está conformada por los siguientes dispositivos: tubería interior de 300 mm de diámetro, estrangulación Venturi de abertura fija de 220 mm de diámetro, compuerta móvil, diafragma y un sistema de pesas de ajuste de caudal, cuya regulación es únicamente manual.

Este estudio se realizó en uno de los 8 filtros, reemplazando la válvula reguladora por dos estructuras hidráulicas fijas que permitan en funcionamiento con tasa declinante, para evaluar su comportamiento.



**Figura 2.** Válvula reguladora de la tasa de filtración actual

La primera estructura hidráulica fija constituye un orificio normalizado de un determinado diámetro que garantice la mínima variación de caudal, este dispositivo fue construido con una longitud de 0,8 m con un diámetro externo de 400 mm, en fibra de vidrio, un esquema puede observarse en la Figura 3.

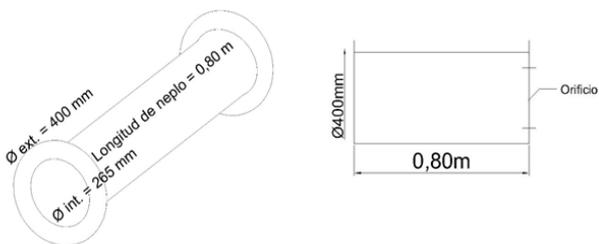


Figura 3. Dimensiones del orificio normalizado

El segundo prototipo es una estructura hidráulica en forma de “H” donde la parte horizontal cumple las funciones de vertedero, con un diámetro igual a de la tubería de salida, esto es 400 mm, en fibra de vidrio, cuyo esquema aparece en la Figura 4.

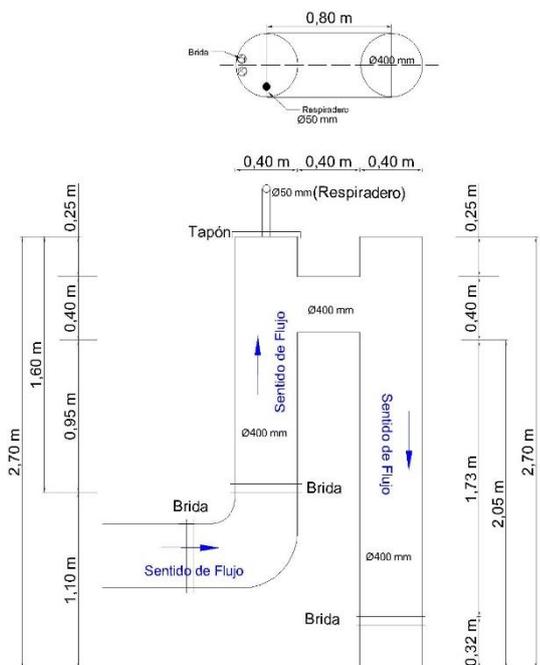


Figura 4. Dimensiones del vertedero

Para la evaluación de los prototipos se utilizaron los siguientes procedimientos:

- Observar, procesar y verificar el comportamiento hidrodinámico del filtro con tasa declinante mediante un ensayo análogo a la prueba de trazadores y a través de datos de turbidez de afluente y efluente.
- Obtener y procesar los datos referidos a los parámetros de diseño en base al comportamiento de un flujo estacionario uniforme.
- Caracterizar parámetros físicos del agua, mediante:
  - Valoración de la turbidez con el método nefelométrico (American Public Health Association, 2010).

- Valoración del color mediante una comparación visual con los patrones de Platino-Cobalto (American Public Health Association, 2010).

Para el desarrollo de este estudio, se evaluaron parámetros como caudal, pérdida de carga y carrera de filtración considerando que el prototipo se encuentra bajo condiciones reales de operación (Villalba, 2004).

### 2.1 Dimensiones del Filtro Piloto

Para determinar las dimensiones del accesorio que reemplace a la válvula reguladora, que permita el cambio del sistema de tasa constante a tasa declinante, se establecieron los parámetros de diseño en función de la recopilación y evaluación de información referente a: método de control de los filtros, tasa de filtración, carga hidráulica disponible, calidad de afluente y calidad de efluente.

