

**ESTUDIO DE LA UTILIZACIÓN DE FILTROS AEROBIOS PARA EL  
TRATAMIENTO TERCIARIO DE LIXIVIADOS.**

**CAMILO HERNAN ROSERO BENAVIDES  
RICHARD MANUEL SALAS LEGARDA**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
SAN JUAN DE PASTO  
2008**

**ESTUDIO DE LA UTILIZACIÓN DE FILTROS AEROBIOS PARA EL  
TRATAMIENTO TERCIARIO DE LIXIVIADOS.**

**CAMILO HERNAN ROSERO BENAVIDES  
RICHARD MANUEL SALAS LEGARDA**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar el título de  
Ingeniera Civil**

**Directores:**

**Msc. I.C. ROBERTO SALAZAR CANO**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
SAN JUAN DE PASTO**

**2008**

**“Las ideas y conclusiones aportadas en este trabajo de grado son responsabilidad exclusiva de sus autores”.**

**Artículo 1º del Acuerdo No 324 de octubre 11 de 1966, emanado del honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

---

**ING. HERNAN GOMEZ ZAMBRANO  
JURADO**

---

**ING. JUAN ANDRES SOLARTE  
JURADO**

**San Juan de Pasto, noviembre de 2008**

## **DEDICATORIA**

A mis padres, mi ejemplo, mi apoyo, mi inspiración, por su colaboración, por demostrarme a cada instante su amor y comprensión y aunque las circunstancias no siempre fueron las mejores por confiar y darme la fortaleza para continuar en la lucha.

A aquellas personas que depositaron su confianza en mí cuando lo necesitaba...

*CAMILO ROSERO.*

A Carmen y mi hija Renata, por ser los principales ejes de la consecución de mis metas, por su amistad y por impulsar en mí con sus palabras y sonrisas el deseo de realizar mis sueños.

**RICHAR SALAS.**

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresa sus agradecimientos a:

ING. ROBERTO SALAZAR CANO por la dirección durante el desarrollo de este proyecto, por su apoyo y aprecio.

ING. LORENA SALAZAR por la dirección durante el desarrollo de este proyecto, por su apoyo y aprecio.

LEIDER PAZ, por su colaboración y su apoyo durante el desarrollo de este proyecto.

Al personal de EMAS SA. Por su colaboración y por su amistad.

A todas las personas que de alguna manera contribuyeron con el cumplimiento de los objetivos del presente trabajo

## CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>22</b>
<b>1. ESTADO DEL ARTE DEL PROBLEMA.....</b>	<b>24</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>27</b>
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	27
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	27
<b>3. MARCO TEÓRICO – CONCEPTUAL Y CONTEXTUAL.....</b>	<b>28</b>
3.1 RESIDUOS SÓLIDOS.....	28
3.2 LIXIVIADO.....	28
3.3 DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO.....	28
3.4 DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO.....	29
3.5 SÓLIDOS TOTALES.....	29
3.6 OXÍGENO DISUELTO.....	29
3.7 PH.....	30
3.8 FILTRACIÓN PROFUNDA.....	30
3.9 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FILTRACIÓN.....	49
3.10 UTILIZACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO EN LA FILTRACIÓN	56
<b>4. METODOLOGÍA.....</b>	<b>63</b>
4.1 LOCALIZACIÓN.....	63
4.2 ETAPAS DEL PROYECTO.....	64
<b>5. ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS.....</b>	<b>128</b>
5.1 PROGRAMACIÓN DE LOS MUESTREOS.....	129
5.2 RESULTADOS.....	130
5.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	138
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>145</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>149</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>150</b>

## LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Presentación general y operación de un filtro profundo rápido de medio granular	32
Figura 2. Esquema de definición para la longitud de carrera de filtro basado en la pérdida cabeza y la turbidez del efluente	34
Figura 3. Remoción de partículas suspendidas dentro de material dentro de un filtro granular	35
Figura 4. Variación de la pérdida de carga en función de (L) Y (t)	39
Figura 5. Pérdida de carga, profundidad del lecho y porosidad versus velocidad de lavado	42
Figura 6. Variación de la calidad del efluente durante la carrera de filtración	56
Figura 7. Representación esquemática del sistema poroso de un carbón y clasificación de los poros según su tamaño	58
Figura 8. Sistema Actual de Tratamiento de Lixiviados	64
Figura 9. Esquema de dirección de flujos en el filtro	66
Figura 10. Características granulométricas de los lechos seleccionados	69
Figura 11. Esquema de dirección de flujos en el filtro durante el retro-lavado	80
Figura 12. Detalle de los niveles del filtro de Antracita y Arena.	88
Figura 13. Detalle de los niveles del filtro Arena.	99
Figura 14. Detalle de los niveles del filtro de Antracita	109



Figura 15. Detalle de los niveles del filtro de Antracita + Carbón activado + Arena	118
Figura 16. Detalle de los niveles del filtro de Antracita + Carbón activado	127

## LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Designación y tamaño de apertura de los tamaños de tamiz de Estados Unidos	33
Tabla 2. Principales mecanismos y fenómenos que contribuyen a la remoción de material dentro de un filtro profundo de medio granular	37
Tabla 3. Datos típicos de diseño para filtros profundos duales y multimediales	66
Tabla 4. Granulometría tipo de la arena utilizada en el filtro	67
Tabla 5. Designación y tamaño de apertura de los tamaños de tamiz.	68
Tabla 6. Diámetro promedio y porcentaje retenido para la arena	72
Tabla 7. Diámetro promedio y porcentaje retenido para la antracita	72
Tabla 8. Constantes experimentales para $\alpha, m, \beta, \theta$	76
Tabla 9. Lecturas de los niveles de colmatación filtro Arena y Antracita	84
Tabla 10. Lecturas de los niveles de colmatación filtro Arena	96
Tabla 11. Lecturas de los niveles de colmatación filtro Antracita	106
Tabla 12. Propiedades típicas de medios filtrantes comunes para filtros de lecho granular	111
Tabla 13. Diámetro promedio y porcentaje retenido para el carbón activado	112

Tabla 14.	Lecturas de los niveles de colmatación filtro Arena + Carbón activado + Antracita	115
Tabla 15.	Lecturas de los niveles de colmatación filtro Antracita + Carbón activado + Antracita	124
Tabla 16.	Tiempo de evaluación del medio filtrante	129
Tabla 17 a.	Resultados de los parámetros analizados filtro Arena + Antracita (primer muestreo)	130
Tabla 17 b.	Porcentajes de remoción filtro Arena + Antracita (primer muestreo)	130
Tabla 18 a.	Resultados de los parámetros analizados filtro Arena + Antracita (segundo muestreo)	130
Tabla 18 b.	Porcentajes de remoción filtro Arena + Antracita (segundo muestreo)	131
Tabla 19 a.	Resultados de los parámetros analizados filtro Antracita (primer muestreo)	132
Tabla 19 b.	Porcentajes de remoción filtro Antracita primer muestreo	132
Tabla 20 a.	Resultados de los parámetros analizados filtro Antracita (segundo muestreo)	132
Tabla 20 b.	Porcentajes de remoción filtro Antracita segundo muestreo	132
Tabla 21 a.	Resultados de los parámetros analizados filtro Arena (primer muestreo)	133
Tabla 21 b.	Porcentajes de remoción filtro Arena primer muestreo	134

Tabla 22 a.	Resultados de los parámetros analizados filtro Arena (segundo muestreo)	134
Tabla 22 b.	Porcentajes de remoción filtro Arena (segundo muestreo)	134
Tabla 23 a.	Resultados de los parámetros analizados filtro Arena + Carbón activado + Antracita (primer muestreo)	135
Tabla 23 b.	Porcentajes de remoción filtro Arena + Carbón activado + Antracita (primer muestreo)	135
Tabla 24 a.	Resultados de los parámetros analizados filtro Arena + Carbón activado + Antracita (segundo muestreo)	135
Tabla 24 b.	Porcentajes de remoción filtro Arena + Carbón activado + Antracita (segundo muestreo)	136
Tabla 25 a.	Resultados de los parámetros analizados filtro Antracita + Carbón activado + Antracita (primer muestreo)	137
Tabla 25 b.	Porcentajes de remoción filtro Antracita + Carbón activado + Antracita (primer muestreo)	137
Tabla 26 a.	Resultados de los parámetros analizados filtro Antracita + Carbón activado + Antracita (segundo muestreo)	137
Tabla 26 b.	Porcentajes de remoción filtro Antracita + Carbón activado + Antracita (segundo muestreo)	138

## LISTA DE GRAFICAS

	Pag.
Gráfica 1. Nivel de colmatación Vs. Tiempo filtro Arena + Antracita tres lecturas por día	85
Gráfica 2. Nivel de colmatación Vs. Tiempo filtro Arena + Antracita Lectura por día	86
Gráfica 3. Nivel de colmatación Vs. Tiempo filtro Arena tres lecturas por día	97
Gráfica 4. Nivel de colmatación Vs. Tiempo filtro Arena Lectura por día	98
Gráfica 5. Nivel de colmatación Vs. Tiempo filtro Antracita tres lecturas por día	107
Gráfica 6. Nivel de colmatación Vs. Tiempo filtro Antracita Lectura por día	108
Gráfica 7. Nivel de colmatación Vs. Tiempo filtro Arena + Carbón activado + Antracita tres lecturas por día	116
Gráfica 8. Nivel de colmatación Vs. Tiempo filtro Arena + Carbón activado + Antracita lectura por día	117
Gráfica 9. Nivel de colmatación Vs. Tiempo filtro Antracita + Carbón activado + Antracita tres lecturas por día	125
Gráfica 10. Nivel de colmatación Vs. Tiempo filtro Antracita + Carbón activado + Antracita lectura por día	126
Gráfica 11. Concentraciones de entrada y salida de DQO	128
Gráfica 12. Concentraciones de entrada y salida de DQO primer muestreo	139
Gráfica 13. Concentraciones de entrada y salida de DQO segundo muestreo	139

Gráfica 14.	Concentraciones de entrada y salida de DBO primer muestreo	140
Gráfica 15.	Concentraciones de entrada y salida de DBO segundo muestreo	141
Gráfica 16.	Concentraciones de entrada y salida de Sólidos Totales primer muestreo	142
Gráfica 17.	Concentraciones de entrada y salida de Sólidos Totales segundo muestreo	142
Gráfica 18.	Concentraciones de entrada y salida de Sólidos Suspendidos primer muestreo	143
Gráfica 19.	Concentraciones de entrada y salida de Sólidos Suspendidos segundo muestreo	144

## LISTA DE ANEXOS

Anexo A.	RESULTADOS DE ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO FILTRO ARENA + ANTRACITA (PRIMER MUESTREO)	153
Anexo B.	RESULTADOS DE ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO FILTRO ARENA + ANTRACITA (SEGUNDO MUESTREO)	154
Anexo C.	RESULTADOS DE ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO FILTRO ANTRACITA (PRIMER MUESTREO)	155
Anexo D.	RESULTADOS DE ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO FILTRO ANTRACITA (SEGUNDO MUESTREO)	156
Anexo E.	RESULTADOS DE ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO FILTRO ARENA (PRIMER MUESTREO)	157
Anexo F.	RESULTADOS DE ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO FILTRO ARENA (SEGUNDO MUESTREO)	158
Anexo G.	RESULTADOS DE ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO FILTRO ARENA + CA + ANTRACITA (PRIMER MUESTREO)	159
Anexo H.	RESULTADOS DE ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO FILTRO ARENA + CA + ANTRACITA (SEGUNDO MUESTREO)	160
Anexo I.	RESULTADOS DE ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO FILTRO ANTRACITA + CA (PRIMER MUESTREO)	161
Anexo J.	RESULTADOS DE ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO FILTRO ANTRACITA + CA (SEGUNDO MUESTREO)	162

## GLOSARIO

**AFLUENTE:** agua u otro líquido que ingrese a un reservorio o a algún proceso de tratamiento.

**ANÁLISIS:** examen del agua, agua residual o lodos, efectuado por un laboratorio.

**ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO:** pruebas de laboratorio que se efectúan a una muestra para determinar sus características físicas y químicas.

**CABEZA DE AGUA:** Es la presión hidrostática que puede ofrecer una columna de agua de una altura determinada.

**CARGA CONTAMINANTE:** producto de la concentración media de la sustancia contaminante por el caudal medio determinado en el mismo sitio; se expresa en kilogramos por día (kg/d).

**CARGA ORGÁNICA:** producto de la concentración media de DBO o DQO por el caudal medio determinado en el mismo sitio; se expresa en kilogramos por día (kg/d).

**CARGA SUPERFICIAL:** caudal o masa de un parámetro por unidad de área y por unidad de tiempo, que se emplea para dimensionar un proceso de tratamiento (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>-día), (kg DBO/ha·día).

**CARRERA DE FILTRACIÓN:** tiempo que transcurre desde el inicio de operación del filtro hasta el momento en que deba ser lavado.

**CAUDAL:** se define como el volumen tomado en un tiempo determinado, se expresa en l/s. El caudal representa la cantidad de agua residuales que ingresa al sistema, es decir el afluente, o en caso de salida el efluente.

$$\text{Caudal} \left( \frac{l}{s} \right) = \frac{\text{Volumen}(l)}{\text{Tiempo}(s)}$$

**CAUDAL DE DISEÑO:** caudal estimado con el cual se diseñan los equipos, dispositivos y estructuras de un sistema determinado.

**CARRERA DE FILTRACIÓN:** es el tiempo de operación del filtro, posterior a un lavado, hasta el momento en que se colmata y requiere ser lavado nuevamente.



**CONCENTRACIÓN MÁSCA:** Se le denomina a la concentración de una sustancia, elemento o compuesto en un líquido, la relación existente entre su peso y el volumen del líquido que lo contiene.

**EFICIENCIA DE REMOCIÓN:** medida de la efectividad de un proceso en la remoción de una sustancia específica.

**EFICIENCIA DE TRATAMIENTO:** relación entre la carga o concentración removida (efluente) y la carga o concentración en el afluente, para un proceso o planta de tratamiento y un parámetro específico; normalmente se expresa en porcentaje.

**EFLUENTE:** agua u otro líquido sin tratar o tratado parcialmente que sale de un recipiente, un proceso o una instalación de tratamiento.

**REACTOR UASB:** Los reactores UASB (del inglés Upflow Anaerobic Sludge Blanket) son un tipo de biorreactor tubular que operan en régimen continuo y en flujo ascendente, es decir, el influente entra por la parte inferior del reactor, atraviesa todo el perfil longitudinal, y sale por la parte superior. Son reactores anaerobios en los que los microorganismos se agrupan formando biogránulos.

**TASA DE FILTRACIÓN:** es el volumen de agua que pasa a través del área transversal del filtro, durante un determinado periodo de tiempo. Generalmente se expresa en  $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{día}$ .

## RESUMEN

EL PRESENTE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN SE DESARROLLÓ EN EL RELLENO SANITARIO ANTANAS DEL MUNICIPIO DE SAN JUAN DE PASTO, EN LA PARTE BAJA DE LA VEREDA DAZA A 12 KM. DE LA CIUDAD POR LA VÍA PANAMERICANA NORTE, Y A 1 KM. DE ÉSTA POR LA TRONCAL HACIA BUESACO; LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO SE ENCUENTRA UBICADA ENTRE LOS 2740 Y 2745 M.S.N.M.

LA METODOLOGÍA DESARROLLADA CONSISTIÓ EN IMPLEMENTAR DENTRO DEL CEPA (CENTRO EXPERIMENTAL PILOTO DE ANTANAS) UN FILTRO AEROBIO A ESCALA PILOTO, AL FINAL DEL SISTEMA DE EVALUACIÓN COMPUESTO POR UNA PISCINA AEROBIA, UNA PISCINA ANAEROBIA Y UN SEDIMENTADOR, CON EL FIN DE EVALUAR LOS PORCENTAJES DE REMOCIÓN DE DIFERENTES COMBINACIONES DE LECHOS FILTRANTES GRANULARES, DE LA CARGA CONTAMINANTE DEL LIXIVIADO, EXPRESADO EN TÉRMINOS DE DQO (DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO), MEDIANTE MECANISMOS FÍSICOS DE REMOCIÓN DE PARTÍCULAS, CON EL FIN DE ENTREGAR UN LIXIVIADO CON MENOR CARGA CONTAMINANTE PARA LOS POSTERIORES SISTEMAS DE TRATAMIENTO.

LOS MATERIALES UTILIZADOS PARA CONFORMAR LOS LECHOS FILTRANTES FUERON: ANTRACITA, ARENA Y CARBÓN ACTIVADO; Y LOS LECHOS FILTRANTES EVALUADOS FUERON: ARENA + ANTRACITA; ARENA + ANTRACITA + CARBÓN ACTIVADO; ANTRACITA + CARBÓN ACTIVADO; ARENA; ANTRACITA. CADA UNO DE LOS LECHOS FILTRANTES SE ARMÓ DENTRO DEL CUERPO DEL FILTRO DURANTE QUINCE DÍAS, PERIODO EN EL QUE SE EVALUÓ LA REMOCIÓN DE CARGA CONTAMINANTE DEL LIXIVIADO, MEDIANTE MUESTREOS REALIZADOS UNA VEZ POR SEMANA, TANTO DEL AFLUENTE, COMO DEL EFLUENTE, ANALIZANDO PARÁMETROS TALES COMO DQO, DBO Y SÓLIDOS TOTALES, SUSPENDIDOS Y DISUELTOS. LOS RESULTADOS PRESENTADOS EN ESTA INVESTIGACIÓN MUESTRAN LOS PORCENTAJES DE REMOCIÓN OBTENIDOS EN LA CARGA CONTAMINANTE DEL EFLUENTE, FRENTE A LA DEL AFLUENTE. DE IGUAL MANERA, SE DETERMINÓ LOS TIEMPOS DE CARRERA DE FILTRACIÓN, OBTENIDOS MEDIANTE INSPECCIÓN VISUAL DIARIA DE LOS NIVELES DEL AFLUENTE DENTRO DEL FILTRO, HASTA EL PUNTO DE COLMATACIÓN.

LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN ESTA INVESTIGACIÓN REVELAN QUE EN CUANTO A LA EFICIENCIA EN LA REDUCCIÓN DE DQO Y DBO, SE PRESENTARON MEJORES DESEMPEÑOS EN LOS FILTROS CUYOS LECHOS INVOLUCRAN EL USO DE CARBÓN ACTIVADO, DADO QUE LAS REDUCCIONES OSCILAN ENTRE 65 Y 74% DEL DQO, Y 50 Y 89% PARA EL

DBO. EN CUANTO A LOS COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN, LAS ALTERNATIVAS MÁS VIABLES SON LOS FILTROS QUE CONTIENEN ARENA Y ANTRACITA, BIEN SEA TRABAJANDO INDIVIDUALMENTE O UNIDOS EN UN FILTRO, OFRECEN UNA EFICIENCIA ACEPTABLE, SIENDO: ANTRACITA + ARENA HASTA UN 45%; ANTRACITA HASTA UN 32% Y ARENA HASTA UN 47%; ADEMÁS, , LOS LECHOS DE ANTRACITA Y ARENA SE PUEDEN SOMETER A UN SENCILLO PROCESO DE RETRO-LAVADO, PARA POSTERIORMENTE INICIAR NUEVAS CARRERAS DE FILTRACIÓN; EN CAMBIO, EL USO DE CARBÓN ACTIVADO IMPLICA QUE EN EL MOMENTO EN QUE SE DEBA REALIZAR LA LIMPIEZA DEL FILTRO, EL CARBÓN ACTIVADO DEBE SOMETERSE A UN COMPLEJO PROCESO DE REACTIVACIÓN, O EN SU DEFECTO, CAMBIARSE POR UN NUEVO MATERIAL.