La recopilación de información se fundamentó en los registros mensuales de operación de los filtros para un periodo de 8 meses.

Bajo este antecedente, se obtuvo los siguientes parámetros de diseño:

- Caudal: máximo 200 l/s y mínimo 120 l/s, con un caudal promedio de 160 l/s.
- Tasa de filtración: máxima de 367,3 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d y mínima de 220,4 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d.
- Pérdida de carga: En torno a 2,5 m.
- Carrera de filtración: entre 50 y 60 horas, pero no son convenientes carreras superiores a 60 h por cuanto se dificulta el lavado.
- Turbiedad efluente: inferior a 0,5 NTU.

Para tener un adecuado control del sistema de filtración se instalaron 3 piezómetros que tuvieron como punto de referencia el piso de la galería de los filtros, el mismo que indicó 0+00, todas las lecturas se registraron con una regleta común.

Los piezómetros permitirán evaluar las siguientes alturas:

- Piezómetro 1: altura de aguas arriba del filtro ( $H_1$ ).
  - Piezómetro 2: altura de agua después del filtro ( $H_2$ ).
  - Piezómetro 3: altura de agua en el estrangulamiento Venturi. ( $\varnothing=220$  mm), en la garganta de la válvula ( $H_3$ ).
- Con los piezómetros instalados se registraron los siguientes parámetros Ecuaciones (1) y (2):

• Pérdida De Carga En El Filtro ( $h_f$ )

$$h_f = H_1 - H_2 \tag{1}$$

• Carga Sobre El Orificio De Salida ( $h_o$ )

$$h_o = H_2 - 0,70 \tag{2}$$

El valor de 0,70 m corresponde a la altura del eje del orificio de salida en referencia al piso de la galería de filtros considerado como nivel 0+00. El diámetro del orificio debe

garantizar que la fluctuación del caudal se encuentre dentro de los límites establecidos en los parámetros de diseño.

Para determinar el diámetro del orificio se usó la ecuación de cálculo del caudal de un fluido a través de un orificio de pared delgada, Ecuación (3) (Arboleda, 2000).

$$Q = C_d A \sqrt{2gH} \quad (3)$$

Donde

$Q$ : caudal en  $m^3/s$ .

$C_d$ : coeficiente de descarga para pared delgada.

$A$ : área del orificio en  $m^2$ .

$g$ : gravedad en  $m/s^2$ .

$H$ : pérdida de carga en m.

Operando, y considerando un área circular, se obtiene Ecuación (4):

$$D^2 = \frac{4Q}{\pi C_d \sqrt{2gH}} \quad (4)$$

Se considera:

Caudal máximo de 200 l/s,  $Q = 0,2 m^3/s$ .

Coficiente de descarga para una pared delgada,  $C_d = 0,6$ .

Pérdida de carga disponible,  $H = 2,5 m - 0,70 m = 1,8 m$ .

Finalmente

$$D = \sqrt{\frac{4 \times 0,2}{\pi \times 0,6 \times \sqrt{2 \times 9,81 \times 1,8}}} = 0,267 m$$

El diámetro experimental máximo del orificio es de 265 mm. Con estos antecedentes se construyó un neplo de 0,80 m de largo con un diámetro de 400 mm en fibra de vidrio, diámetro de la actual válvula reguladora. Internamente está provisto de un orificio de 265 mm de diámetro, además el mismo permite colocar placas con orificios de menor diámetro con ayuda de tornillos de acero inoxidable, para evaluar el comportamiento hidráulico de diámetros menores.

Se propone además, una estructura hidráulica en forma de "H", donde la parte horizontal cumple las funciones de vertedero, esta estructura tiene el mismo diámetro de la tubería de salida ( $\varnothing=400 mm$ ).

Considerando que la altura mínima del vertedero debe ser la altura del lecho filtrante, se experimentó con vertederos de 0,0 m, 0,10 m, y 0,20 m sobre el nivel del lecho filtrante.

## 2.2 Funcionamiento de los Prototipos

Para determinar las condiciones de operación, se realizó un muestreo tanto de afluente como del efluente del filtro, así como, las lecturas piezométrica cada dos horas.

En cada carrera de filtración tanto para el orificio normalizado como la estructura hidráulica en forma de "H" se monitoreó:

- Altura de agua en el filtro  $H_1$ .
- Altura de agua después del filtro  $H_2$ .
- Turbiedad afluente.
- Turbiedad efluente.

- Color afluente.
- Color efluente.
- Caudal.

Con estos datos se calculó los siguientes parámetros:

- Tasa de filtración.
- Pérdida de carga en el filtro (Ecuación (1)).
- Carga sobre el orificio de salida (Ecuación (2)).

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se muestran los resultados obtenidos para los diferentes ensayos:

### 3.1 Orificio Normalizado

La instalación del orificio normalizado puede observarse en la Figura 5.



a)



b)

**Figura 5.** a) Neplo con orificio interno b) Instalación del orificio.

El funcionamiento del filtro piloto permitió obtener los resultados descritos en la Tabla 1 y Figura 6.

De acuerdo a la Figura 6, los orificios de 265 mm y 250 mm tuvieron altos caudales, esto implicó tener tasas mayores a las establecidas en los parámetros de diseño, por lo que se requirió sacar de servicio a otro filtro para mantener constante el nivel del agua durante el funcionamiento del filtro piloto. Además las carreras de filtración son inferiores a 45 horas, derivando una mayor frecuencia de lavado de los filtros,

dificultando así la operación integral de las cámaras de filtración existentes en la planta.

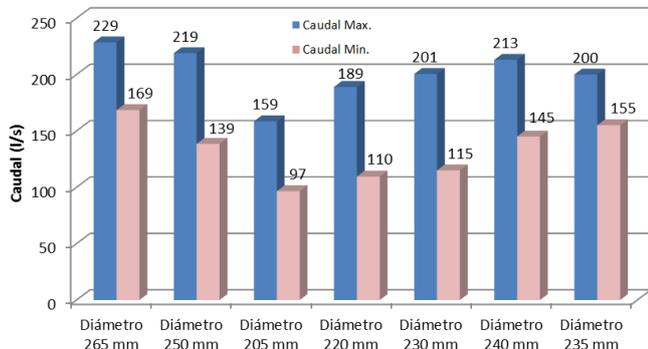
Se observó que el mejor comportamiento se produjo en la carrera del orificio de 230 mm de diámetro ya que ofreció la mejor adaptación a los parámetros de diseño del sistema de tasa declinante. Presentó una variación de caudal entre 200,5 l/s y 115 l/s con una carrera promedio de 66 horas registrando un gradiente de caudal del orden de 1,30 l/s.h, lo que significa una variación paulatina del caudal.

**Tabla 1.** Resultados para ensayos del orificio normalizado

Diámetro de orificio mm	Nº de carrera	Caudal Max. l/s	Caudal Min. l/s	Carrera h
265	1	228,5	68,5	46
250	2	266,5	167,5	41
	3	171,5	109,5	66
205	5	158,5	96,5	69
220	7	172,5	109,5	77
	8	205,5	-	57
	9	198,0	121,0	61
230	10	189,0	98,0	67
	14	213,0	119,0	72
	15	202,0	122,0	62
240	12	213,0	145,0	61
235	13	200,0	155,0	43

Diámetro de orificio mm	Max. Turbiedad Afluente NTU	Max. Turbiedad Efluente NTU	Min. Pérdida carga en filtro m	Max. pérdida carga en orificio m
265	-	-	1,00	2,10
250	-	-	1,20	2,00
	2,20	0,80	0,60	2,70
205	8,71	0,85	0,55	2,75
220	1,91	0,56	0,68	2,57
	0,80	0,36	0,72	2,58
230	1,08	0,42	0,50	2,67
	1,60	0,54	0,68	2,60
	1,12	0,62	0,76	2,17
	1,59	0,63	0,85	2,43
240	1,16	0,63	0,72	2,44
235	1,29	0,47	0,72	2,40



**Figura 6.** Resultados de caudales máximos y mínimos para orificio normalizado.

La pérdida de carga promedio en el orificio fue de 2,47 m, mismo que está alrededor del parámetro de diseño (2,5 m),

indicando un aprovechamiento integral de la carrera de filtración.