## **ABSTRACT**

THE CURRENT INVESTIGATIVE WORK WAS CARRIED OUT AT THE ANTANAS SANITARY REFILL IN THE CITY OF SAN JUAN DE PASTO, BY THE LOW SIDE OF THE TOWN OF DAZA, TWELVE KILOMETERS FROM THE CITY, TAKING THE NORTH PANAMERICAN HIGHWAY, THEN ONE KILOMETER BY ROAD TOWARDS BUESACO. THE LEACHED TREATMENT PLANT IS LOCATED BETWEEN 2740 AND 2745 METERS ABOVE SEA LEVEL.

THE METHODOLOGY DEVELOPED CONSISTED OF IMPLEMENTING WITHIN THE ANTANA'S PILOT EXPERIMENTAL CENTER AN AEROBIC FILTER ON A PILOT SCALE, AT THE END OF THE EVALUATION SYSTEM, WHICH COMPOSED OF AN AEROBIAN WASTEWATER POOL AND A SEDIMENTER, IN ORDER TO EVALUATE THE REMOVAL PERCENTS OF SEVERAL COMBINATIONS OF GRANULAR FILTER BEDS, OF THE LEACHED CONTAMINANT LOAD, EXPRESSED IN COD (CHEMICAL OXYGEN DEMAND), THROUGH PHYSICAL PARTICLE REMOVAL MECHANISMS, IN ORDER TO DELIVER A LESS CONTAMINANT LEACHED LOAD TO SUBSEQUENT TREATMENT SYSTEMS.

THE MATERIALS USED TO MAKE THE FILTERING BEDS WERE: ANTHRACITE, SAND AND ACTIVATED CARBON; AND THE EVALUATED FILTERING BEDS WERE: SAND + ANTHRACITE; SAND + ANTHRACITE + ACTIVATED CARBON; ANTHRACITE + ACTIVATED CARBON; SAND; ANTHRACITE. EACH ONE OF THE FILTERING BEDS WERE PUT TOGETHER INSIDE THE FILTER BODY DURING A PERIOD OF FIFTEEN DAYS, IN WHICH THE LEACH CONTAMINANT LOAD WAS EVALUATED THROUGH SAMPLES TAKEN ONCE A WEEK FROM BOTH AFFLUENT AND EFFLUENT, ANALYZING PARAMETERS SUCH AS COD, BOD AND TOTAL SOLIDS, SUSPENDED AND DISSOLVED. THE PRESENTED RESULTS IN THIS INVESTIGATION SHOW THE REMOVAL PERCENTS IN THE EFFLUENT CONTAMINANT LOAD, AGAINST THE AFFLUENT. LIKEWISE, THE FILTRATION TIMES WERE DETERMINED AND OBTAINED THROUGH VISUAL INSPECTION OF THE AFFLUENT LEVELS INSIDE THE FILTER UNTIL THE POINT OF SILTING.

THE RESULTS FROM THIS INVESTIGATION REVEAL THAT AS FOR THE EFFICIENCY IN THE REDUCTION OF COD AND BOD, THE BEST PERFORMANCES WERE PRESENT IN THE FILTER BEDS WHICH INVOLVED THE USE OF ACTIVATED CARBON, GIVEN THAT THE REDUCTIONS WERE RANGING BETWEEN 65 AND 74 % IN THE COD, AND 50 AND 89% IN THE BOD. AS FOR THE BUILDING COSTS, THE BETTER ALTERNATIVES ARE THE FILTERS THAT CONTAIN SAND AND ANTHRACITE, WORKING INDIVIDUALLY OR PUT TOGETHER INSIDE A FILTER, THEY OFFER AN ACCEPTABLE

EFFICIENCY, BEING: ANTHRACITE + SAND TO 45%; ANTHRACITE UNTIL 32% AND SAND UNTIL 47%; BESIDES, THE SAND AND ANTHRACITE BEDS CAN BE CLEANED BY A SIMPLE BACKWASH PROCESS, TO BEGIN NEW FILTRATION TIMES. ON THE OTHER HAND, THE USE OF ACTIVATED CARBON INVOLVES THE FACT THAT WHEN THE CLEANING TIME COMES, THE CARBON MUST BE SUBMITTED TO A COMPLEX REACTIVATION PROCESS, IF NOT, IT HAS TO BE CHANGED FOR NEW MATERIAL.

## INTRODUCCION

Según La DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN AGROINDUSTRIAL MANAGEMENT & CONSULTING S.A. (2006), En Colombia el uso de rellenos sanitarios ha sido impulsado en la últimas décadas como la mejor y más viable alternativa tanto para pequeños, como para medianos y grandes municipios. En municipios menores, se desarrollan programas de botaderos a cielo abierto, mientras que en municipios mayores se utilizan sistemas mecanizados.

La experiencia Colombiana en cuanto a la utilización de rellenos sanitarios como alternativa de disposición de residuos puede considerarse exitosa, sin embargo los resultados obtenidos respecto al tratamiento de lixiviados no ha sido completamente satisfactorios.<sup>1</sup>

Un relleno sanitario está compuesto por celdas, donde se producen reacciones y transformaciones de la materia orgánica e inorgánica presentes en la basura, dando como resultado diferentes compuestos (líquidos y gaseosos). El líquido producido por la percolación es arrastrado por el agua de la lluvia (lixiviados) contaminando el suelo, acuíferos y las aguas subterráneas, mientras que los componentes gaseosos son emitidos a la atmósfera contaminando el aire.

La lixiviación es un proceso a tener en cuenta desde el punto de vista ambiental, dado que si se han producido vertidos contaminantes en superficie, la lixiviación puede provocar la contaminación de los suelos subyacentes o de las aguas subterráneas. Para evitar algunos de estos problemas, al instalar un vertedero de basuras hay que impermeabilizar la base para evitar el lixiviado y posible contaminación del subsuelo.<sup>2</sup>

Los lixiviados recogidos no pueden mantenerse almacenados indefinidamente y por tanto deben tratarse previamente a su vertido, dado que son un factor considerable de contaminación de los cuerpos de agua receptores y el suelo, razón por la cual surge la necesidad de darles un tratamiento adecuado con el fin de producir un efluente apto, y que cumpla con los requerimientos establecidos en la normatividad ambiental vigente, entre los que se destacan los vertimientos a los cuerpos de agua, lo cual se encuentra establecido en los decretos 1594 de 1984, 901 sobre Tasas Retributivas y el 2811 de 1974 Código de los Recursos Naturales.

---

<sup>1</sup> (<http://www.agroindustria-amc.com/files/proyecto>, 2006)

<sup>2</sup> (<http://www.monografias-solidos/residuos-solidos.shtml>, 2006)

Dentro de las plantas piloto que componen el Centro Experimental Piloto de ANTANAS, implementadas desde febrero del 2006, para determinar la mejor alternativa para el tratamiento biológico de lixiviados, se encontraron una serie de deficiencias de la planta de tratamiento actual de lixiviados del Relleno Sanitario Antanas. El resultado de los estudios realizados en el CEPA (Centro Experimental Piloto de Antanas), indica que un 75% de la carga orgánica del lixiviado, expresada en DQO se puede eliminar biológicamente; el 25% restante es materia orgánica difícilmente biodegradable.

Se identificó entonces, la necesidad de realizar tratamientos físicos para eliminar el 25% de la carga orgánica difícilmente biodegradable, con lo cual, el objetivo de este trabajo de investigación es evaluar un sistema de filtros aerobios, a escala piloto, para determinar el mejor medio filtrante, y la mejor estrategia de lavado, como tratamiento terciario de lixiviados, cuyo producto será un lixiviado con menor carga de DQO, el cual se entregaría a un posterior tratamiento dentro de las unidades de coagulación, floculación, sedimentación y filtración, para finalmente pasar a una cámara de desinfección, y luego ser asperjado sobre la parte baja del terreno del Vaso II. (EMAS S.A. ESP), esperando así, tener un efluente final dentro de los parámetros de calidad establecidos en la normatividad ambiental anteriormente mencionada.

## 1 ESTADO DEL ARTE DEL PROBLEMA

A lo largo de la historia, el primer problema de los residuos sólidos ha sido su eliminación; la sociedad solucionó este problema quitando los residuos de la vista, arrojándolos a las afueras de las ciudades, a los cauces de los ríos, al mar, u ocultándolos mediante enterramiento. El crecimiento acelerado de la población en los últimos años, así como el proceso de industrialización, han aumentado la generación de residuos.

Actualmente la alternativa más adecuada en cuanto a la disposición final de los residuos sólidos son los Rellenos Sanitarios, aunque su instauración trae consigo varios impactos, entre los cuales, los lixiviados son identificados como el principal problema ambiental; se llama lixiviado o percolado a los líquidos que se generan en el módulo de un Relleno Sanitario a raíz de la degradación de la materia orgánica (en forma aeróbica y anaeróbica) y como producto de la infiltración del agua de lluvia, que al atravesar la masa de desechos, disuelve, extrae y transporta los distintos componentes sólidos, líquidos o gaseosos presentes en los residuos dispuestos. Dada su alta carga contaminante, al entrar en contacto con fuentes superficiales de agua, contribuyen en alto grado al deterioro de la calidad de ésta, además los lixiviados pueden migrar en forma vertical por entre las capas de los residuos y el suelo y afectar igualmente la calidad de los acuíferos que encuentre a su paso; los lixiviados también son asociados con problemas de producción de olores, cuando a causa de un inadecuado sistema de drenaje se producen brotes de estos a la superficie y su posterior encharcamiento.

Está claro que la solución más adecuada ambientalmente es el tratamiento de los lixiviados antes de su disposición final. Estos métodos son en realidad muy parecidos o casi los mismos que los aplicados a la depuración de las aguas residuales, con la salvedad de que los lixiviados tienen unas características adicionales que pueden alterar el tratamiento, principalmente la altísima carga orgánica que contienen. En algunos Rellenos Sanitarios los lixiviados son extraídos desde las celdas y después de ser tratados, son rigurosamente controlados con el fin de lograr una calidad compatible con la legislación vigente.

Existen varios métodos para el tratamiento de estos líquidos, la elección del método dependerá de lo que sea más viable y adecuado dependiendo tanto de aspectos económicos como técnicos.

En Latinoamérica se han efectuado estudios en laboratorios para determinar las bondades de la recirculación de lixiviados en rellenos sanitarios a escala (México y Chile). Actualmente se desarrollan evaluaciones de la recirculación de lixiviados en rellenos sanitarios a escala laboratorio, para determinar el grado de afectación



de la recirculación sobre fenómenos como el asentamiento, la generación de gases, y el mejoramiento de la calidad del mismo.

En Colombia en el campo del tratamiento y depuración de los lixiviados para su vertimiento, entre los años 1991 y 1995, la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia, realizó en diferentes etapas una investigación dirigida a estudiar la tratabilidad de los Lixiviados producidos en Rellenos Sanitarios a escala de laboratorio. La primera de estas etapas consistió en someter el lixiviado procedente del Relleno Sanitario Curva de Rodas (Medellín – Colombia) a procesos fisicoquímicos de tratamiento; la segunda consistió en un tratamiento biológico anaerobio tipo UASB y en la tercera etapa se evaluaron las remociones de carga orgánica para diferentes arreglos de los tratamientos físico-químicos y biológicos de las anteriores etapas, en estos estudios se obtuvieron eficiencias de remoción en carga hasta del 98%.<sup>1</sup>

Entre enero y mayo del año 1999 la Universidad de Antioquia analizó la viabilidad técnica de tratar los lixiviados del Relleno Sanitario Curva de Rodas, mediante la implementación a escala piloto de un reactor UASB; vale la pena mencionar que aunque anteriormente se había experimentado con este sistema y su aplicabilidad al tratamiento de lixiviados, por primera vez se efectuó esta experimentación a nivel piloto operándolo a las condiciones del Relleno Sanitario y el lixiviado producido allí.<sup>2</sup>

En el municipio de Pasto (Nariño), se encuentra ubicado el Relleno Sanitario “Antanas”, en donde se están haciendo esfuerzos con el objetivo de proporcionar un manejo apropiado a los lixiviados, desde su captación, transporte, tratamiento, hasta su entrega al cuerpo receptor; en el relleno se cuenta con una planta de tratamiento en la que el lixiviado es sometido a un sistema que consta de dos lagunas una aerobia y otra anaerobia, luego el lixiviado pasa a las unidades de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y finalmente este es llevado a una cámara de desinfección para luego ser asperjado sobre la parte baja del terreno del Vaso II.<sup>3</sup>

Actualmente en éste relleno se estudian alternativas viables para mejorar el tratamiento de los lixiviados, de modo que se asegure una mayor eficiencia del mismo.

---

<sup>1</sup> Rubén Alberto Agudelo García, Universidad de Antioquia

<sup>2</sup> Francisco García, Universidad de Antioquia

<sup>3</sup> EMAS S.A. ESP

Es importante decir que el Relleno Sanitario “Antanas” en el manejo de lixiviados está a la vanguardia en el país, en una materia que sigue siendo el principal problema ambiental, para las diferentes entidades encargadas de la disposición final de residuos sólidos.

Los métodos biológicos son los procesos más empleados para el tratamiento de lixiviados, en experiencias realizadas en el Relleno Sanitario Urbano ANTANAS; se ha logrado eliminar hasta un 75% de la materia orgánica. No obstante, es necesario estudiar alternativas de tratamientos terciarios que contribuyan a fortalecer el tratamiento en general de los lixiviados.

### **PROYECTO CEPA (Centro Experimental Piloto de Antanas)**

A partir de febrero del 2006, un grupo de investigadores en conjunto con la Universidad de Nariño y la Empresa Metropolitana de Aseo de Pasto propusieron un proyecto para determinar la mejor alternativa para el tratamiento de lixiviados, debido a que un 75% de la carga orgánica del lixiviado, expresada en DQO está siendo eliminada biológicamente; el 25% restante es materia orgánica difícilmente biodegradable. Es así como surge el CEPA (Centro Experimental Piloto de Antanas), conformado por una serie de plantas piloto, compuestas por cuatro sistemas de tratamiento biológico, las cuales son:

#### **Alternativa 1**

Piscina Aerobia + Piscina Anaerobia + Sedimentador

#### **Alternativa 2**

Piscina Anaerobia + Piscina Aerobia + Sedimentador

#### **Alternativa 3**

Tratamiento Anaerobio Baffleado Sulfhidrogénico + Sedimentador

#### **Alternativa 4**

Tratamiento de Lodos Migrantes + Sedimentador

Una vez diseñadas y puestas en operación estas alternativas, se determinó que era necesario realizar tratamientos físicos para eliminar el 25% de la carga orgánica difícilmente biodegradable, con lo cual, el objetivo de este trabajo de investigación es evaluar un sistema de filtros aerobios, a escala piloto, para determinar el mejor medio filtrante, como tratamiento terciario de lixiviados.

## **2. OBJETIVOS**

### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la eficiencia de la filtración aerobia como tratamiento terciario en la depuración de lixiviados.

### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- ✓ Diseñar y construir filtros aerobios, para acoplar a las plantas pilotos de lixiviados, teniendo en cuenta las características del afluente del lixiviado en el Relleno Sanitario Urbano ANTANAS.
- ✓ Evaluar la eficiencia de la filtración aerobia con diferentes medios de soporte, y combinación de lechos de diferentes materiales.
- ✓ Evaluar la relación de las variables costo/eficiencia de la filtración aerobia para determinar la viabilidad de la implementación a escala real.
- ✓ Determinar e implementar la mejor estrategia de lavado de los filtros.

### **3 MARCO TEÓRICO - CONCEPTUAL**

#### **3.1 RESIDUOS SÓLIDOS**

Se definen así aquellos residuos que se producen por las actividades del hombre o por los animales. En el ambiente domestico los residuos sólidos incluyen el papel, plásticos, restos de comida, cenizas, etc. También se incluyen los residuos líquidos como las pinturas, las medicinas viejas, los aceites usados, etc. En el comercio, los embalajes, los recipientes de madera y de plástico constituyen la mayor parte. Los sedimentos líquidos – sólidos de la industria y de las plantas de aguas residuales entran en la definición. En cambio, los residuos peligrosos que requieren un tratamiento especial no se incluyen en esta definición. La gestión inadecuada de los residuos sólidos tiene efectos negativos directos en la salud. La fermentación incontrolada de la basura es una fuente de alimentos y un hábitat para el crecimiento bacteriano. En el mismo ambiente proliferan insectos, roedores, y algunas especies de pájaros y actuaran como portadores pasivos en la transmisión de algunas enfermedades infecciosas.<sup>1</sup>

#### **3.2 LIXIVIADO**

Este líquido procede principalmente de la degradación de la materia orgánica contenida en los residuos, a lo que se suman otros líquidos presentes en los residuos, envases con líquidos, agua de lluvia, etc. Su aspecto es negro, de olor fuerte y penetrante, fluido y, en zonas de acumulación y/o estancamiento, presenta una capa superficial de varios centímetros de espuma. La composición media de estos líquidos varía considerablemente según áreas geográficas, edad del vertedero y tipo de residuo depositado en el mismo, pero todos coinciden en una alta carga orgánica, DQO y DBO<sub>5</sub>; su principal factor contaminante.<sup>2</sup>

#### **3.3 DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO).**

Se refiere usualmente a la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para degradar la materia orgánica descomponible, en condiciones aeróbicas, y derivar de ella la energía necesaria para su metabolismo y reproducción. Al descomponerse la materia orgánica que puede servir de

---

<sup>1</sup> TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS. Disponible en Internet. <http://www.habitat.aq.upm.es/cs/p3/a014.html> (2006)

<sup>2</sup> LOS RESIDUOS SÓLIDOS. Disponible en Internet <http://www.compudemano.com /userinfo-lixiviado.html> (2006)

alimentos a las bacterias y de cuya oxidación derivan su energía para procesos vitales.<sup>1</sup>

### **3.4 DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO).**

La demanda química de oxígeno es una medida que se usa para determinar el oxígeno equivalente a la cantidad de materia orgánica e inorgánica que es susceptible de oxidación en su totalidad por medio de un agente químico fuerte.<sup>2</sup>

### **3.5 SÓLIDOS TOTALES, SÓLIDOS SUSPENDIDOS Y DISUELTOS**

El contenido de sólidos totales de un agua residual se define como la cantidad de materia que permanece como residuo una vez se ha efectuado una evaporación entre 103° y 105 °<sup>3</sup>

Los sólidos suspendidos totales o el residuo no filtrable de una muestra de agua natural o residual industrial o doméstica, se definen como la porción de sólidos retenidos por un filtro de fibra de vidrio que posteriormente se seca a 103-105°C hasta peso constante.