La pérdida de carga al inicio de la carrera en el orificio es alta y disminuye paulatinamente al final, esto se produce por la disminución de la tasa de filtración y por tanto de las velocidades en el orificio a lo largo de la carrera; lo contrario ocurre con la pérdida de carga en el lecho filtrante, la misma que al inicio es relativamente baja y a medida que el filtro se acolmata a lo largo de la carrera se incrementa. La mínima pérdida de carga promedio en el filtro fue de 0,70 m.

La turbiedad promedio del efluente fue de 0,5 NTU indicativo que la calidad del efluente se mantiene bajo los parámetros de diseño, cabe recalcar que la turbiedad del efluente aumenta en medida que aumenta la carrera de filtración.

### 3.2 Vertedero

La estructura hidráulica instalada se observa en la Figura 7.



**Figura 7.** Vertedero

De forma general este dispositivo presentó altas tasas de filtración, en consecuencia el filtro piloto demanda un ingreso mayor de agua, motivo por el cual se debió manipular la estrangulación de la válvula de salida, para mantener el nivel del agua en los otros filtros.

Los resultados presentados en la Tabla 2 y Figura 8 corresponden a las carreras más representativas para cada caso, porque no se cuenta con un registro de la manipulación de la válvula, ya que esta se abría o cerraba acorde al criterio del operador de turno. De acuerdo a la interpretación de la Tabla 2 y Figura 8 de los ensayos realizados en el vertedero se pueden tener los siguientes casos:

Caso 1.- (nivel de vertedero 0,00 m) Se obtuvo un caudal medio de 185,5 l/s con una carrera de 47 horas y un gradiente de caudal de 4,57 l/s.h, lo cual implica en una variación brusca de caudal lo que no es adecuado para el filtro.

Las pérdidas de carga indicadas en la Tabla 2 están fuera de los parámetros de diseño, lo que significa que se tiene carga hidráulica remanente no aprovechada por el dispositivo. La turbiedad del efluente se mantiene bajo el valor indicado en los parámetros de diseño, indicando una buena calidad del efluente de los filtros.

Caso 2.- (nivel de vertedero 0,10 m) Se obtuvo un caudal medio de operación de 162 l/s y un gradiente de caudal de

2,78 l/s.h, estos valores están alrededor de los parámetros de diseño.

La pérdida de carga y calidad del efluente tienen semejante comportamiento que el Caso 1.

Caso 3.- (nivel de vertedero 0,20 m). El caudal medio fue de 169 l/s y la carrera media de filtración es de 43 horas, obteniéndose un gradiente de caudal de 3,93 l/s.h, igualmente estos valores están fuera de aquellos considerados en el diseño.

La pérdida de carga y calidad del efluente tienen semejante comportamiento que el Caso 1.

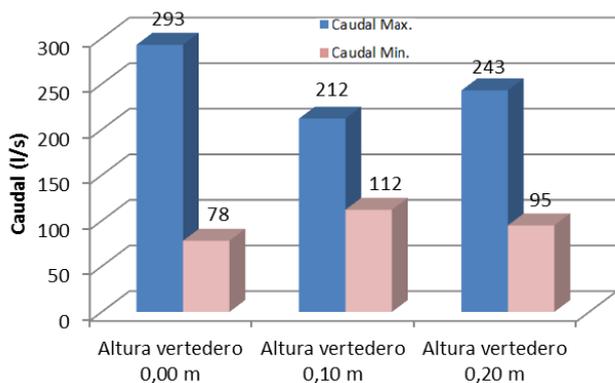
Para los tres casos se observa una excesiva absorción de aire en la tubería de salida, originando expulsión de agua del conducto de recolección del agua filtrada hacia el piso de la galería de filtros. También se verificó la generación de ruido en niveles elevados, lo que incomoda sustancialmente la permanencia en la galería de filtración.

**Tabla 2.** Resultados para ensayos del vertedero

Nivel de vertedero m	Nº de carrera	Caudal Max. l/s	Caudal Min. l/s	Carrera H
0,00	17	293	78	47
0,10	19	212	112	36
0,20	28	243	95	43

Nivel de vertedero m	Max. Turbiedad Afluente NTU	Max. Turbiedad Efluente NTU	Min. pérdida carga en filtro m	Max. pérdida carga en vertedero M
0,00	1,12	0,46	1,23	0,66
0,10	1,18	0,52	0,75	1,12
0,20	0,71	0,43	1,19	0,35



**Figura 8.** Resultados de caudales máximos y mínimos para vertedero

### 3.3 Ensayos Adicionales

Se realiza ensayos adicionales con orificios de 235 y 230 mm para confirmar los resultados anteriores.