La determinación de sólidos disueltos totales mide específicamente el total de residuos sólidos filtrables (sales y residuos orgánicos) a través de una membrana con poros de 2.0 µm (o más pequeños).

### **3.6 OXÍGENO DISUELTO.**

En las muestras de aguas contaminadas la medida del oxígeno disuelto (OD) determina si los cambios biológicos se han llevado a cabo en medio aeróbico o anaeróbico. El primer tipo de organismos utilizan el oxígeno para degradar la materia orgánica hasta productos finales como inocuos, mientras que los anóxicos realizan la misma degradación en condiciones reductoras convirtiendo las sales inorgánicas en productos a menudo muy perjudiciales como los  $S^{2-}$  y  $CH_4$ . Como los dos tipos de organismos se encuentran en todo el ambiente, es muy importante desde el punto de vista de conservación de las aguas el mantener los niveles de oxígeno altos y una degradación aeróbica de material poluyente de estas fuentes. El oxígeno disuelto sirve también para mantener la vida de peces y otros organismos acuáticos.<sup>4</sup>

---

<sup>1</sup> ROJAS CH. Olga. Caracterización de aguas residuales domésticas. Colombia: Cali, 1980. p. 26

<sup>2</sup> Ibid., p. 27

<sup>3</sup> Ibid., p. 29

<sup>4</sup> Ibid., p. 30

### 3.7 PH.

Estas dos letras, que significan "potencial de Hidrogeniones", son el símbolo convencional utilizado como medida del grado de acidez o alcalinidad de un agua. Esta acidez o alcalinidad, se determina por medio de una escala universal graduada de 0 a 14 (siendo 7 el punto correspondiente a la neutralidad). En realidad, la vida acuática en agua dulce sólo es posible entre la acidez relativa y la alcalinidad relativa 7. En la acuariofilia práctica no se llega a estos valores. Aparte de ciertas reproducciones excepcionales, los valores que interesan, oscilan entre 6.4 y 7.6.

PH menor a 7, el agua es ácida; pH igual a 7, el agua es neutra; pH superior a 7, el agua es alcalina. Existen tiras reactivas en el mercado que permiten medir el valor del pH; también se puede medir en forma precisa con un potenciómetro o pH-metro.<sup>1</sup>

### 3.8 FILTRACIÓN PROFUNDA

La filtración profunda involucra la remoción de partículas de material suspendido, pasando el líquido a través de un lecho filtrante compuesto de un medio filtrable granular o comprimido. Aunque la filtración profunda es una de las principales operaciones unitarias utilizadas en el tratamiento de agua potable, la filtración de efluentes de aguas negras como proceso de tratamiento se está volviendo más común. La filtración profunda es usada ahora para lograr remociones suplementales de sólidos suspendidos (incluyendo partículas de DQO) de los efluentes de aguas negras de procesos de tratamiento biológicos y químicos para reducir la masa de descarga de sólidos y, quizás lo más importante, como una etapa condicionante que permitirá la desinfección eficaz del efluente filtrado. La filtración profunda es también usada como una etapa de pretratamiento para la filtración por membrana. La filtración simple y de dos etapas es también usada para remover fósforo químicamente precipitado.

Históricamente, el primer proceso de filtración profunda desarrollado para el tratamiento de aguas negras fue el filtro lento de arena (tasas típicas de filtración de 30 a 60 litros por metro cuadrado al día.<sup>2</sup> El filtro rápido de arena (tasas típicas de filtración de 80 a 200 litros por metro cuadrado por minuto). A continuación se presenta una descripción general al proceso de filtración profunda y un análisis del proceso de filtración. Los tipos de filtros existentes y las variables asociadas con su selección y diseño.

---

<sup>1</sup> *Ibíd.*, p. 31

<sup>2</sup> Frankland (1870), y Dunbar (1908)

**3.8.1 Descripción del proceso de filtración:** Antes de discutir las tecnologías de filtración existentes, será útil primero describir las bases de la filtración profunda, incluyendo: (1) las características físicas de un medio granular convencional de filtración profunda; (2) las características de un medio filtrante; (3) el *proceso de filtración* en el cual el material suspendido es removido del líquido; (4) los mecanismos operativos de remoción de partículas que provocan la remoción de material suspendido dentro del filtro; y (5) el *proceso de retro-lavado*, en el cual el material que ha sido retenido dentro del filtro es removido.

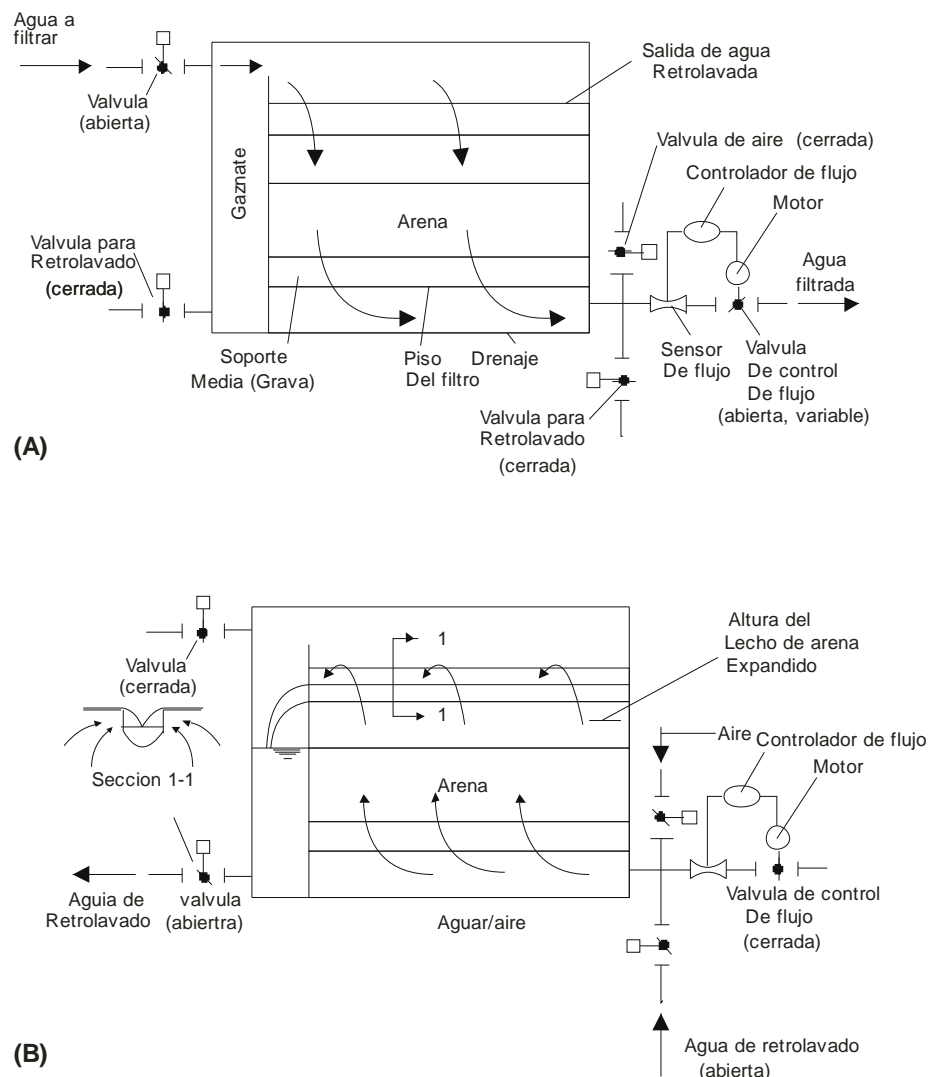
**3.8.1.1 Características físicas de un filtro profundo<sup>1</sup>:** Las características generales de un filtro profundo rápido convencional de medio granular están ilustradas en la figura 1. Como se muestra, el medio filtrante (arena en este caso) es soportado por una capa de grava, la cual se acomoda sobre el sistema inferior de desagüe del filtro. El agua filtrada típicamente es desinfectada antes de ser descargada al ambiente.

---

<sup>1</sup> Tchobanoglous and Schroeder (1985)

**Figura 1.**

Presentación general y operación de un filtro profundo rápido de medio granular (a) Flujo durante el ciclo de filtración, y (b) Flujo durante el ciclo de retrolavado.



Fuente. Tchobanoglous and Schroeder (1985)

**3.8.1.5 Características del medio filtrante<sup>1</sup>:** El tamaño de los granos es la principal característica del medio filtrante que afecta la operación de filtración. El tamaño del grano afecta tanto la pérdida de cabeza del agua limpia como el aumento de pérdidas de cabeza durante la carrera de filtración. Si se selecciona un medio filtrante muy pequeño, mucha de la fuerza actuante será desperdiciada superando la resistencia friccionante del lecho filtrante. Por el otro lado, si el tamaño del medio filtrante es demasiado grande, muchas de las pequeñas

<sup>1</sup> Tchobanoglous and Schroeder (1985)



partículas en el flujo entrante pasará directamente a través del lecho. La distribución del tamaño del material del filtro es usualmente determinado por un análisis de tamices usando una serie decreciente de tamaños de tamices. La designación y la abertura de tamiz para los tamaños de tamices de Estados Unidos se dan en la tabla 1. Los resultados de un ensayo de tamices son usualmente analizados trazando el porcentaje acumulado que pasa a través de un determinado tamaño de abertura de tamiz sobre papel logarítmico.

El tamaño efectivo de un medio filtrante está definido como el tamaño del diez por ciento del total y es designado como  $d_{10}$ . Para la arena, se ha encontrado que el tamaño del diez por ciento en peso corresponde al tamaño del cincuenta por ciento en cantidad.

**Tabla 1.** Designación y tamaño de apertura de los tamaños de tamiz de Estados Unidos<sup>1</sup>

Abertura o número de tamiz	Tamaño de apertura en pulgadas	Tamaño de apertura en milímetros
3/8 plg.	0.375	9.51
¼ plg.	0.250	6.35
4	0.187	4.76
6	0.132	3.36
8	0.0937	2.38
10	0.0787	2.00
12	0.0661	1.68
14	0.0555	1.41
16	0.0469	1.19
18	0.0394	1.00
20	0.0331	0.841
25	0.0280	0.710
30	0.0234	0.595
35	0.0197	0.500
40	0.0165	0.420
45	0.0138	0.350
50	0.0117	0.297
60	0.0098	0.250
70	0.0083	0.210
80	0.0070	0.177
100	0.0059	0.149

<sup>1</sup> Tchobanoglous and Schroeder (1985)

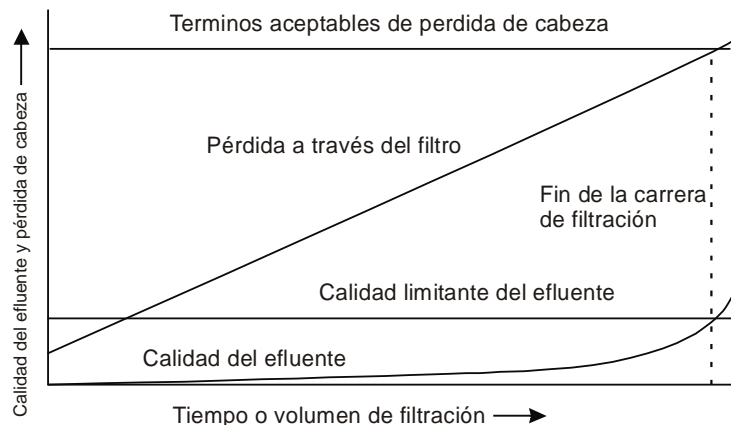
El coeficiente de uniformidad (CU) está definido como el radio del cociente del sesenta por ciento entre el diez por ciento ( $CU = d_{60} / d_{10}$ ). Algunas veces es ventajoso especificar el tamaño de tamiz del noventa y nueve del pasante y el tamaño de tamiz del uno por ciento pasante para definir la curva de gradación para cada medio filtrante con mayor precisión.

D60 es la abertura de los orificios del tamiz por el cual pasa el 60%.  
D10 es la abertura de los orificios del tamiz por el cual pasa el 10%.

**3.8.1.5 El proceso de filtración:** Durante la filtración en un filtro profundo convencional de flujo descendente, las aguas residuales que contienen material suspendido se aplican al tope del lecho filtrante (ver fig. 1a). Mientras el agua pasa a través del lecho filtrante, el material suspendido en el agua residual es removido por una variedad de mecanismos descritos a continuación. Con el pasar del tiempo, como el material se acumula dentro de los intersticios del medio granular, la pérdida de cabeza a través del filtro empieza a aumentar más allá del valor inicial, como se muestra en la figura 2. después de algún periodo de tiempo, la pérdida de cabeza operante, o la turbidez del efluente alcanza una pérdida o un valor de turbidez predeterminada, y el filtro debe ser limpiado. Bajo condiciones ideales, el tiempo requerido para que el aumento de pérdida de cabeza aumente al valor Terminal preseleccionado debería corresponder al tiempo cuando los sólidos suspendidos en el efluente alcancen el valor Terminal preseleccionado para calidad aceptable. En la práctica actual, cualquiera de los dos eventos conlleva a un ciclo de retro-lavado.

Figura 2.

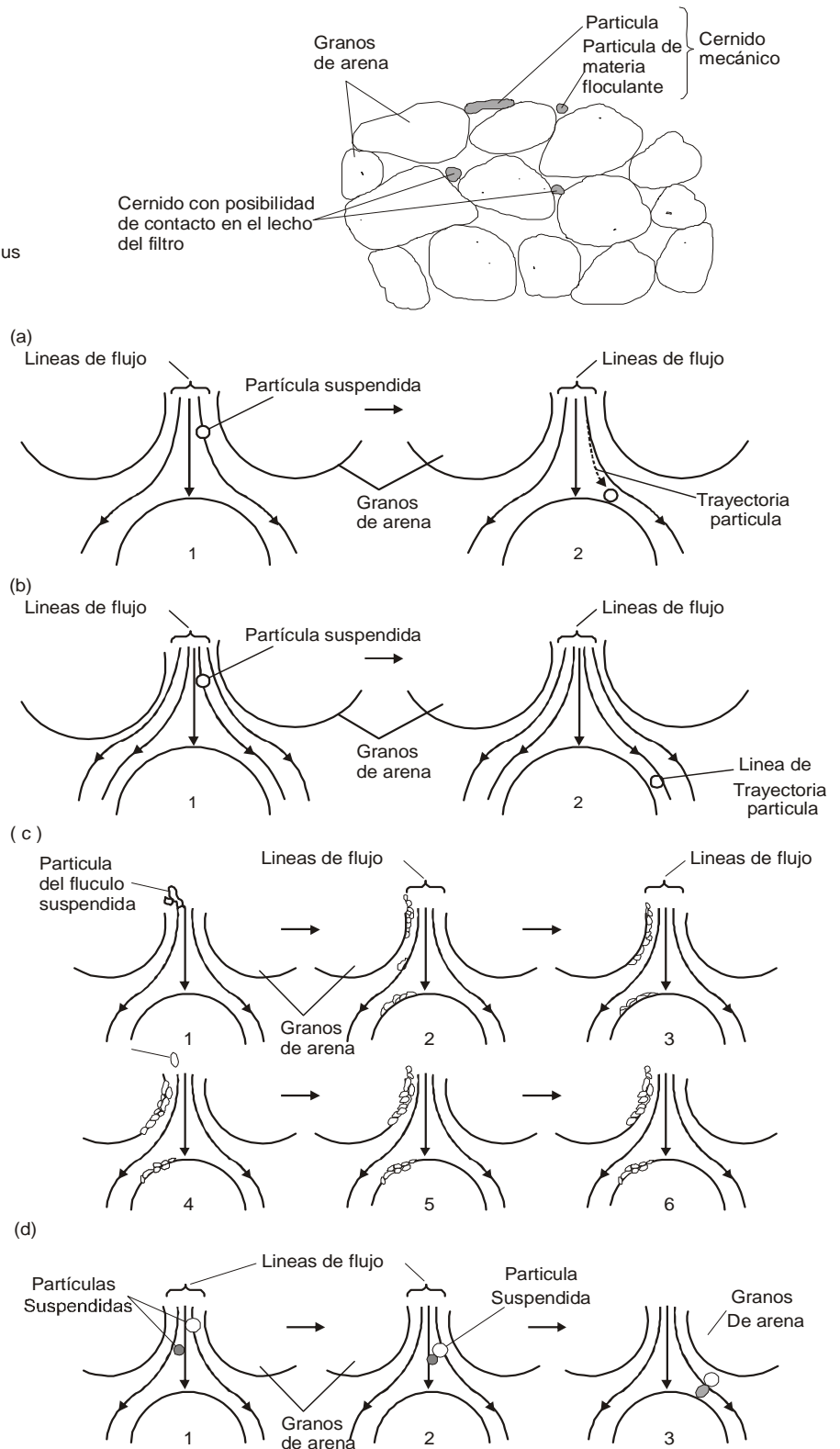
Esquema de definición para la longitud de carrera de filtro basado en la pérdida de cabeza y la turbidez del efluente.



Fuente. Tchobanoglous and Schroeder (1985)

### Figura 3.

Remoción de partículas suspendidas de material dentro de un filtro granular,  
 (a) por cernido  
 (b) por sedimentación e impacto inercial  
 (c) por intersección  
 (d) por adhesión  
 (e) por floculación  
 (Adaptado de Tchobanoglous y Schroeder, 1985.)



Fuente. Tchobanoglous y Schroeder (1995)

**3.8.1.4 Mecanismos de remoción de partículas:** Los principales mecanismos de remoción de partículas, que se cree contribuyen a la remoción de material dentro de un filtro de medio granular, están identificados y descritos en la tabla 2. Los principales mecanismos de remoción (los primeros seis listados en la tabla 2.) están ilustrados pictóricamente en la fig. 3. El Cernido ha sido identificado como el principal mecanismo que opera en la remoción de partículas suspendidas durante la filtración de efluente secundario establecido desde procesos de tratamiento biológico<sup>1</sup>. Otros mecanismos incluyendo el impacto, la intercepción y la adhesión también son operativos aunque sus efectos son pequeños y, por la mayor parte inducidos por la acción del cernido.