- *Ensayos en orificio de 235 mm de diámetro*

Los valores obtenidos se presentan en la Tabla 3.

Así se tiene un caudal máximo de 225 l/s y un caudal mínimo de 115 l/s, que se indica en la Figura 9, dando un caudal

medio de 170 l/s con una carrera de filtración de 59 horas lo que da un gradiente de caudal de 1,86 l/s.h.

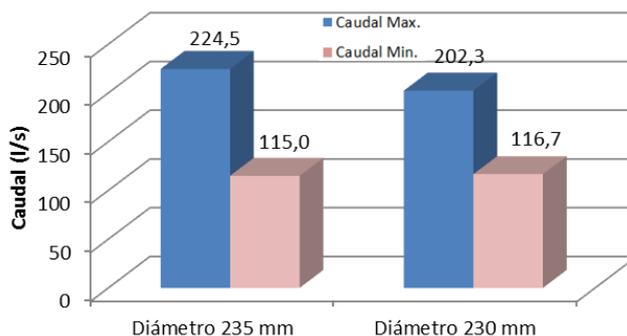
El caudal medio es superior al parámetro de diseño del sistema de tasa declinante, sin embargo el gradiente de caudal es apropiado.

**Tabla 3.** Resultados para ensayos adicionales

Diámetro de orificio mm	Nº de carrera	Caudal Max. l/s	Caudal Min. l/s	Carrera h
235	35	208	116	6
	36	241	114	51
	43	202	121	47
230	44	204	103	65
	45	201	126	49

Diámetro de orificio mm	Max. Turbiedad Afluente NTU	Max. Turbiedad Efluente NTU	Min. pérdida carga en filtro m	Max. pérdida carga en orificio M
235	1,12	0,45	0,98	2,30
	1,79	0,46	1,98	1,28
	1,14	0,48	1,07	2,19
230	1,96	0,57	0,76	2,52
	1,08	0,52	0,98	2,28



**Figura 9.** Resultados de caudales máximos y mínimos para ensayos adicionales placas de 253 mm y 230 mm

- *Ensayos en orificio de 230 mm de diámetro*

De la apreciación de la Figura 9, se tiene un caudal máximo de 202,3 l/s y caudal mínimo de 116,7 l/s obteniéndose un caudal medio de 159,5 l/s, además la carrera media de filtración es de 53,7 horas, generando un gradiente de caudal de 1,6 l/s.h y se tiene una carga hidráulica de 2,33 m.

Estos resultados ratifican las pruebas iniciales en las cuales se corrobora que el funcionamiento del filtro piloto con orificio normalizado de 230 mm diámetro, cumple de forma eficiente con los parámetros de diseño establecidos para el control de tasa declinante.

### 3.4 Curva de descarga para orificio normalizado con 230 mm de diámetro

Con los datos del ensayo realizado con el orificio normalizado de 230 mm, se ha elaborado la curva de descarga que se indica en la Figura 10.

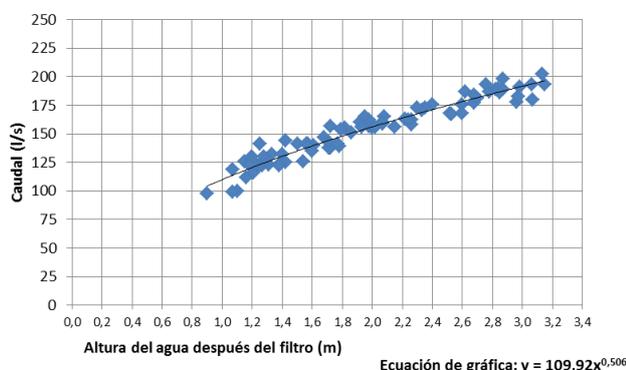


Figura 10. Curva de descarga orificio de 230 (mm)

Esta curva describe el caudal que fluirá a través del orificio en función de la altura del agua después del filtro ( $H_2$ ).