La remoción de partículas más pequeñas encontradas en las aguas residuales (ver fig. 3.) debe ser complementada en dos etapas, involucrando (1) el transporte de la partículas hacia o cerca de la superficie donde serán removidas; y (2) la remoción de las partículas por uno o más de los mecanismos operativos de remoción. Este proceso de dos etapas ha sido identificado como *transporte y atadura*<sup>2</sup>

Es importante destacar que la adherencia entre las partículas transportadas y los granos está gobernada principalmente por las características de sus respectivas superficies. Las partículas pueden adherirse directamente a la superficie de los granos o a partículas previamente retenidas por ellos. La importancia de las características de las superficies se evidencia cuando se considera la filtración de una suspensión de arcilla en un lecho de arena bajo dos condiciones diferentes: la primera sin empleo de coagulante, caso en el cual la eficiencia de remoción es inferior al 20%; la segunda, la misma suspensión coagulada con una sal de hierro o aluminio, presenta una eficiencia de remoción superior al 95%. En el primer caso, se tiene una cantidad de partículas estables, en cambio en el segundo, la mayor parte de las partículas están desestabilizadas<sup>3</sup>

**3.8.1.5 Proceso de retro-lavado:** El final de la carrera de filtración (o fase de filtración) se ha alcanzado cuando los sólidos suspendidos en el efluente empiezan a incrementarse (sobrepasen) más allá de un nivel aceptable, o cuando una pérdida de cabeza limitante ocurra por el lecho filtrante (ver fig. 2). Una vez cualquiera de estas condiciones ha sido alcanzada, la fase de filtración es finalizada, y el filtro debe ser limpiado (retro-lavado) para remover el material

---

<sup>1</sup> (Tchobanoglous & Eliassen, 1970)

<sup>2</sup> (O'Melia & Strumm, 1967)

<sup>3</sup> DI BERNARDO, Luiz. Teoría de Filtración: Manual de Instrucción. Programa Regional OPS, EHP, CEPIS de Mejoramiento de Calidad de Agua para Consumo Humano, Versión Preliminar, 1981. 83 p

(sólidos suspendidos) que se ha acumulado dentro del lecho filtrante granular. El retro-lavado consiste en pasar un flujo en dirección contraria a la de la carrera de filtración a través del filtro (ver fig. 1b). Un flujo suficiente de agua de lavado es aplicado hasta que el medio filtrante granular es fluidizado (expandido), causando que las partículas del medio filtrante se choquen unas contra otras.

El material suspendido detenido dentro del filtro es removido por las fuerzas de rozamiento creadas por el agua de retro-lavado mientras se mueve a través del lecho expandido. El material que ha sido acumulado dentro del lecho es luego arrastrado hacia fuera. El lavado superficial con agua y aire son a menudo usados en conjunción con el agua de retro-lavado para reforzar la limpieza del lecho filtrante. En la mayoría de los flujos de diagrama de las plantas de tratamiento de aguas residuales, el agua de lavado que contiene los sólidos suspendidos que se han removidos del filtro es retornada a cualquiera de los medios de tratamiento primario o al proceso de tratamiento biológico.

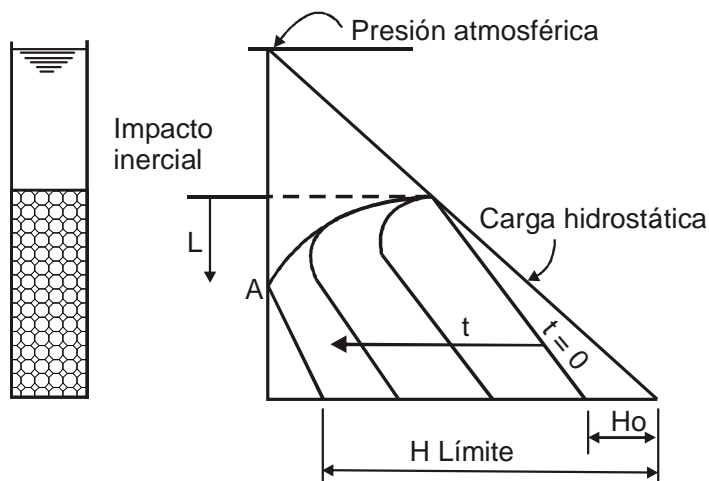
**Tabla 2.** Principales mecanismos y fenómenos que contribuyen a la remoción de material dentro de un filtro profundo de medio granular.<sup>1</sup>

MECANISMO/FENOMENO		DESCRIPCIÓN
1	Cernido a) Mecánico b) Contacto	Las partículas más grandes que los espacios de los poros del medio filtrante son cernidos mecánicamente.  Las partículas más pequeñas que el espacio de los poros son atrapados dentro del filtro por contacto.
2	Sedimentación	Las partículas se establecen en el medio filtrante.
3	Impacto inercial	Las partículas pesadas no seguirán las líneas de flujo.
4	Intercepción	Muchas partículas que se mueven a lo largo de la línea de flujo son removidas cuando entran en contacto con la superficie del medio filtrante.

<sup>1</sup> **ACODAL.** Seminario Internacional sobre Tecnología Simplificada para Potabilización del agua. Memorias. Cali, Colombia, Agosto de 1987. 627 p. (Cleasby)

MECANISMO/FENOMENO		DESCRIPCIÓN
5	Adhesión	Las partículas se encuentran adheridas a la superficie a su paso por el medio filtrante. Debido a la fuerza del agua que fluye, algún material es arrasado antes que esté firmemente unido y es empujado hacia abajo dentro del lecho filtrante. Mientras el lecho se satura, la fuerza superficial de cizallamiento aumenta hasta un punto en el cual ya no se puede remover más cantidad de material. Algo de material puede atravesar el fondo del filtro, causando la repentina aparición de turbidez en el efluente.
6	Floculación	Las partículas se encuentran adheridas a la superficie a su paso por el medio filtrante. Debido a la fuerza del agua que fluye, algún material es arrasado antes que esté firmemente unido y es empujado hacia abajo dentro del lecho filtrante. Mientras el lecho se satura, la fuerza superficial de cizallamiento aumenta hasta un punto en el cual ya no se puede remover más cantidad de material. Algo de material puede atravesar el fondo del filtro, causando la repentina aparición de turbidez en el efluente.
7	Adsorción Química a) Unión b) Intercepción Química	Una vez una partícula ha sido traída al contacto con la superficie del medio filtrante o con otras partículas, cualquiera de estos mecanismos, absorción química o física o ambas, pueden ser las responsables de mantenerla en ese lugar.
8	Adsorción Física a) Fuerzas electrostáticas b) Fuerzas electrocinéticas c) Fuerzas de Van der Waals	
9	Crecimiento biológico	El crecimiento biológico dentro del filtro reducirá el volumen de poros y puede reforzar la remoción de partículas con alguno de los mecanismos de remoción anteriores (1 hasta 5).

**3.8.2 Pérdida de carga en el medio filtrante:** Al pasar un fluido  $Q$  a través de un lecho filtrante granular de profundidad  $L$ , la fricción que el fluido sufre al atravesar los poros produce una pérdida de carga  $h$ , como indica la figura 4.



**Figura 4.** Variación de la pérdida de carga en función de  $(L)$  y  $(t)$

Fuente. Arboleda Jorge (1981)

Al comenzar la operación de un filtro, los granos del lecho están limpios y la pérdida de carga se deberá solamente al tamaño, forma y porosidad del medio filtrante y a la viscosidad y velocidad del agua.

Si el fluido no tuviera partículas en suspensión, esta pérdida de carga inicial será constante a través de toda la carrera de filtración. Pero, como ordinariamente contiene sólidos en suspensión, estos irán recubriendo los granos del lecho, incrementarán su diámetro y disminuirán su porosidad inicial, con lo que la pérdida de carga irá incrementándose por la disminución del área de paso del flujo.

Resulta de aquí que deben considerarse dos clases de pérdida de carga:

- Una pérdida de carga inicial, que es la mínima que puede producir el filtro y que llamaremos  $h_0$ .
- Una pérdida de carga por colmatación, que será función del tiempo  $h\phi(t)$ . Esto es:

$$h_f = h_0 + h\phi(t)^1 \quad [4.1]$$

<sup>1</sup> Arboleda, J. *Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua*. Lima, EPIS/OPS, 1981. Serie Técnica 13.

**3.8.2.1 Pérdida de carga inicial:** La pérdida de carga inicial puede calcularse a partir de la ecuación de Kozeni, que solo es aplicable para esferas con flujo laminar, el cual solo se presenta cuando el número de Reynolds es menor que 10.

$$h_o = f * \frac{v}{g} * V * L * \frac{(1-p_0)^2}{p_0^3} * \left(\frac{A}{V}\right)^2 \quad [4.2]$$

Donde:

$f$  = constante experimental y adimensional, igual a 5

$v$  = viscosidad cinemática (cm/seg<sup>2</sup>)

$g$  = aceleración de la gravedad (cm/seg<sup>2</sup>)

$L$  = profundidad del lecho (cm)

$P_0$  = porosidad inicial

$V$  = velocidad de filtración (cm/seg)

$A/V$  = relación área de la partícula /volumen de la partícula (cm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>)

Siendo  $\frac{A}{V} = \frac{6}{D}$ , para partículas esféricas, donde  $D$  es el diámetro de la partícula, se tiene la ecuación de Kozeni:

$$h_o = f * \frac{v}{g} * V * L * \frac{(1-p_0)^2}{p_0^3} * \left(\frac{6}{D}\right)^2 \quad [4.3]$$

En la práctica, sin embargo, los granos ni son esféricos ni tienen tamaño uniforme ni el flujo es laminar sino trancisional. Por lo tanto, la ecuación 4.2 debe ajustarse para los siguientes casos:

Cuando los granos no son esféricos, pero son de diámetro uniforme. En este caso hay que introducir un coeficiente de esfericidad ( $C_e$ ). El coeficiente de esfericidad de una partícula se define como el resultado de la división del área superficial de la esfera de igual volumen a la del grano por el área superficial de la partícula considerada. Como es obvio, este valor resulta igual a la unidad para las partículas esféricas y menor de uno para las irregulares.

$\frac{A}{V} = \frac{6}{C_e * D}$ , que, reemplazado en 4.2, resulta:

$$h_o = f * \frac{v}{g} * V * L * \frac{(1-p_0)^2}{p_0^3} * \left(\frac{6}{C_e D}\right)^2 \quad [4.4]$$

Cuando los granos no son esféricos ni de diámetro uniforme ni están estratificados en el lecho. Este es el caso de los filtros lentos. Hay que considerar la dispersión de las partículas así:



$$\frac{A}{V} = \frac{6}{C_e} \sum_{i=1}^i \frac{X_i}{d_i} \quad [4.5]$$

Donde:

$X_i$  = Fracción en peso de material retenido entre dos tamices consecutivos, en un ensayo granulométrico.

$d_i$  = Diámetro promedio geométrico entre dos tamices.

Reemplazando 4.5 en 4.2, se tiene:

$$h_o = f * \frac{v}{g} * L * \frac{(1-p_0)^2}{p_0^3} * V \left( \frac{6}{D} \sum_{i=1}^i \frac{X_i}{d_i} \right)^2 \quad [4.6]$$

Cuando los granos no son esféricos ni de diámetro uniforme, pero están estratificados en el lecho.

En este caso, la pérdida de carga total será igual a la suma de las pérdidas de carga en cada capa, si se entiende por capa el conjunto de partículas comprendidas entre dos tamices consecutivos.

$$h_o = \sum_{i=1}^i h_i \quad [4.7]$$

Todo lecho filtrante se estratifica naturalmente cuando se lava con flujo ascendente, capaz de expandir los granos y hacer que estos, al suspender el lavado, se coloquen de menor a mayor, según sus densidades y sus diámetros. Las partículas más grandes y pesadas irán al fondo. Por eso, en los filtros rápidos, el lecho está estratificado, mientras que en los lentos no. La porosidad en uno y en otro caso es diferente; es mayor en los rápidos que en los lentos, en los cuales, por no haber estratificación, los granos pequeños se meten en los grandes y disminuyen el área de paso o la porosidad.

Si se supone que la porosidad no varía en las diferentes capas, en cada una se cumple que  $L_i = X_i L$ , donde  $L_i$  es el espesor de una capa.

Reemplazando estos conceptos en 4.2, se tiene:

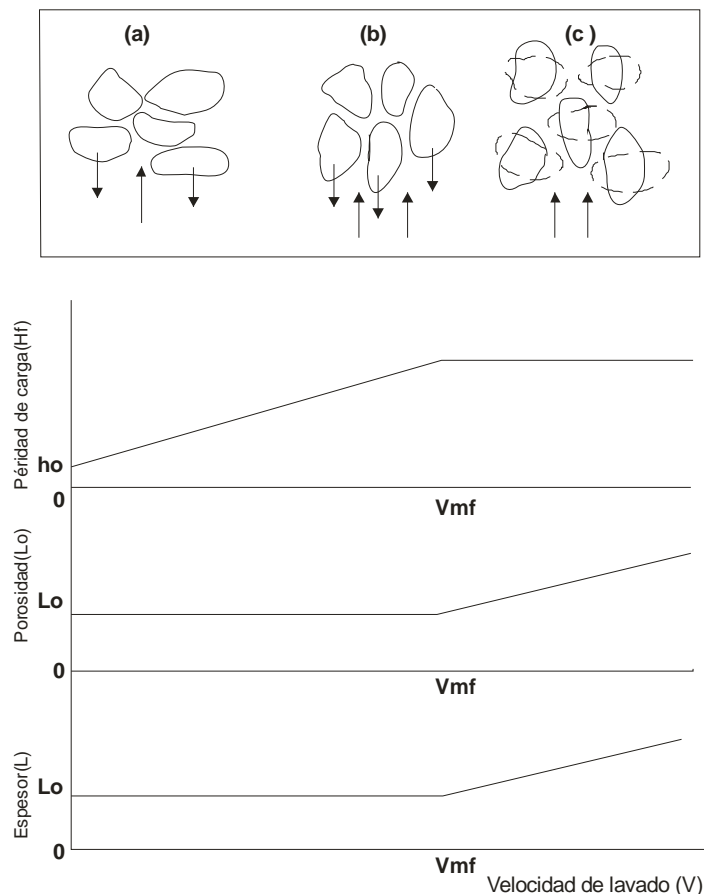
$$h_o = f * \frac{v}{g} * V * \frac{(1-p_0)^2}{p_0^3} * \frac{36}{C_e^2} * L_0 \left( \sum_{i=1}^i \frac{X_i}{d_i^2} \right) \quad [4.8]$$

**3.8.2.2 Fluidificación de medios porosos:** Cuando se introduce un flujo ascendente en un medio granular, la fricción inducida por el líquido al pasar entre las partículas produce una fuerza que se dirige en sentido contrario a la del peso propio de los granos y que tiende a reorientarlos en la posición que presente la menor resistencia al paso del flujo.

Por lo tanto, cuando la velocidad de lavado es baja, el lecho no se expande y su porosidad no se modifica mayormente. Pero, a medida que se va incrementando dicha velocidad, las fuerzas debidas a la fricción van aumentando hasta llegar a superar el peso propio de las partículas, momento en el cual estas dejan de hacer contacto, se separan y quedan suspendidas libremente en el líquido.

Si se aumenta aún más la velocidad de lavado, la altura del medio filtrante se incrementará proporcionalmente a la velocidad del fluido, como se muestra en la figura 5, y la porosidad crecerá en igual forma para dejar pasar el nuevo caudal, pero conservando la velocidad intersticial y la resistencia al paso del agua aproximadamente iguales.

Por lo tanto, solo cuando el lecho no está expandido la pérdida de carga es una función lineal de la velocidad del flujo ascendente, pero en cuanto este se fluidifica, la pérdida de carga alcanza su valor terminal máximo.



**Figura 5.** Pérdida de carga, profundidad del lecho y porosidad *versus* velocidad de lavado

La fluidificación es descrita por Cleasby y Fan<sup>1</sup> como el flujo ascendente de un fluido (gas o líquido) a través de un lecho granular, a una velocidad suficiente para suspender los granos en el fluido, mientras que la velocidad mínima de fluidificación ( $V_{mf}$ ) es la velocidad superficial del fluido requerida para el inicio de la fluidificación.

Según Vaid y Gupta<sup>2</sup>, la fluidificación de una capa de partículas con un tamaño uniforme y de una misma densidad comienza a una velocidad definida ( $V_{mf}$ ). Cuando se tienen valores bajos de  $V_{mf}$ , todas las partículas están en estado fijo, mientras que para velocidades por encima de  $V_{mf}$ , todas las partículas están en estado fluidificado. Un aspecto importante notado en este estudio es la composición de la capa; es decir, las proporciones de los diversos tamaños de granos de la misma densidad. La composición del lecho influye decisivamente en el valor de la velocidad mínima de fluidificación, por lo que no se puede evaluar el  $V_{mf}$  solo por el tamaño de los granos aislados.

**3.8.2.4 Expansión de medios porosos:** Para un lavado únicamente con agua en sentido ascensional, la velocidad varía en promedio entre 0,9 y 1,3 m/min. La expansión total de un medio filtrante se determina teniendo como dato la curva granulométrica y calculando la porosidad de las diferentes subcapas expandidas para determinada velocidad de lavado, conforme al modelo propuesto por Dharmarajah y Cleasby<sup>3</sup>

**3.8.3 Velocidad de fluidificación total:** Según el tipo de medio filtrante empleado, éste necesita para su lavado una determinada expansión que debe ser mantenida durante cierto espacio de tiempo, de manera que el material retenido durante el proceso de filtración sea arrastrado por el agua en su camino ascendente y, de esta manera, lograr la limpieza adecuada de los granos para el comienzo de una nueva carrera de filtración. La velocidad del lavado necesaria para producir dicha expansión depende fundamentalmente de la granulometría, densidad y forma de los granos del medio filtrante y la temperatura del agua. Existen varias formulas de calculo que relacionan entre si las anteriores variables, pero los experimentos realizados en filtros pilotos y los resultados obtenidos en plantas de funcionamiento, indican que los valores resultantes de la aplicación de los métodos tradicionales de calculo difieren de aquellos. Si se quiere tener certeza del grado de expansión del lecho y la velocidad ascensional más adecuada, deben realizarse estudios en filtros pilotos, para cada situación en particular; de lo contrario es necesario adoptar parámetros de tipo general; al respecto Richter<sup>4</sup> recomienda que para los filtros de lecho mixto de arena y antracita basta una velocidad ascensional del agua de lavado de 0.5 a 0.6 m/min suficiente para una expansión del 10% al 30%. Según Arboleda (1), en la mayor parte de las plantas de tratamiento del

---

<sup>1</sup> Cleasby, J. L. y Fan, K. S. Predicting fluidization and expansion of filter media. *JEED, Proceedings ASCE*, vol. 197, junio, 1981, pp. 455-471.

<sup>2</sup> Vaid, R. P. y Gupta, P. S. Minimum fluidization velocity in beds of mixed solids. *The Canadian Journal of Engineering*, vol. 6, junio, 1978, pp. 292-296.

<sup>3</sup> Dharmarajah, A. H. y Cleasby, J. L. *Predicting the expansion behaviour of filter media. Journal of the American Water Works Association*, vol. 78(12), diciembre.

<sup>4</sup> RICHTER, Carlos A., SCREMIN, Paulo Roriz. Lavagem dos Filtros. S.p.i. 13 p

Norte y Sur de América el lavado del filtro se efectúa con un caudal suficiente para expandir el lecho fluidificando la mayoría de sus capas, para lo cual se utilizan velocidades ascensionales de 0.6 a 0.9 m/min. Sin embargo, Cleasby<sup>1</sup> dice que desde el punto de vista operativo, la velocidad ascensional debe ser tal que logre fluidificar las capas mas pesadas del fondo. De todas formas, lo que desprende el material que recubre los granos no es el choque de una partícula con otra sino el esfuerzo de cizallamiento.

El autor recomienda que la velocidad de lavado sea lo suficiente para fluidificar todas las capas del lecho, incluyendo la última capa más pesada. La velocidad de fluidificación total que hace cumplir dicha condición se obtiene de la siguiente forma:

El número de Reynolds mínimo de fluidificación,  $Re_{min}$  está dado por la siguiente expresión:

$$Re_{min} = (33.7^2 + 0.0408Ga)^{0.5} - 33.7 \quad [4.9]$$

Donde:

Ga = número de Galileo

$Re_{min}$  = número de Reynolds mínimo de fluidificación

El número de Galileo (Ga) se expresa como:

$$G_a = \frac{g(S_s - 1).d^3}{\nu^2}, \text{ donde:} \quad [4.10]$$

g = gravedad (cm/s<sup>2</sup>)

$S_s$  = densidad de los granos sumergidos (gr/cm<sup>3</sup>)

d = diámetro de los granos (cm)

$\nu$  = viscosidad cinemática (cm/seg<sup>2</sup>)

De otra parte<sup>2</sup> :

$$V = \frac{\nu * Re}{d} \quad [4.11]$$

Donde:

V = velocidad (cm/seg)

$\nu$  = Viscosidad cinemática (cm/seg<sup>2</sup>)

d = Diámetro de los granos (cm)

<sup>1</sup> ACODAL. Seminario Internacional sobre Tecnología Simplificada para Potabilización del agua. Memorias. Cali, Colombia, Agosto de 1987. 627 p.

<sup>2</sup> RICHTER, Carlos A., SCREMIN, Paulo Roriz. Lavagem dos Filtros. S.p.i. 13 p.

Para las condiciones de velocidad mínima de fluidificación:

$V = V_{a_{\min}}$  = velocidad mínima de fluidificación

$Re = Re_{\min}$  = Número de Reynolds mínimo de fluidificación

Por lo tanto:

$$V_{\min} = \frac{v * Re_{\min}}{d} \quad [4.12]$$

Remplazando 4.9 en 4.12:

$$V_{a_{\min}} = \frac{v}{d} \left[ (33.7^2 + 0.0408G_a)^{0.5} - 33.7 \right] \quad [4.13]$$

Como el lecho de un filtro se encuentra gradado por tamaños, los granos más gruesos localizados en el fondo de la correspondiente capa, el valor de  $V_{a_{\min}}$  debe ser lo suficientemente alto para garantizar que todas las capas del lecho se fluidifiquen. Al respecto, Cleasby<sup>1</sup>, recomienda utilizar  $d_{90}$  debido a que es fácilmente hallado en un análisis granulométrico y puede ser usado con aceptable aproximación. Para garantizar adicionalmente el libre movimiento de los granos más grandes, la velocidad mínima  $V_{a_{\min}}$  calculada para  $d_{90}$  debe ser afectada por un factor de seguridad, con lo cual se obtiene la velocidad de fluidificación total:

$$V_a = \frac{1.3 * v}{d_{90}} \left[ (33.7^2 + 0.0408G_a)^{0.5} - 33.7 \right] \quad [4.14]$$

El cálculo del número de Galileo se hace mediante la ecuación:

$$G_a = \frac{g(S_s - 1).d_{90}^3}{v^2} \quad [4.15]$$

Varios métodos han sido propuestos para predecir la expansión que se presenta en el lecho en función de la velocidad de lavado, como son el de Arboleda<sup>2</sup>, el de Fair y Geyer<sup>3</sup>, el de Cleasby y el de Richter<sup>4</sup>. Este último método se presenta a continuación:

---

<sup>1</sup> ACODAL. Seminario Internacional sobre Tecnología Simplificada para Potabilización del agua. Memorias. Cali, Colombia, Agosto de 1987. 627 p.

<sup>2</sup> ARBOLEDA V., Jorge. Teoría, Diseño y Control de los procesos de Clarificación de Agua. Lima, CEPIS, 1975. 558 p. (Serie Técnica, 13)

<sup>3</sup> FAIR, Gordon M., GEYER, John C., OKUN, Daniel A. Purificación de Aguas y Tratamiento y Remoción de Aguas Residuales. México, Limusa, 1971. 764 p. (Volumen 2).

<sup>4</sup> RICHTER, Carlos A., SCREMIN, Paulo Roriz. Lavagem dos Filtros. S.p.i. 13 p.

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

$$V_s = \frac{v^* Re}{d} \quad [4.16]$$

Donde:

$V_s$  = velocidad de sedimentación de los granos del lecho

**3.8.4 Expansión de lechos:** Para el análisis de la expansión en los lechos se tendrá en cuenta las siguientes constantes consideradas en la tabla 3.

$$Re = \alpha^* G_a^m \quad [4.17]$$

Donde:

$\alpha, m$  = constantes que depende del tipo de material  
 $G_a$  = número de Galileo

El número de Galileo está dado por la ecuación 4.15:

La porosidad del lecho filtrante expandido de acuerdo con el modelo de Richardson y Zaki<sup>1</sup> está dado por:

$$Pe = \left( \frac{V_a}{V_s} \right)^{\beta * Re^\theta} \quad [4.18]$$

Donde.

$v_a$  = velocidad de fluidificación  
 $v_s$  = velocidad ascensional del lavado  
 $\beta, \theta$  = constantes que dependen del tipo de material

La expansión relativa  $\xi$  del lecho filtrante es:

$$\xi = \frac{Le - Lo}{Lo} = \frac{Le}{Lo} - 1 \quad [4.19]$$

---

<sup>1</sup> RICHTER, Carlos A., SCREMIN, Paulo Roriz. Lavagem dos Filtros. S.p.i. 13 p.

Donde:

Le = longitud del lecho expandido

Lo = longitud del lecho no expandido

Como el volumen por unidad de área del material filtrante permanece constante, se tiene que:

$$Lo(1 - Po) = Le(1 - Pe)$$

$$\frac{Le}{Lo} = \frac{1 - Po}{1 - Pe} \quad [4.20]$$

Remplazando 4.20 en 4.19 se tiene que:

$$\xi = \frac{Pe - Po}{1 - Pe} \quad [4.21]$$

La expansión  $\xi$  es entonces fácilmente calculada a partir de los elementos de que se dispone a través de la siguiente secuencia de cálculo:

- Se calcula el número Galileo;
- Con el número de Galileo se calcula el número de Reynolds;
- Con el número de Reynolds se calculan  $v_a$ ,  $v_s$  y  $\beta * Re^\theta$ ;
- Con el valor de  $\beta * Re^\theta$  y  $v_s$  se calcula Pe; y
- Con el valor de Pe se calcula la expansión  $\xi$ .

Como el lecho filtrante se encuentra estratificado, el cálculo de la expansión debe ser hecho por capas, tomándose el diámetro medio entre dos tamices consecutivos. La longitud expandida parcial de cada capa es en este caso:

$$\Delta L_c = \xi_c * x * X \quad [4.22]$$

Donde:

$\xi_c$  = expansión de cada capa (según la ecuación 4.21)

x = porcentaje de material de cada capa

X = espesor del lecho de arena o antracita

La expansión total del lecho filtrante es entonces:

$$\xi = \frac{\xi_a * X_a + \xi_A * X_A}{X_a + X_A} \quad [4.23]$$

Donde:

$\xi_a$  = expansión de la arena

$\xi_A$  = expansión de la antracita

$X_a$  = espesor del lecho de arena

$X_A$  = espesor del lecho de antracita

**3.8.5 Pérdida de carga en el lavado:** Considerando una unidad de filtración en operación de lavado, para la condición de equilibrio, cuando el lecho filtrante se encuentra fluidificado, la fuerza de arrastre debe ser igual al peso de las partículas en el agua. Entonces:

$$\text{Fuerza de arrastre} = \rho * g * h_l * A \quad [4.24]$$

Donde:

$g$  = gravedad (cm/seg<sup>2</sup>)

$h_L$  = pérdida de carga en el lavado (cm)

$A$  = área transversal del filtro (cm<sup>2</sup>)

$\rho$  = densidad del agua

$$\text{Peso aparente de los granos} = (\rho_s - \rho) * g * V \quad [4.25]$$

Donde:

$\rho_s$  = densidad de los granos

$V$  = volumen neto de los granos del lecho

$$V = A * L_0 * (1 - P_0) \quad [4.26]$$

Donde:

$L_0$  = longitud del lecho no expandido

$P_0$  = porosidad del lecho no expandido

Reemplazando 4.26 en 4.25 se tiene:

$$\text{Peso aparente de los granos} = (\rho_s - \rho) * g * A * L_0 * (1 - P_0) \quad [4.27]$$

Igualando 4.27 a 4.24 se tiene:

$$\rho * g * h_l * A = (\rho_s - \rho) * g * A * L_0 * (1 - P_0) \quad [4.28]$$



Despejando  $h_L$  se tiene:

$$h_L = \frac{(\rho_s - \rho)}{\rho} (1 - P_o) * L_0$$
$$h_L = (S_s - 1) * (1 - P_o) * L_0 \quad [4.29]$$

Se concluye que la pérdida de carga en el lecho filtrante es constante e independiente de la expansión que se presente y consecuentemente independiente de la velocidad de lavado cuando el lecho está fluidificado.

Adicionalmente hay que considerar la pérdida de carga en la grava de soporte, en el falso fondo y las diferentes pérdidas locales que se presentan con el flujo ascensional.

**Caudal de lavado:** establecida la velocidad ascensional del agua, es posible calcular el caudal de agua necesario, así:

$$Q_L = V_a * A \quad [4.30]$$

Donde:

$V_a$  = velocidad ascensional o de fluidificación (m/min)

$A$  = área superficial del filtro (m<sup>2</sup>)

### 3.9 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FILTRACIÓN<sup>1</sup>

La eficiencia de la filtración está relacionada con las características de la suspensión, del medio filtrante, de la hidráulica de la filtración y la calidad del efluente. Por ejemplo, la filtración de agua cruda en filtros lentos de arena, y la de agua coagulada en filtros rápidos de arena resultan de interacciones distintas entre los granos del medio filtrante y las partículas suspendidas, pues un factor importante en la filtración lenta puede, muchas veces, no ser importante para la filtración rápida.

Se presentan a continuación los principales factores que influyen en la filtración rápida.

**3.9.1 Características de la suspensión:** De modo general, la eficiencia de remoción de partículas suspendidas en un medio filtrante está relacionada con las siguientes características de la suspensión:

- a) tipo de partículas suspendidas;
- b) tamaño de partículas suspendidas;
- c) densidad de partículas suspendidas;

---

<sup>1</sup> Di Bernardo, L. y Cleasby, J. L. Declining-rate versus constant-rate filtration. Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE, 106(EE6), diciembre, 1980, pp. 1023-1041.

- d) resistencia o dureza de las partículas suspendidas (flóculos);
- e) temperatura del agua por filtrar;
- g) potencial zeta de la suspensión; y
- h) pH del afluente.

**3.9.1.1 Tipos de partículas suspendidas:** La filtración de flóculos que no sedimentan en una planta de ablandamiento difiere sustancialmente del caso en que se tienen flóculos provenientes de un pretratamiento con un coagulante de una sal de hierro o aluminio. Por otro lado, el tipo de partículas primarias presentes en el agua cruda influye en la eficiencia de la filtración. Por ejemplo, la existencia de algas en el afluente influye en la formación de curvas de pérdida de carga de manera más acentuada que aquellos casos en que el afluente solo posee partículas suspendidas coaguladas de arcilla o sílice.

**3.9.1.2 Tamaño de las partículas suspendidas:** Existe un tamaño crítico de partículas suspendidas, del orden de 1  $\mu\text{m}$ , el cual genera menos oportunidad de contacto entre la partícula suspendida y el grano del medio filtrante. Este hecho se puede observar desde el principio, cuando el medio filtrante está limpio, hasta el final de la carrera de filtración. Algunos productos químicos, como los coagulantes tradicionales y los polímeros, pueden usarse para ajustar el tamaño de las partículas suspendidas de modo de obtener una eficiencia mayor. Las partículas menores que el tamaño crítico serán removidas eficientemente, debido, principalmente, a la difusión; mientras que las mayores también serán removidas eficientemente debido a la acción de otros mecanismos, como la intercepción y la sedimentación.

**3.9.1.3 Densidad de las partículas suspendidas:** Cuanto mayor sea la densidad de las partículas suspendidas, mayor será la eficiencia de remoción de las partículas de tamaño superior al tamaño crítico, mencionado anteriormente.

**3.9.1.4 Resistencia o dureza de los flóculos:** La dureza de los flóculos es otro factor importante en la filtración rápida, pues los flóculos débiles tienden a fragmentarse y penetrar fácilmente en el interior del medio filtrante, lo que favorece el traspaso final de la turbiedad límite, mientras que los flóculos duros o resistentes no se fragmentan fácilmente, pero producen una pérdida de carga mayor.

**3.9.1.5 Temperatura del agua por filtrar:** En general, el aumento de temperatura conduce a una eficiencia mayor, pues se tiene un aumento de energía termodinámica en las partículas del agua y, consecuentemente, la difusión se vuelve un mecanismo importante cuando se tienen partículas suspendidas menores de un micrómetro. Por otro lado, la disminución de la viscosidad facilita la acción del mecanismo de sedimentación de partículas mayores de un micrómetro.

**3.9.1.6 Concentración de partículas suspendidas en el afluente:** Cuando el medio filtrante se encuentra limpio, la eficiencia de remoción depende de la concentración de partículas suspendidas en el afluente. Después de algún tiempo de filtración, la eficiencia de remoción aumenta con el aumento de la concentración de las partículas

suspendidas en el afluente, pues las partículas retenidas hacen de colectoras de otras partículas suspendidas.

Evidentemente, al existir una eficiencia de remoción mayor con el aumento de la concentración, la curva de pérdida de carga en función del tiempo será más acentuada.

**3.9.1.7 Potencial zeta de la suspensión:** Cuando las partículas suspendidas y los granos del medio filtrante tienen potencial zeta del mismo signo, la interacción entre las capas dificulta la adherencia, lo cual reduce la eficiencia de remoción. Como los materiales filtrantes usuales presentan potenciales zeta negativos, sería conveniente que las partículas suspendidas tuviesen potencial zeta neutro o positivo.

**3.9.1.8 pH del afluente:** El pH influye en la capacidad de intercambio iónico entre las partículas suspendidas y los granos del medio filtrante. Para valores de pH inferiores a 7,0, disminuye el intercambio de cationes y aumenta el intercambio de aniones sobre las superficies positivas; mientras que, para valores de pH superiores a 7,0, se produce un aumento en el intercambio de cationes y una disminución en el intercambio de aniones sobre las superficies negativas.

**3.9.2 Características del medio filtrante:** Entre las características del medio filtrante que influyen en la filtración, destacan:

- a) tipo del medio filtrante;
- b) características granulométricas del material filtrante;
- c) peso específico del material filtrante; y
- d) espesor de la capa filtrante.

**3.9.2.1 Tipo del medio filtrante:** El medio filtrante debe seleccionarse de acuerdo con la calidad que se desea para el agua filtrada. Adicionalmente, debe tenerse en cuenta la duración de la carrera de filtración (capacidad de retención) y la facilidad de lavado. Un medio filtrante ideal es aquel de granulometría determinada y cierto peso específico, que requiere una cantidad mínima de agua para ser lavado de manera eficiente y que es capaz de remover la mayor cantidad posible de partículas suspendidas, para producir un efluente de buena calidad.

La arena ha sido el medio filtrante comúnmente empleado. A pesar de producir un efluente de mejor calidad, la arena de granulometría menor presenta una carrera de filtración más corta que la de granulometría mayor. En todo caso, la estratificación de la arena se da en un filtro rápido como consecuencia del lavado en contracorriente, con los granos de menor tamaño en las capas superiores y los de mayor tamaño en las inferiores. La estratificación, por lo tanto, favorece la retención de la mayor parte de partículas en las capas superiores, lo que hace posible que exista presión inferior a la atmosférica en el interior del medio filtrante, situación indeseable no solo por la posibilidad de formación de burbujas de aire sino también por la compactación de parte del medio filtrante; de este modo, se perjudica el proceso de filtración y se dificulta el lavado.

El problema producido por la estratificación puede controlarse usando arena con coeficiente de uniformidad próximo a la unidad y arena preparada entre dos mallas consecutivas; por ejemplo, entre las de aberturas iguales a 0,42 y 0,59 mm. A pesar de ser esta la condición ideal, pues se ahorra agua para el lavado, la preparación de la arena no resultaría económicamente ventajosa. En la práctica, lo común es especificar la arena con un coeficiente de uniformidad inferior a 1,5. Hace más de 25 años, Conley y Pitman<sup>1</sup> realizaron investigaciones empleando una capa de antracita, de granulometría mayor, dispuesta sobre la arena de granulometría menor. Como el peso específico de la antracita es inferior al de la arena, los inconvenientes de la estratificación, así como los del medio filtrante constituido exclusivamente de arena, se controlan en forma satisfactoria. Debido a que cuando se usan tasas de filtración elevadas, la calidad del agua filtrada no puede ser inferior a la obtenida con filtros de un solo medio de arena, los filtros de medios múltiples fueron investigados con mayor profundidad, y se llegó a medios filtrantes constituidos por cinco capas con los siguientes materiales: poliestireno, antracita, arena, granate y magnetita. A pesar de que la calidad del efluente es sustancialmente superior y la pérdida de carga considerablemente inferior a la del filtro de medio único de arena, los filtros de tres, cuatro o cinco capas no se han utilizado comúnmente en las plantas de tratamiento porque, además de la dificultad para adquirir los materiales, existe el inconveniente de la intermezcla excesiva de los granos mayores con los menores, entre las capas adyacentes de materiales diferentes.

La filtración en medios filtrantes dobles, constituidos por antracita y arena, es, desde todo punto de vista, superior a la filtración en medios constituidos únicamente por arena, como lo demuestran los trabajos de investigación realizados en instalaciones piloto y en prototipos, publicados por la Water Research Association<sup>2</sup>, en Inglaterra.

La elección del medio filtrante depende de innumerables factores. Entre los más importantes figuran la calidad deseada para el efluente, los costos y la facilidad de adquisición de los materiales en el mercado, y la existencia de personal calificado para operar las instalaciones de filtración.

**3.9.2.2 Características granulométricas del material filtrante:** Los materiales filtrantes deben ser claramente especificados, de manera que no quede duda alguna sobre su granulometría. Los parámetros que se deben emplear para este fin son los siguientes:

- **Tamaño efectivo:** en relación con el porcentaje (en peso acumulado) que pasa por las mallas de una serie granulométrica, el tamaño efectivo se refiere al tamaño de granos correspondiente al porcentaje de 10%.

---

<sup>1</sup> Conley W. R. y Pitman, R. W. Test program for filter evaluation at Hanford. *Journal of the American Water Works Association*, 52(2), febrero, 1960, pp. 209-218.