La curva de la Figura 10 cumple con el modelo matemático propuesto para una curva de calibración, ya que la relación continua de  $H-Q$  se ajusta a una ecuación parabólica, motivo por el cual no requiere ningún ajuste.

La generación de esta curva permitirá transformar niveles de agua de forma práctica a caudales, facilitando así las condiciones de operación.

### 3.5 Comparación de valores de color y turbidez obtenidos en ensayos realizados con límite máximos permisibles.

Los resultados presentados en la Tabla 4 hacen referencia a los valores máximos para todos los ensayos realizados.

Tabla 4. Resultados para ensayos adicionales

Parámetro	Unidad	Ensayos		NTE INEN 1108
		Máx. Afluente	Máx. Efluente	Límite máximo permitido
Color	Unidades de color aparente (Pt-Co)	10	5	15
Turbiedad	NTU	1.5	0,8	5

A pesar que se considera los valores máximos de los resultados obtenidos, se verifica que la planta de potabilización cumple con los requisitos de la norma NTE INEN 1108 incluso si se realiza la comparación de la calidad del agua previo al ingreso al sistema de filtración, es decir, con los valores para el afluente.

Los valores registrados para el efluente indican que el proceso de desinfección será eficiente.

## 4. CONCLUSIONES

Las condiciones físicas e hidráulicas del sistema de filtración de la planta de tratamiento cumplen los requisitos para una fácil implementación del sistema de control declinante.

La implementación del sistema de tasa declinante permitirá mejorar las condiciones operativas de la planta, principalmente porque se evita el calibrado manual de la válvula reguladora, ya que el mismo, sería sustituido por el nuevo dispositivo de control con lo que se evita costos de mantenimiento teniendo así, un óptimo aprovechamiento de los recursos disponibles.

El orificio con 230 mm de diámetro es el dispositivo que mejor se ajusta a los parámetros de diseño, por su desempeño en el proceso de filtración.

Para todos los ensayos realizados la turbiedad del efluente es inferior a 0,8 NTU mostrando que el lecho filtrante y drenaje inferior están en buenas condiciones, además existe una buena distribución del material granular que favorece los procesos de remoción de sólidos suspendidos en el agua, en consecuencia la calidad del agua filtrada permite tener un eficiente proceso de desinfección y así cumplir con la normativa vigente.

El funcionamiento hidráulico del neplo con diámetro interno de 230 mm cumple con el modelo matemático propuesto para fluidos en orificios, lo ratifica la dependencia del caudal en función de la carga hidráulica elevado a la potencia  $\frac{1}{2}$ .

La estructura en forma de “H” con una altura del vertedero de 10cm, presentó altas tasas de filtración, en consecuencia, el filtro piloto demanda un mayor ingreso de agua, motivo por el cual hubo problemas de desabastecimiento del afluente para las demás cámaras de filtración, es decir, cumple deficientemente con los parámetros de diseño, por lo cual no se recomienda su implementación.

Se evidenció que a medida que se incrementa la turbiedad del afluente se reporta menores horas de servicio, es decir, disminuye la carrera de filtración.

Para los ensayos realizados el color del afluente es inferior a 10 unidades de Pt-Co, mientras que el color del efluente fue inferior a 5 unidades de Pt-Co, indican así la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos del sistema de filtración, en consecuencia la calidad del agua filtrada cumple con la normativa NTE INEN 1108: 2014.

Para la implementación del sistema de tasa declinante no es necesario afectar el normal funcionamiento de la planta, ya que se puede aprovechar el lavado de los filtros para realizar el cambio de la válvula reguladora por el neplo de orificio normalizado con 230 mm de diámetro.

Podría existir un descenso del nivel de agua en los filtros en el momento del lavado e inicio de la filtración, para evitar este descenso puede sugerirse que la operación de los ocho filtros principales sea en cadena, es decir, realizar el lavado

solamente de 2 filtros consecutivos, al mismo tiempo 3 filtros estarán con caudal medio mientras que 3 filtros estarán al final de su carrera.