<sup>2</sup> The Water Research Association. *Anthracite-sand filtration. A working conference*, Universidad de Reading, 1972.

- Coeficiente de uniformidad (CU): en relación con el porcentaje (en peso acumulado) que pasa por las mallas de una serie granulométrica, el coeficiente de uniformidad es igual a la relación entre el tamaño de los granos correspondientes a 60% y el tamaño de los granos correspondiente a 10%. Sería mejor que este coeficiente se llamase *de desuniformidad*, pues su valor se incrementa a medida que el material granular es menos uniforme.
- Forma: la forma de los granos normalmente se evalúa en función del coeficiente de esfericidad ( $C_e$ ). El coeficiente de esfericidad de una partícula se define como el resultado de la división del área superficial de la esfera de igual volumen a la del grano por el área superficial de la partícula considerada. Como es obvio, este valor resulta igual a la unidad para las partículas esféricas y menor de uno para las irregulares.
- Tamaño mínimo: tamaño por debajo del cual no deben encontrarse granos en el medio filtrante.
- Tamaño máximo: tamaño por encima del cual no deben encontrarse granos en el medio filtrante.

Cuando se trata de seleccionar el material para lechos múltiples, se debe hacerlo con el criterio de obtener un grado de intermezcla que no disminuya sustancialmente la porosidad en la región común entre las capas adyacentes de materiales diferentes. Específicamente para el caso de lechos dobles de arena y antracita, se recomienda considerar las siguientes relaciones:

- El tamaño de los granos de antracita correspondiente a 90% en peso (referente al que pasa) y el tamaño de los granos de arena correspondiente a 10% en peso (referente al que pasa = tamaño efectivo) deben mantener una relación de 3,0.
- El tamaño de los granos de antracita correspondiente a 90% en peso (referente al que pasa) y el tamaño de los granos de antracita correspondiente a 10% en peso (referente al que pasa) deben mantener una relación de 2. Normalmente, la antracita se prepara entre las mallas de la serie Tyler de aberturas 0,59 y 1,68 ó 2,00 mm, con un tamaño efectivo que varía entre 0,80 y 1,10 mm, y un coeficiente de uniformidad inferior a 1,5. La arena normalmente es preparada entre las mallas de aberturas entre 0,42 y 1,19 ó 1,41 mm, con un tamaño efectivo que varía entre 0,50 y 0,60 mm y un coeficiente de uniformidad inferior a 1,5.

**3.9.2.3 El peso específico del material filtrante:** El peso específico ( $P_e$ ) del material es igual al peso de los granos dividido por el volumen efectivo que ocupan los granos.

**3.9.2.4 .El espesor de la capa filtrante:** En una planta de tratamiento de agua con filtros de dos o más capas, es relativamente difícil fijar un espesor de medio filtrante para el cual los filtros funcionen constantemente en condiciones ideales, porque la

calidad del afluente varía considerablemente durante el año. La experiencia ha demostrado que existe una relación entre el espesor de la capa de arena y la de antracita en un filtro de dos medios; en general, el espesor de la capa de antracita representa de 60 a 80%; y la arena, de 20 a 40% del espesor total del medio filtrante. De este modo, un medio filtrante de 70 cm de espesor tendrá aproximadamente 50 cm de antracita y 20 cm de arena.

Asimismo, para el caso de filtros de lecho simple, la experiencia y diversas investigaciones han permitido establecer espesores recomendados para diferentes casos: filtración de agua decantada, filtración directa o filtración descendente o ascendente.

**3.9.3 Características hidráulicas:** Las características hidráulicas que influyen en la eficiencia de la filtración son las siguientes:

- a) tasa de filtración;
- b) carga hidráulica disponible para la filtración;
- c) método de control de los filtros;
- d) calidad del efluente.

**3.9.3.1 Tasa de filtración:** El empleo de tasas de filtración bajas no asegura, necesariamente, la producción de agua filtrada de mejor calidad y mayor volumen de agua producida por carrera de filtración.

Las variaciones de la tasa de filtración durante una carrera de filtración son muchas veces inevitables y pueden afectar sustancialmente la calidad del efluente. Entre los principales estudios realizados para verificar la influencia de la variación de esta tasa en la calidad del agua filtrada, destacan los trabajos de Cleasby y colaboradores, Segall y Okun<sup>1</sup> y Tuepker<sup>2</sup>.

De modo general, los efectos de las variaciones de tasa de filtración dependen, principalmente, de la magnitud de la variación producida, de la tasa de filtración, de la pérdida de carga presentada por el filtro en el momento en que ocurre la variación de la tasa de filtración y de la forma en la que se realiza la variación.

**3.9.3.2 Carga hidráulica disponible para la filtración:** La carga hidráulica que se debe fijar en un filtro influye significativamente en la duración de la carrera de filtración. Este parámetro es empírico y normalmente es seleccionado por el proyectista. Sin embargo, estudios realizados por Di Bernardo y Cleasby<sup>3</sup> mostraron que los filtros de

---

<sup>1</sup> Segall, B. A. y Okun, D. A. Effect of filtration rate on filtrate quality. *Journal of the American Water Works Association*, 58(3), marzo, 1966, pp. 368-378.

<sup>2</sup> Tuepker, J. L. Filter performance under varying operating conditions. *Proceedings of the Conference on Water Filtration*. University of Missouri at Rolla, abril, 1965.

<sup>3</sup> Di Bernardo, L. y Cleasby, J. L. Declining-rate versus constant-rate filtration. *Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE*, 106(EE6), diciembre, 1980, pp. 1023-1041.

tasa declinante producen carreras de filtración más largas que los de tasa constante para una misma pérdida de carga en el medio filtrante y la misma tasa de filtración promedio. Esto significa que los filtros de tasa constante necesitarían una carga hidráulica disponible superior a los de tasa declinante para obtener carreras de filtración de la misma duración.

Por otro lado, fijar la carga hidráulica con la que un filtro o un sistema de filtración debe operar depende de otros factores, como el espesor y la granulometría del medio filtrante, aspectos económicos, etcétera. Con cargas hidráulicas disponibles mayores, las carreras de filtración resultan más largas, pero, por otro lado, están los inconvenientes de compactación del medio filtrante que dificultan el lavado.

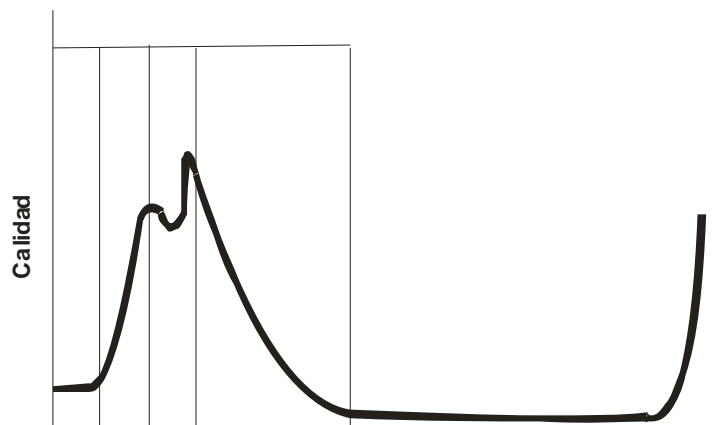
**3.9.3.3 El método de control de los filtros:** El método de control de los filtros también influye en la eficiencia de estas unidades. Los métodos de control operacional más utilizados son tasa constante y tasa declinante.

Mientras que en un filtro operado con tasa constante, este es forzado, hacia el final de su carrera de filtración, a operar con la misma tasa que al inicio de ella, es evidente que se obtendrá de él un agua filtrada de menor calidad que la que se obtiene de un filtro operado bajo la condición de que no se fuerce a la unidad a trabajar con una tasa mayor a su capacidad de filtración, definida por el nivel de colmatación del medio filtrante. Esta última descripción corresponde al caso de filtros que se operan con tasa declinante. Es una forma de operación en la que cada unidad tomará el caudal que está en capacidad de filtrar.

**3.9.3.4 Calidad del efluente:** La calidad del efluente está relacionada con diversas características inherentes al filtro propiamente dicho, al uso a que se destina al agua filtrada y a la existencia de una operación eficiente.

Los patrones de potabilidad varían entre los diversos países; por lo tanto, de un modo general, la turbiedad del efluente no debe superar las 5 UNT y, de preferencia, tampoco ser mayor de una UNT. Se aconseja que el agua filtrada no presente color; por lo tanto, se toleran valores inferiores a 5 UC. Desde el punto de vista bacteriológico, los filtros constituyen una barrera sanitaria a los microorganismos, al tener una eficiencia de remoción superior a 99%.

Es usual obtener agua filtrada que presente las condiciones antes mencionadas a través de filtros de capa única de arena y de dos o más capas. Sin embargo, la calidad del agua filtrada no es constante desde el inicio hasta el final de la carrera de filtración. Estudios realizados por Armitharajah y Wetstein (12) mostraron que la degradación inicial del efluente es el resultado del lavado con agua en contracorriente. La figura 6 muestra la variación de la calidad del agua filtrada después de que el filtro recién lavado entró en operación.



**Figura 6.** Variación de la calidad del efluente durante la carrera de filtración

Fuente. Di Bernardo Luis (1981)

Desde el punto de vista académico, representar los factores que influyen en la filtración por separado facilita la comprensión de la influencia que cada uno ejerce. En la realidad, la filtración es una operación compleja que no puede ser analizada simplemente en función de una variable, sin tener en cuenta la influencia de las demás. La filtración de diferentes suspensiones en un mismo medio filtrante y con las mismas características hidráulicas da como resultado efluentes de diferentes calidades y curvas de pérdida de carga de formas distintas. Algunas aguas presentan un periodo inicial de filtración con mejora considerable en la calidad del efluente, mientras que otras no la tienen o la presentan por un corto periodo. Algunas aguas tienen curva de pérdida de carga aproximadamente lineal, mientras que otras presentan curvas exponenciales de la pérdida de carga en función del tiempo.

### 3.10 UTILIZACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO EN LA FILTRACIÓN <sup>1</sup>

Desde tiempos remotos los egipcios descubrieron que el carbón de madera podía utilizarse para purificar otros Productos e incluso usarse con fines medicinales. En la actualidad, el carbón activado es utilizado para remover color, olor y sabor de una infinidad de productos, por lo cual lo podemos encontrar en aplicaciones tan sencillas como peceras o filtros de refrigerador, hasta complejos sistemas industriales como modernas plantas de tratamiento de aguas residuales o delicados sistemas de elaboración de antibióticos.

<sup>1</sup> ¿QUE ES EL CARBÓN ACTIVADO? Disponible en Internet  
[http://www.clarimex.com/misterio\\_car\\_activ.htm](http://www.clarimex.com/misterio_car_activ.htm)



**3.10.1 Versatilidad del carbón activado<sup>1</sup>:** Es conveniente analizar primero el proceso de adsorción, para así comprender mejor como es que el carbón activado realiza su función. La adsorción es un proceso por el cual los átomos en la superficie de un sólido, atraen y retienen moléculas de otros compuestos. Estas fuerzas de atracción son conocidas como "fuerzas de Van Der Waals". Por lo tanto al ser un fenómeno que ocurre en la superficie mientras mayor área superficial disponible tenga un sólido, mejor adsorbente podrá ser.

El carbón activado es un producto que posee una estructura cristalina reticular similar a la del grafito; es extremadamente poroso y puede llegar a desarrollar áreas superficiales del orden de 1,500 metros cuadrados ó más, por gramo de carbón.

Todos los átomos de carbón en la superficie de un cristal son capaces de atraer moléculas de compuestos que causan color, olor o sabor indeseables; la diferencia con un carbón activado consiste en la cantidad de átomos en la superficie disponibles para realizar la adsorción. En otras palabras, la activación de cualquier carbón consiste en "multiplicar" el área superficial creando una estructura porosa. Es importante mencionar que el área superficial del carbón activado es interna. Para darnos una idea más clara de la magnitud de la misma, imaginemos un gramo de carbón en trozo el cual moleremos muy fino para incrementar su superficie, como resultado obtendremos un área aproximada de 3 a 4 metros cuadrados, en cambio, al activar el carbón logramos multiplicar de 200 300 veces este valor.

Por todo ello, cuando se desea remover Una impureza orgánica que causa color, olor o sabor indeseable, normalmente la adsorción con carbón activado suele ser la técnica más económica y sencilla.

**3.10.2 El carbón activado, materias primas y aplicaciones<sup>2</sup>:** Desde el punto de vista de la composición química, el CA es carbón prácticamente puro, al igual que lo es el diamante, el grafito, el negro de humo, y los diversos carbones minerales, o de leña.

Todos ellos poseen la propiedad de adsorber, que consiste en un fenómeno fisicoquímico en el que un sólido, llamado adsorbente, atrapa en sus paredes a cierto tipo de moléculas, llamadas adsorbatos, y que están contenidas en un líquido o un gas.

La diferencia fundamental entre uno y otro tipo de carbón radica en la estructura, o arreglo de sus átomos. En el caso del CA, éstos se encuentran combinados en forma de placas graníticas.

Las placas están separadas y tienen distintas orientaciones, por lo que existen espacios entre ellas, a los que se denominan poros, que brindan al CA su principal característica:

---

<sup>1</sup> ¿QUE ES EL CARBÓN ACTIVADO? Disponible en Internet

[http://www.clarimex.com/misterio\\_car\\_activ.htm](http://www.clarimex.com/misterio_car_activ.htm)

<sup>2</sup> EL CARBÓN ACTIVADO, MATERIAS PRIMAS Y APLICACIONES. Disponible en Internet

<http://www.carbonactivo.com/ca/introduccion.htm>

una gran área superficial, y por lo tanto, una alta capacidad adsorbente. El área de la mayoría de los carbones activados comerciales está entre 500 y 1,500 m<sup>2</sup>/g.

#### Tipos de poros dentro de una partícula de carbón

El CA tiene una gran variedad de tamaños de poros los cuales pueden clasificarse de acuerdo a su función, en poros de adsorción y poros de transporte.

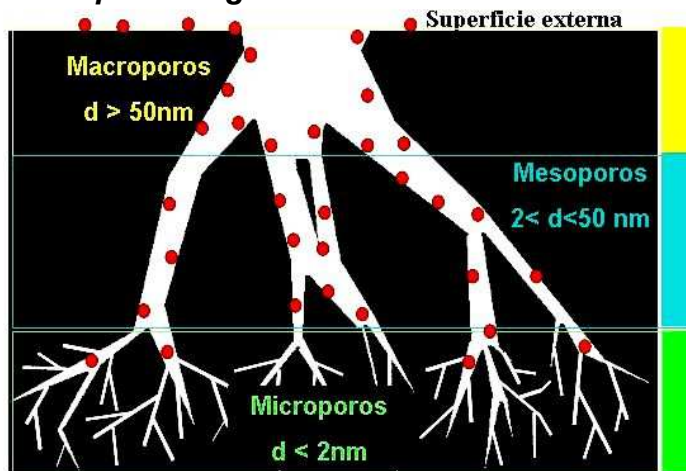
Los primeros consisten en espacios entre placas graníticas con una separación de entre una y cinco veces el diámetro de la molécula que va a retenerse. En éstos, ambas placas de carbón están lo suficientemente cerca como para ejercer atracción sobre el adsorbato y retenerlo con mayor fuerza.

Los poros mayores que los de adsorción son de transporte, y tienen un rango muy amplio de tamaños, que van hasta el de las grietas que están en el límite detectable por la vista, y que corresponde a 0.1 mm. En esta clase de poros, solo una placa ejerce atracción sobre el adsorbato y entonces lo hace con una fuerza menor, o incluso insuficiente para retenerlo. Actúan como caminos de difusión por los que circula la molécula hacia los poros de adsorción en los que hay una atracción mayor. Por lo tanto, aunque tienen poca influencia en la capacidad del CA, afectan la cinética o velocidad con la que se lleva a cabo la adsorción.

Otra clasificación de los poros, es la de la IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemists), que se basa en el diámetro de los mismos, de acuerdo a lo siguiente:

*microporos*: menores a 2 nm; *mesoporos*: entre 2 y 50 nm; *macroporos*: mayores a 50 nm (típicamente 200 a 2000 nm), ver figura 7.

Figura 7. Representación esquemática del sistema poroso de un carbón y clasificación de los poros según su tamaño<sup>1</sup>



<sup>1</sup>IMPORTANCIA DE LA TEXTURA POROSA DE LOS CARBONES ACTIVADOS. Disponible en Internet <http://www.oviedo.es/personales/carbon/cactivo/impqcatex.htm>

Los *microporos* tienen un tamaño adecuado para retener moléculas pequeñas, que aproximadamente corresponden a compuestos más volátiles que el agua, tales como olores, sabores y muchos solventes.

Los *macroporos* atrapan moléculas grandes, tales como las que son coloridas o las sustancias húmicas -ácidos húmicos y fúlvicos- que se generan al descomponerse la materia orgánica. Los *mesoporos* son los apropiados para moléculas intermedias entre las anteriores.

Por lo tanto, la capacidad de un CA para retener una sustancia determinada, no solo está dada por su área superficial, sino por la proporción de poros cuyo tamaño es el adecuado: una a cinco veces el diámetro de la molécula de dicha sustancia.

Métodos de fabricación, materias primas y sus efectos en las características del carbón activado.

**3.10.3 El proceso de activación<sup>1</sup>:** El CA puede fabricarse a partir de todo tipo de material carbonoso, o bien, a partir de cualquier carbón mineral no grafitico. Sin embargo, cada materia prima brindará características y calidades distintas al producto. En cuanto al proceso de activación, existen dos tecnologías básicas: activación térmica y por deshidratación química.

**A) Activación térmica:** Cuando se parte de un material orgánico (madera, cáscara de coco, sangre u otro), el proceso se inicia con su carbonización, la cuál debe realizarse a una baja temperatura en la que no se favorezca la grafitación. Si se parte de carbón mineral, es obvio que no se requiere la carbonización, ya que la naturaleza se encargó de realizarla. Sin embargo, en el caso de los carbones minerales suele ser necesario un lavado previo, para extraer contaminantes como azufre y metales pesados, que típicamente se encuentran en los yacimientos.

El carbón resultante se somete a temperaturas cercanas a los 1000oC, en una atmósfera inerte o reductora, usualmente saturada con vapor de agua. En estas condiciones, y a lo largo de un cierto tiempo, algunos átomos de carbón reaccionan y se gasifican en forma de CO<sub>2</sub>, y otros se recombinan y condensan en forma de las mencionadas placas grafiticas.

El CA sale del horno al rojo vivo, por lo que debe enfriarse antes de entrar en contacto con el aire a temperatura ambiente. De lo contrario, una parte de éste desaparecería como CO<sub>2</sub>, y el producto resultaría con una cantidad muy grande de óxidos superficiales, que podrían afectarlo negativamente. Para lograr este enfriamiento, puede recibirse el carbón en agua, o en un equipo sellado con enfriamiento indirecto.

---

<sup>1</sup> EL PROCESO DE ACTIVACIÓN. Disponible en Internet  
<http://www.carbonactivo.com/ca/introduccion.htm>

Lo anterior constituye la etapa básica del proceso. El resto consiste en operaciones de molido y cribado para brindar al producto el rango buscado de tamaños de partícula.

**B) Activación por deshidratación química:** Este método solo puede aplicarse a ciertos materiales orgánicos, relativamente blandos y que están formados por moléculas de celulosa, como es el caso de la madera. La primera etapa consiste en deshidratar la materia prima mediante la acción de un químico, tal como ácido fosfórico, cloruro de zinc o carbonato de potasio. Posteriormente, se carboniza el material deshidratado a baja temperatura (500 a 600°C), obteniéndose automáticamente la estructura porosa. El producto resultante se lava con el objeto de dejarlo tan libre como sea posible del químico utilizado, así como para recuperar y reutilizar este último. El grado de activación también puede variarse en este tipo de proceso, de acuerdo a la cantidad del químico deshidratante utilizado.

Cuando puede activarse una misma materia prima, tanto térmicamente como por deshidratación química, el CA producido por la segunda tecnología adquiere poros cuyo tamaño es un poco mayor.

**3.10.4 Principales materias primas y sus efectos en las características del producto<sup>1</sup>:** Aunque, como se ha mencionado, el CA puede fabricarse a partir de un sinnúmero de materiales carbonosos, solamente se utilizan unos cuantos, tales como: madera de pino, carbón mineral lignítico, carbón mineral bituminoso, cáscara de coco, entre otros, a nivel comercial, debido a su disponibilidad, bajo costo y a que los productos obtenidos a partir de ellos, tienen las propiedades que cubren toda la gama de aplicaciones que el CA puede tener.

**3.10.5 Utilización de Carbón Activado<sup>2</sup>:** En relación con el tratamiento de las aguas, el carbón activo se utiliza:

En tratamiento de afino de aguas potables o de aguas industriales de gran pureza, especialmente cuando se obtienen partiendo de aguas superficiales. El carbón activo retiene los compuestos orgánicos disueltos no eliminados por la degradación biológica natural, microcontaminantes y ciertos metales pesados a nivel de trazas.

En el tratamiento terciario de aguas residuales o industriales. El carbón retiene los compuestos orgánicos disueltos, resistentes al tratamiento biológico, con lo que se elimina una cierta proporción de la DQO residual.

---

<sup>1</sup> PRINCIPALES MATERIAS PRIMAS Y SUS EFECTOS EN LAS CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO. Disponible en Internet: <http://www.carbonactivo.com/ca/introduccion.htm>

<sup>2</sup> UTILIZACIÓN DE LOS CARBONES ACTIVOS. Disponible en Internet.

<http://www.textoscientificos.com/quimica/carbon-activo/utilizacion-carbones-activos>

En el tratamiento de aguas residuales industriales, cuando el efluente no es biodegradable o contiene elementos tóxicos orgánicos que impiden la puesta en práctica de técnicas biológicas.

En resumen, debe preverse el empleo de carbón activo cuando se deseen eliminar contaminantes orgánicos disueltos, tales como:

- Detergentes.
- Colorantes de síntesis solubles.
- Disolventes clorados.
- Fenoles y derivados hidroxilados.
- Derivados aromáticos, sustituidos o no, especialmente derivados clorados o nitrados.
- Sabores y olores.

**3.10.5.1 El carbón en polvo:** generalmente se utiliza en combinación con los tratamientos de clarificación. Inyectado de forma continua en el agua con reactivos de floculación, se introduce en los flóculos y seguidamente se extrae del agua con ellos. Para esta extracción, se recomienda a veces recurrir a una filtración directa, si bien es preferible utilizar un decantador de recirculación de fangos o, mejor aún, de lecho de fangos. Con estos aparatos se aumenta notablemente el tiempo de contacto entre el agua y el carbón y, por lo tanto, se consigue una mejor aproximación al equilibrio. Otra forma de aplicación es añadir carbón activo en polvo al efluente del tratamiento biológico. El carbón, en este caso, es añadido al efluente en un tanque de contacto. Una vez transcurrido el tiempo deseado se deja que el carbón sedimente en el fondo del tanque y seguidamente se extrae del mismo el agua tratada. Puesto que el carbón está pulverizado, puede necesitarse un coagulante para facilitar la eliminación de las partículas de carbón, o bien requerirse una filtración a través de filtros rápidos de arena.

Como se ha indicado, el carbón activo puede utilizarse igualmente para afino de aguas industriales de elevada pureza (tratamiento de condensados, agua de aclarado en la industria electrónica, etc.).

Ventajas:

- Los carbones activos en polvo son, aproximadamente, de dos a tres veces más baratos que los carbones en grano.
- Pueden dosificarse en exceso, en caso de puntas de contaminación.
- Precisan inversiones reducidas. Cuando el tratamiento consiste sólo en una etapa de floculación-decantación basta prever un simple equipo de dosificación de carbón activo.
- Su cinética de adsorción es rápida, puesto que su superficie es fácilmente accesible.
- El carbón activo favorece la decantación, al espesar el flóculo.

Inconvenientes:

- El carbón activo no puede regenerarse cuando se recupera en mezcla con fangos de hidróxidos, por lo que debe preverse la pérdida de este material después de su utilización. Cuando se utiliza carbón activo sólo (en ausencia de coagulantes minerales) puede recurrirse a la técnica de regeneración en lecho fluidizado que, sin embargo, conlleva pérdidas muy elevadas.
- Es difícil eliminar las últimas trazas de impurezas, sin añadir un exceso de carbón activo.

El carbón activo en polvo se utiliza esencialmente en dosificaciones discontinuas o de pequeña importancia (inferiores a 25 - 50 g/ m<sup>3</sup>, según los casos).

**3.10.5.2 Carbón en grano:** El carbón en grano se utiliza en forma de lecho filtrante atravesado por el agua a tratar, cuyas impurezas se someten así a una extracción metódica. En efecto, el agua, progresivamente liberada de sus contaminantes, encuentra fracciones de carbón activo cada vez menos saturadas y, por lo tanto, cada vez más activas.

**3.10.5.3 Asociación polvo-grano:** En algunos casos de tratamiento de aguas de superficie, de contaminación muy variable, puede ser interesante combinar el empleo de carbón en polvo, en la clarificación, para hacer frente a puntas de contaminación, con el tratamiento posterior con carbón en grano, para alcanzar el nivel de descontaminación final deseado.

**3.10.5.4 Capacidad útil de un carbón:** La experiencia demuestra que rara vez pueden sobrepasarse tres volúmenes de agua por volumen de carbón y por hora, en casos de contaminación elevada. En el caso de tratamiento de aguas para el consumo humano, en el que los contenidos de productos adsorbibles son muy pequeños, deben preverse, en el estudio económico, unos elevados gastos de inversión, por lo que generalmente debe aceptarse una menor saturación del carbón, utilizando velocidades mayores: 5 a 10 vol. agua/(vol. carbón. h). Puesto que la teoría da únicamente el sentido de variación de estas leyes, es indispensable recurrir a la experiencia del especialista y realizar ensayos dinámicos a través de columnas de tamaño suficiente para poder efectuar una extrapolación.

## 4 METODOLOGÍA

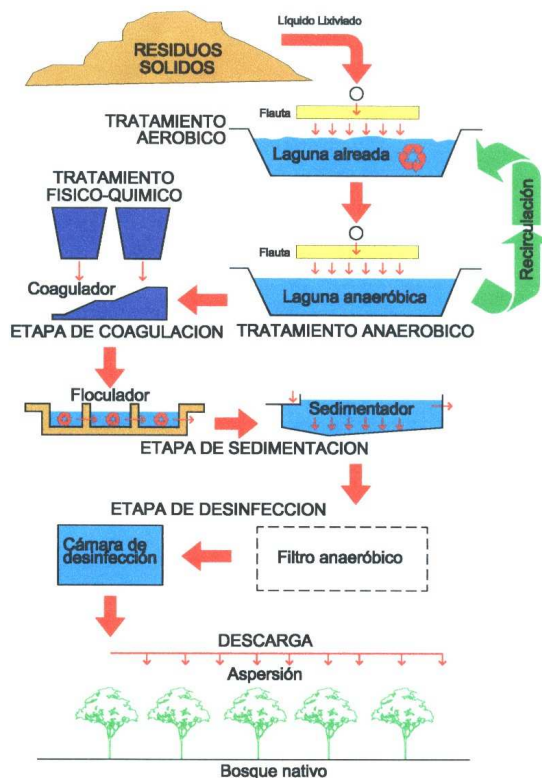
El proyecto se desarrolló en cuatro etapas: la **primera** incluye la localización y replanteo del sitio de trabajo, así como la implementación del filtro aerobio dentro del CEPA (Centro Experimental Piloto de Antanas); la **segunda** comprende el cálculo, diseño y la construcción de los filtros aerobios, considerando el caudal existente dentro del lixiviado efluente del CEPA; la **tercera** comprende la puesta en marcha, operación y mantenimiento del filtro, así como la recolección de muestras durante tres meses, en periodos de prueba determinados; y la **cuarta**, que comprende la realización de las pruebas de laboratorio a las muestras obtenidas, el análisis y la interpretación de los resultados obtenidos.

### 4.1 LOCALIZACIÓN.

La zona de estudio se ubica en el departamento de Nariño, en la parte baja de la vereda Daza a 12 Km. del municipio de San Juan de Pasto por la vía panamericana norte y a 1 Km.; de ésta por la troncal hacia Buesaco. Está limitado al sur por la vía que conduce a dicho municipio, al norte por la quebrada Yuyas, al oeste con el afluente mas occidental de la quebrada Yuyas en su margen izquierda, y al este con el drenaje mas oriental de la quebrada Yuyas en su margen izquierda.

El proyecto se centró en el Relleno Sanitario ANTANAS, cuya planta de tratamiento de Lixiviados, la cual está ubicada entre la cota la 2740 y 2745 m.s.n.m. posee: laguna aireada, laguna anaerobia, dosificador de cal, coagulador, floculador, sedimentador, filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) y dosificador de cloro; para finalmente entregar mediante un sistema de aspersion al suelo como se observa en la figura 8. La planta piloto del CEPA (descrita en el numeral 2) se ubica a un costado de ésta planta de tratamiento.

**Figura 8. Sistema Actual de Tratamiento de Lixiviados**



Fuente. Empresa Metropolitana de Aseo. EMAS. SA. E.S.P

## 4.2 ETAPAS DEL PROYECTO

**4.2.1 Etapa 1: selección del sitio de trabajo:** en la primera etapa de la investigación se hizo un reconocimiento de los niveles existentes en cada una de las fases de tratamiento del ceba, tales como cotas de entrada y salida de las lagunas anaerobia y aerobia, así como del sedimentador; se diseñó de esta manera, el filtro a implementar, contemplando las cotas a las que se encontrarían la entrada del afluente, los niveles mínimo y máximo de lixiviado dentro del cuerpo del filtro, la cota de una válvula by pass (que se acondicionaría para accionar en el momento que se necesite cerrar la válvula de entrada del afluente al filtro, para la realización de un proceso de retro-lavado), y las cotas de la caja diseñada para la recolección de las diferentes muestras.



## 4.2.2 Etapa 2: cálculo, diseño y construcción de los filtros aerobios:

**4.2.2.1 Filtro De Arena Y Antracita:** El área transversal de los filtros se determinó a partir de las características del lixiviado que fluye desde el tanque de estabilización y sedimentación del CEPA. El procedimiento se detalla a continuación:

*Velocidad de filtración*<sup>1</sup>

$$Vel = 200lt / (m^2 * min)$$

*Caudal del lixiviado*, es el caudal de trabajo del CEPA y corresponde a:

$$Q = 0,5m^3 / día \quad Q = 0,35lt / min$$

Con estos valores, se determinó el área transversal requerida, así:

$$A = \frac{Q}{Vel} \quad [5.1]$$

$$A = \frac{0,35lt / min}{200lt / (m^2 * min)}$$

$$A = 0.0017m^2$$

Dado que el diámetro comercial más próximo es el de 1.5 plg. y su área transversal es igual a  $0.00113 m^2$ , se decide adoptar 1,5 plg. como diámetro a usar en el filtro.

**4.2.2.1.1 Determinación De Los Lechos Y Sus Alturas:** Las consideraciones para la selección y el diseño de las profundidades de los lechos en los filtros, se basaron en la siguiente tabla:

---

<sup>1</sup> TCHOBANOGLOUS G, ELIASSEN, Wastewater Engineering: Treatment and Reuse, McGraw-Hill's, 1970, pp. 1063.

**Tabla 3. Datos Típicos De Diseño Para Filtros Profundos Duales Y Multimediales<sup>1</sup>**

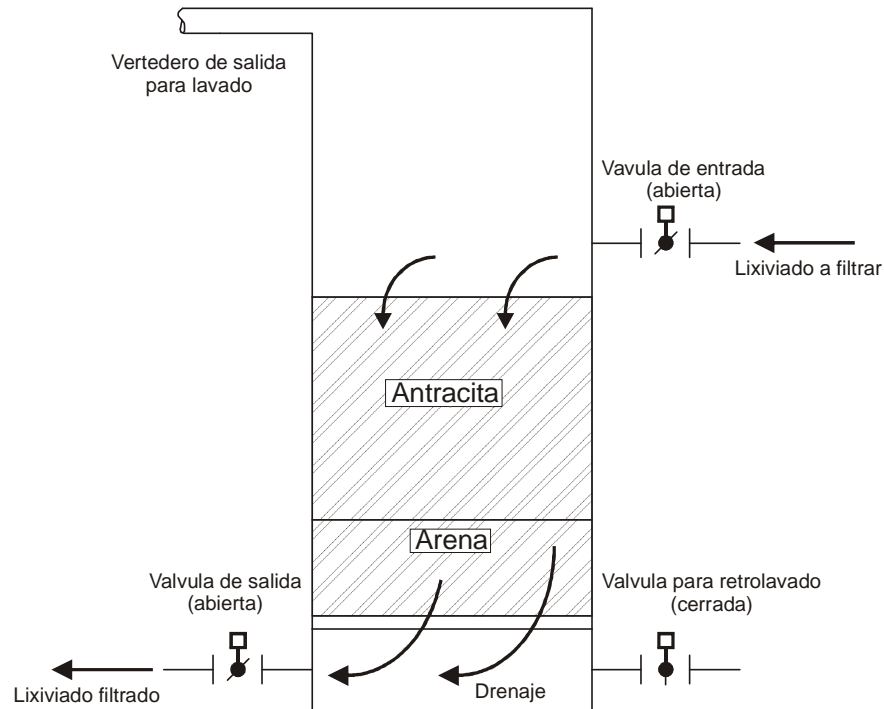
Característica	Valores		
	Unidades	Rango	Típico
Medio Dual			
Antracita ( $\rho=1.4$ )			
Profundidad	milímetros	360 - 900	720
Tamaño efectivo	milímetros	0.8 - 0.2	1.3
Coef. Uniformidad	adimensional	1.3 - 1.6	$\leq 1.5$
Arena ( $\rho=2.65$ )			
Profundidad	milímetros	180 - 360	360
Tamaño efectivo	milímetros	0.4 - 0.8	0.65
Coef. Uniformidad	adimensional	1.2 - 1.6	$\leq 1.5$

Se determinó entonces la profundidad a utilizar en los lechos de los filtros, con los siguientes valores:

*Profundidad del lecho de Antracita:* 40 centímetros

*Profundidad del lecho de Arena:* 20 centímetros

**Figura 9. Esquema de dirección de flujos en el filtro**



Fuente. Esta investigación

<sup>1</sup> Adaptado de Tchobanoglous (1988)

## Características de los medios filtrantes

**Tabla 4.** Granulometría tipo de la arena utilizada en el filtro

Numero Tamiz	Porcentaje Arena retenido	Porcentaje acumulado de pasante	Tamaño geométrico (mm) $d_i=(d_1*d_2)^{0,5}$
6-8	0	100	
8-10	1	99	2,18
10-12	3	96	1,83
12-18	16	80	1,30
18-20	16	64	0,92
20-30	30	34	0,71
30-40	22	12	0,50
40-50	12	0	0,35

Se adopta para la arena un tamaño efectivo  $TE = 0.595$  mm, que es la abertura del tamiz que deja pasar el 10% =  $d_{10}$ ; se determina el coeficiente de uniformidad CU.

$$CU = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad [5.2]$$

Donde:

$d_{60}$  = Abertura del tamiz que deja pasar el 60%

$d_{10}$  = Abertura del tamiz que deja pasar el 10%

$$CU = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{0.841}{0.595} = 1.41 \approx 1.4$$

**Tabla 5.** Designación y tamaño de apertura de los tamaños de tamiz.<sup>1</sup>

Abertura o número de tamiz	Tamaño de apertura en pulgadas	Tamaño de apertura en milímetros
3/8 plg.	0.375	9.51
¼ plg.	0.250	6.35
4	0.187	4.76
6	0.132	3.36
8	0.0937	2.38
10	0.0787	2.00
12	0.0661	1.68
14	0.0555	1.41
16	0.0469	1.19
18	0.0394	1.00
20	0.0331	0.841
25	0.0280	0.710
30	0.0234	0.595
35	0.0197	0.500
40	0.0165	0.420
45	0.0138	0.350
50	0.0117	0.297
60	0.0098	0.250
70	0.0083	0.210
80	0.0070	0.177
100	0.0059	0.149

### Determinación de los tamaños efectivos de la Antracita

$$d_{90(\text{antracita})} = 3 * d_{10(\text{Arena})} \quad [5.3]$$

$$d_{90(\text{antracita})} = 3 * 0.595 \text{ mm} = 1.785 \text{ mm}$$

Es aconsejable que el coeficiente de desuniformidad de la antracita sea idéntico al de la arena, luego:

$$CU(\text{antracita}) = CU(\text{arena})$$

$$CU(\text{antracita}) = 1.40$$

<sup>1</sup> Fuente: METCALF & Eddy, INC. Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. España: Editorial Mc Graw Hill 1996. Pág. 1087 (tabla 11-9)



Antracita



Arena

Por consiguiente por el punto  $(d_{90}, 90)$ , se traza una paralela a la gráfica 1 y se obtiene la gráfica 2 que representa las características granulométricas de la antracita seleccionada. Tal como se observa en la figura 9.