## REFERENCIAS

- Acosta, R. (2008). *Saneamiento ambiental e higiene de los alimentos*, Córdoba, Argentina: Brujas.
- Aguinaga, A., & Crisanto T. (2014), Caracterización y cálculo de la cantidad de barro generados en el tratamiento de aguas arsenicales por el método Arcis-UNR. *Revista politécnica*. 34(1), 101-107 Obtenido de la base de datos Revista Politécnica.
- American Public Health Association. (2010). *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*, New York, Estados Unidos: Publication Office.
- Arboleda, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua*, Bogotá, Colombia: Nomos.
- García, F. (2010). *Evaluación de baterías de filtros de tasa declinante y lavado mutuo de la planta de tratamiento de agua potable Mahuarca*. (Tesis de maestría). Universidad de Cuenca, Cuenca- Ecuador.
- NTE INEN 110, (2014) *Agua Potable. Requisitos*, Ecuador: INEN.
- Ojeda, J. (2013). *Evaluación Del Sistema De Filtración De La Planta De Tratamiento Puengasí e Investigación en la Columna De Filtración Piloto*, (Tesis de maestría), Escuela Politécnica Nacional, Quito – Ecuador.
- Perea, L., Torres, P. & Cruz, C. (2014). Influence of the Flow Control (Declining Rate – Constant Rate) on the Filtration Process in Drinking Water Treatment. *Ingeniería y Universidad*, 18 (2), 217-234. <http://dx.doi.org/10.11144/Javeriana.IYU18-2.ifcd>
- Thompson, P., Brouckaert, B., Rajagopaul, R., Ngcekwa, M. and Mholongo, M. (Mayo, 2004). Design and operation of a constant level, constant rate pilot filtration plant. *WRC Project 1395 Upgrading Of Existing South African Filtration*. Conferencia llevado a cabo en Water Institute of Southern Africa (WISA) Biennial, Cape Town, South Africa.
- Villalba, L. (2004). *Reingeniería de un sistema de filtración de tasa constante a un sistema de tasa declinante* (Tesis de maestría) Escuela Politécnica Nacional, Quito –Ecuador.



**Isaiás Marcelo Muñoz Rodríguez.** Ingeniero Civil, especialización Hidráulica, Escuela Politécnica Nacional, 1973. Catedrático de la EPN desde 1976. Especialización Sanitaria, Universidad de Sao Paulo - Brasil 1979. Maestría en Salud Pública, Universidad de Sao Paulo - Brasil 1981. Profesor, Escuela Politécnica Nacional, julio 2000 Quito Ecuador. Director de muchas tesis en pregrado y postgrado en Ing. Civil y Ambiental. Coordinador del postgrado en Ing. Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional, 2000. Publicaciones en revistas y congresos nacionales e internacionales. Consultoría y desarrollo de soluciones en el área de la Ing. Sanitaria y Ambiental.



**Miriam Rocío Huaraca Huaraca.** Ingeniera ambiental, nacida en Riobamba, en 1987. A su corta edad se trasladó a Quito donde inicia su vida estudiantil. El bachillerato lo cursó en el Liceo Fernández Madrid mismo que le otorgó una beca estudiantil debido a sus logros académicos, a su vez, fue presidenta de la asociación estudiantil del liceo durante el periodo 2004-2005. En 2015 se gradúa de la Escuela Politécnica Nacional como Ingeniera Ambiental mención Cum Laude. Actualmente desempeña las funciones de coordinadora académica de la carrera Agroforestal del Instituto Tecnológico Crecermas en la provincia de Sucumbíos.



**María Belén Aldás.** Nacida en Quito. Ingeniera Química en el 2007 y Magíster en Ingeniería Ambiental en el 2011, en la Escuela Politécnica Nacional. Se ha desempeñado como docente e investigadora desde el año 2009 en instituciones de educación superior, además como Coordinadora Técnica de Laboratorios de Investigación en la Universidad Politécnica Salesiana. En el año 2013 ingresa como docente titular a la EPN. Actualmente, es docente de la Carrera de Ingeniería Ambiental. Ha participado como colaboradora en proyectos de investigación multi-interdisciplinarios y como directora de proyectos semilla financiados por la EPN. Autora y coautora de ponencias en congresos y publicaciones en revistas científicas.