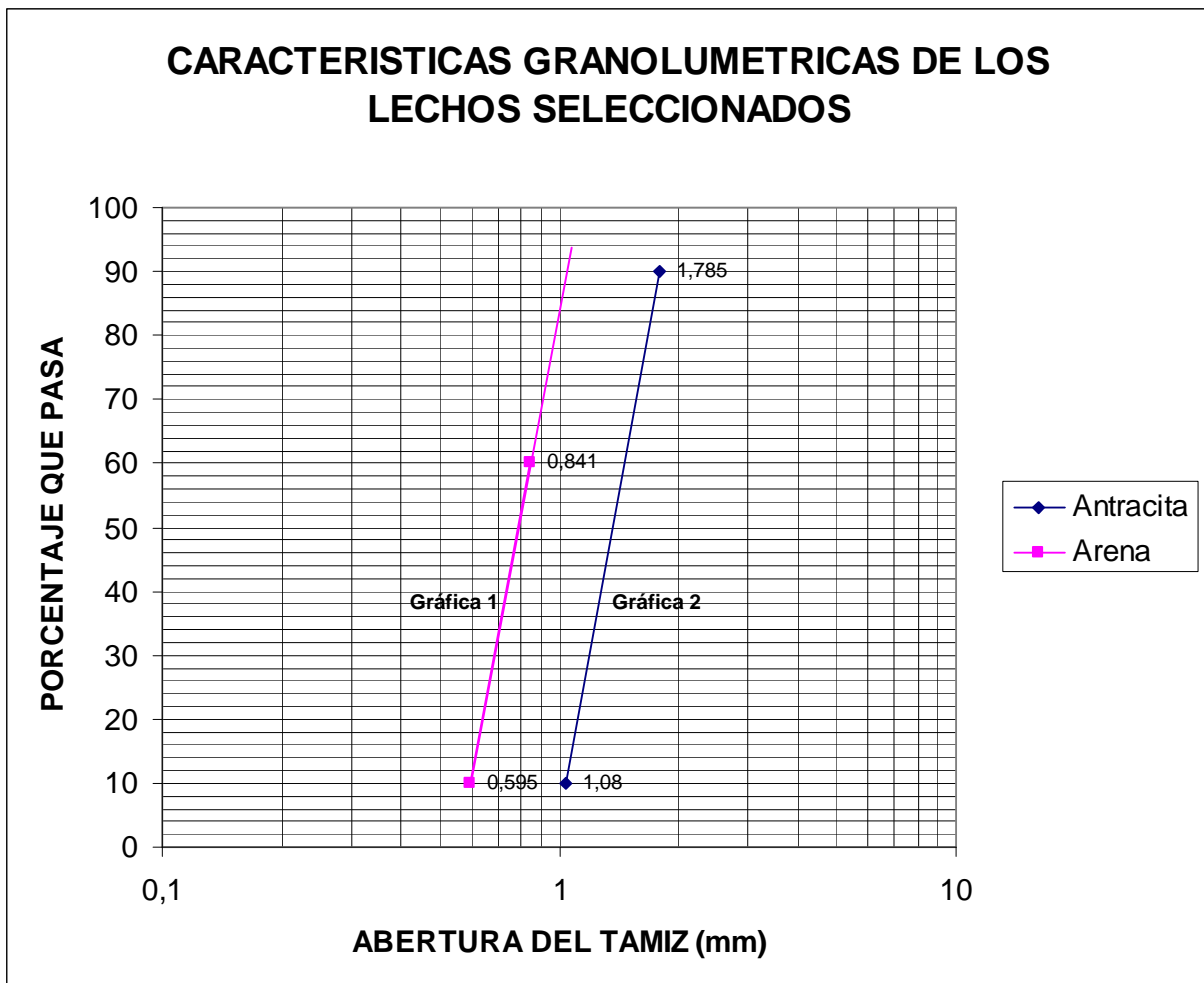


Figura 10.

El tamaño geométrico de la antracita se determina de la gráfica 2:

$$TE(\text{antracita}) = 1.08\text{mm} = d_{10}(\text{antracita})$$

Después de haber seleccionado los tamaños de los granulos que conformarán el filtro, se procede a la determinación de las cotas que se deben considerar para su construcción, las cuales son las resultantes de un análisis de las pérdidas de cabeza inicial en los lechos, así como las pérdidas obtenidas por los diferentes accesorios, y que son de utilidad en la identificación del nivel dinámico mínimo al cual opera el filtro; así como las cotas resultante de la expansión de los lechos, las cuales se pueden conocer mediante un análisis de la hidráulica de retro-lavado.

#### **4.2.2.1.2 Pérdida de carga en el medio filtrante**

**4.2.2.1.2.1 Pérdida de carga inicial:** Pérdida de carga en la válvula de bola en la entrada:

$$h_{VA} = \frac{K_1}{2g} * V^2 \quad [5.4]$$

Donde:

$h_{VA}$  = Pérdida de carga (m)

$v$  = velocidad por la válvula totalmente abierta (m/seg)

$g$  = Gravedad (m/seg<sup>2</sup>)

Aplicando la ecuación de continuidad:

$$v.a = q.A \quad [5.5]$$

Donde:

$a$  = área de la válvula (m<sup>2</sup>)

$q$  = tasa de filtración (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.día)

$A$  = área superficial de un filtro (m<sup>2</sup>)

Entonces:

$$v = q.A/a$$

Remplazando en la ecuación 5.4

$$h_{VA} = \frac{K_1}{2g} * \left(\frac{A}{a}\right)^2 q^2 \quad [5.6]$$

Como  $v$  esta expresada en (m/seg) y  $q$  esta expresada ( $m^3/m^2 \cdot \text{día}$ ), la anterior ecuación queda:

$$h_{VA} = \frac{K_1}{2g * 86400^2} * \left(\frac{A}{a}\right)^2 q^2 \quad [5.7]$$

Utilizando una válvula de cierre de  $\Phi \frac{1}{2}$ ":

$$a = \frac{\pi * D^2}{4} = \frac{\pi * 0.0127^2 m^2}{4} = 0.00013 m^2$$

$K_1 = 1.56$ , para válvula.

Ahora:

$$h_{VA} = \frac{1.56}{2 * 9.8 m / seg^2 * 86400^2} * \left(\frac{0.0017}{0.00013}\right)^2 * q^2$$

$$h_{VA} = 1.92 * 10^{-9} * q^2$$

Donde:

$h_{VA}$  = pérdida de carga (m)  
 $q$  = tasa de filtración ( $m^3/m^2 \cdot \text{día}$ )

**4.2.2.1.2.2 Pérdida de Carga en el Lecho:** Puede hallarse mediante la ecuación 4.8:

$$h_o = f * \frac{v}{g} * V * \frac{(1 - p_0)^2}{p_0^3} * \frac{36}{C_e^2} * L_0 \left( \sum_{i=1}^i \frac{X_i}{d_i^2} \right)$$

Donde:

$f$  = constante experimental y adimensional, igual a 5

$v$  = viscosidad cinemática ( $cm^2/seg^2$ )

$g$  = aceleración de la gravedad ( $cm/seg^2$ )

$L$  = profundidad del lecho (cm)

$P_0$  = porosidad inicial

$V$  = velocidad de filtración (cm/seg)

$X_i$  = Fracción en peso de material retenido entre dos tamices consecutivos, en un ensayo granulométrico.

$d_i$  = Diámetro promedio geométrico entre dos tamices.

### Pérdida de carga en la arena:

Tabla 6. diámetro promedio y porcentaje retenido para la arena

# tamiz	d <sub>1</sub> (cm)	d <sub>2</sub> (cm)	d <sub>i</sub> (cm)	d <sub>i</sub> <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )	X <sub>i</sub>	X <sub>i</sub> /d <sub>i</sub> <sup>2</sup>
40-30	0,042	0,059	0,050	0,002	0,2	80
30-20	0,059	0,084	0,070	0,005	0,36	73
20-16	0,084	0,119	0,100	0,010	0,34	34
16-12	0,119	0,168	0,141	0,020	0,1	5
					Σ=1	Σ=192

Porosidad de la arena = 0.40, reemplazando en la ecuación 4.8 se tiene:  
Coeficiente de esfericidad Ce asumido = 0.82.

$$h_{oa} = 5 * \frac{0.01206 \text{ cm}^2 / \text{seg}}{980 \text{ cm} / \text{seg}^2 * 86400} * \frac{(1-0.4)^2}{0.4^3} * \frac{36}{0.82^2} * 20 \text{ cm} * 192 \text{ cm}^{-2} * q$$

$$h_{oa} = 8.2 \times 10^{-4} * q$$

### Pérdida de carga en la Antracita:

Tabla 7. diámetro promedio y porcentaje retenido para la antracita

# tamiz	d <sub>1</sub> (cm)	d <sub>2</sub> (cm)	d <sub>i</sub> (cm)	d <sub>i</sub> <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )	X <sub>i</sub>	X <sub>i</sub> /d <sub>i</sub> <sup>2</sup>
30-20	0,059	0,084	0,070	0,005	0,22	44
20-16	0,084	0,119	0,100	0,010	0,34	34
16-12	0,119	0,168	0,141	0,020	0,34	17
12-10	0,168	0,2	0,183	0,034	0,1	3
					Σ=1	Σ=98

Porosidad de la antracita = 0.40, reemplazando en la ecuación 4.8 se tiene:  
Coeficiente de esfericidad Ce asumido = 0.73.

$$h_{oA} = 5 * \frac{0.01206 \text{ cm}^2 / \text{seg}}{980 \text{ cm} / \text{seg}^2 * 86400} * \frac{(1-0.4)^2}{0.4^3} * \frac{36}{0.73^2} * 40 \text{ cm} * 98 \text{ cm}^{-2} * q$$

$$h_{oA} = 1.06 \times 10^{-3} * q$$

Pérdida de carga total en el lecho. La pérdida de carga inicial en lecho es la suma de la que se produce en la arena y en la antracita.

$$h_0 = 1.88 \times 10^{-3} * q$$



**Pérdida en la grava de soporte:**

$$h_G = \frac{L}{3 * 1440} * q \quad [5.8]$$

Donde:

L = espesor de la grava

$$h_G = \frac{0.02m}{3 * 1440} * q$$

$$h_G = 4.63x10^{-6} * q$$

**Pérdida de carga en el falso fondo:**

$$h_D = \frac{K_1}{2g * 86400^2} \left( \frac{A}{a} \right)^2 * q^2 \quad [5.9]$$

Donde:

a = área total hueca del soporte

A = área transversal del filtro

$$h_D = \frac{1.56}{2 * 9.8m / seg^2 * 86400^2} \left( \frac{0.0017}{0.001} \right)^2 * q^2$$

$$h_D = 3.08x10^{-11} * q^2$$

**Pérdida de carga en el vertedero:** Esta pérdida es equivalente a la altura de la lámina de agua sobre la cresta. Dado que la salida del filtro es un tubo de ½", el ancho de la cresta equivale se ha considerado como el diámetro de salida.

$$h_{VE} = \left( \frac{A}{1.838 * L * 86400} \right)^{0.6667} * q^{0.6667} \quad [5.10]$$

Donde:

A = área transversal del filtro

L = diámetro de salida (ancho de la cresta adoptado)

$$h_{VE} = \left( \frac{0.0017}{1.838 * 0.0127 * 86400} \right)^{0.6667} * q^{0.6667}$$

$$h_{VE} = 8.92 \times 10^{-5} * q^{0.6667}$$

**Pérdida de carga total durante la filtración:**

$$H = h_{VA} + h_0 + h_G + h_D + h_{VE} \quad [5.11]$$

Remplazando;

$$H = 1.92 \times 10^{-9} * q^2 + 1.88 \times 10^{-3} * q + 4.63 \times 10^{-6} * q + 3.08 \times 10^{-11} * q^2 + 8.92 \times 10^{-5} * q^{0.6667}$$

Donde:

q = tasa media de filtración = 288 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>dia.

Entonces.

$$H = 1.92 \times 10^{-9} * 288^2 + 1.88 \times 10^{-3} * 288 + 4.63 \times 10^{-6} * 288 + 3.08 \times 10^{-11} * 288^2 + 8.92 \times 10^{-5} * 288^{0.6667}$$

$$H = 0.54m$$

Nivel mínimo de operación del filtro = 54 cm

**4.2.2.1.3 Pérdida De Carga Durante El Retro-Lavado:** En referencia a este aspecto, es necesario conocer el momento en que se debe realizar el proceso del retro-lavado al filtro, de acuerdo a alguno de las razones anteriormente mencionadas en el numeral 4.8.1.5. (pérdida de carga por colmatación, en este caso); así como las variables que intervienen en la determinación de un caudal óptimo de lavado, tales como la expansión de los lechos y las pérdidas de cabeza generadas por los accesorios y las alturas de los mismos lechos. Para efectos de esta investigación, se determinará el momento del retro-lavado (final de la carrera de filtración) mediante la observación de la elevación del nivel del afluente sobre el nivel dinámico mínimo de operación del filtro, hasta el instante en que el efluente deje de salir del filtro. A continuación

Se determina la velocidad de fluidificación total.

**4.2.2.1.3.1 Velocidad De Fluidificación Total:** Según la ecuación 4.10 se calcula el Número de Galileo,  $G_a$ :

$$G_a = \frac{g(S_s - 1) \cdot d_{90}^3}{\nu^2}, \text{ donde}$$

$g$  = gravedad ( $\text{cm/s}^2$ )  
 $S_s$  = peso específico  
 $d_{90}$  = Diámetro de tamiz  
 $\nu$  = Viscosidad cinemática

Para la Arena:

$$G_a = \frac{980 \text{ cm/seg}^2 * (2.65 - 1) * 0.108^3 \text{ cm}^3}{0.01206^2 \text{ cm}^4 / \text{seg}^2}$$

$$G_a = 14005.11 \approx 14005$$

Para la Antracita:

$$G_a = \frac{980 \text{ cm/seg}^2 * (1.40 - 1) * 0.1785^3 \text{ cm}^3}{0.01206^2 \text{ cm}^4 / \text{seg}^2}$$

$$G_a = 15328.73 \approx 15328$$

Conocido el número de Galileo de los materiales, se calcula la velocidad de fluidificación total de acuerdo a la ecuación 4.14:

$$V_a = \frac{1.3\nu}{d_{90}} \left[ (33.7^2 + 0.0408G_a)^{0.5} - 33.7 \right]$$

Para la Arena:

$$V_a = \frac{1.3 * 0.01206 \text{ cm}^2 / \text{seg}}{0.108 \text{ cm}} \left[ (33.7^2 + 0.0408 * 14005)^{0.5} - 33.7 \right]$$

$$V_a = 1.106 \text{ cm/seg} = 0.66 \text{ m/min}$$

Para la Antracita:

$$V_a = \frac{1.3 * 0.01206 \text{ cm}^2 / \text{seg}}{0.1785 \text{ cm}} \left[ (33.7^2 + 0.0408 * 15328)^{0.5} - 33.7 \right]$$

$$V_a = 0.726 \text{ cm} / \text{seg} = 0.44 \text{ m} / \text{min}$$

La condición crítica es entonces para el lecho de arena, por consiguiente:

$$V_a = 0.66 \text{ m} / \text{min}. \text{ Se utiliza entonces } V_a = 0.65 \text{ m} / \text{min}$$

**4.2.2.1.3.2 Expansión De Lechos:** Para el análisis de la expansión en los lechos se tendrá en cuenta las siguientes constantes consideradas en la tabla 8.

**Tabla 8. Constantes experimentales para  $\alpha, m, \beta, \theta$**

Material	$\alpha$	m	$\beta$	$\theta$
Arena	0,5321	0,5554	0,1254	0,1947
Antracita	0,2723	0,6133	0,1813	0,1015

**Expansión en la arena:**

Según la ecuación 4.17:

$$Re = \alpha * G_a^m$$

$$Re = 0.5321 * 14005^{0.5554}$$

$$Re = 106.87$$

De acuerdo a la ecuación 4.16, se tiene:

$$v_s = \frac{v * Re}{d_{90}(\text{Arena})}$$

$$v_s = \frac{0.01206 \text{ cm}^2 / \text{seg} * 106.87}{0.108 \text{ cm}}$$

$$v_s = 11.93 \text{ cm} / \text{seg}$$

Luego,

$$\beta * Re^\theta$$

$$\beta * Re^\theta = 0.1254 * 106.87^{0.1947} = 0.31$$

Entonces, en la ecuación 4.18:

$$Pe = \left( \frac{v_a}{v_s} \right)^{\beta * Re^\theta}$$

$$Pe = \left( \frac{1.11 \text{ cm / seg}}{11.93 \text{ cm / seg}} \right)^{0.31}$$

$$Pe = 0.48$$

Conocido el valor de Pe se calcula la expansión según la ecuación 4.21:

$$\xi_c = \frac{Pe - Po}{1 - Pe}$$

$$\xi_c = \frac{0.48 - 0.4}{1 - 0.48} = 0.15$$

Se calcula la longitud expandida parcial de cada capa, usando la ecuación 4.22:

$$\Delta L_c = \xi_c * x * X_a$$

$$\Delta L_c = 0.15 * 0.1 * 0.2 \text{ m}$$

$$\Delta L_c = 0.003 \text{ m}$$

### Expansión en la Antracita:

$$Re = \alpha * G_a^m$$

$$Re = 0.2723 * 15328^{0.6133}$$

$$Re = 100.47$$

$$v_s = \frac{v * Re}{d_{90}(\text{Antracita})}$$

$$v_s = \frac{0.01206 \text{ cm}^2 / \text{seg} * 100.47}{0.1785 \text{ cm}}$$

$$v_s = 6.79 \text{ cm / seg}$$

$$\beta * Re^\theta$$

$$\beta * Re^\theta = 0.1813 * 100.47^{0.1015} = 0.29$$

$$Pe = \left( \frac{v_a}{v_s} \right)^{\beta * Re^\theta}$$

$$Pe = \left( \frac{0.73 \text{ cm / seg}}{6.79 \text{ cm / seg}} \right)^{0.29}$$

$$Pe = 0.52$$

$$\xi_c = \frac{Pe - Po}{1 - Pe}$$

$$\xi_c = \frac{0.52 - 0.4}{1 - 0.52} = 0.26$$

$$\Delta L_c = \xi_c * x * X_A$$

$$\Delta L_c = 0.26 * 0.1 * 0.4 \text{ m}$$

$$\Delta L_c = 0.005 \text{ m}$$

La expansión total del lecho filtrante, según la ecuación 4.23 es:

$$\xi = \frac{\xi_a * X_a + \xi_A * X_A}{X_a + X_A}$$

$$\xi = \frac{0.15 * 0.2 \text{ m} + 0.26 * 0.4 \text{ m}}{0.2 \text{ m} + 0.4 \text{ m}} = 0.22 \text{ m}$$

#### 4.2.2.1.3.3 Cálculo De Pérdidas De Carga:

De acuerdo a la ecuación 4.29, se tiene:

Para la arena:

$$h_L = (S_s - 1) * (1 - Po) * X_a$$

$$h_L = (2.65 - 1) * (1 - 0.4) * 0.2 \text{ m}$$

$$h_L = 0.198 \text{ m} \approx 0.20 \text{ m}$$

Para la antracita:

$$h_L = (S_s - 1) * (1 - P_o) * X_a$$
$$h_L = (1.4 - 1) * (1 - 0.4) * 0.4m$$
$$h_L = 0.096m \approx 0.10m$$

Pérdida total en el lecho = 0.2 + 0.1 = 0.3m

Pérdida en la grava:

$$h_{LG} = \frac{v_a * X_g}{3} \quad [4.12]$$
$$h_{LG} = \frac{0.65 * 0.02}{3} = 0.004m$$

**4.2.2.1.3.4 Caudal de lavado:** se calcula mediante la ecuación 4.30:

$$Q_L = V_a * A$$

Donde:

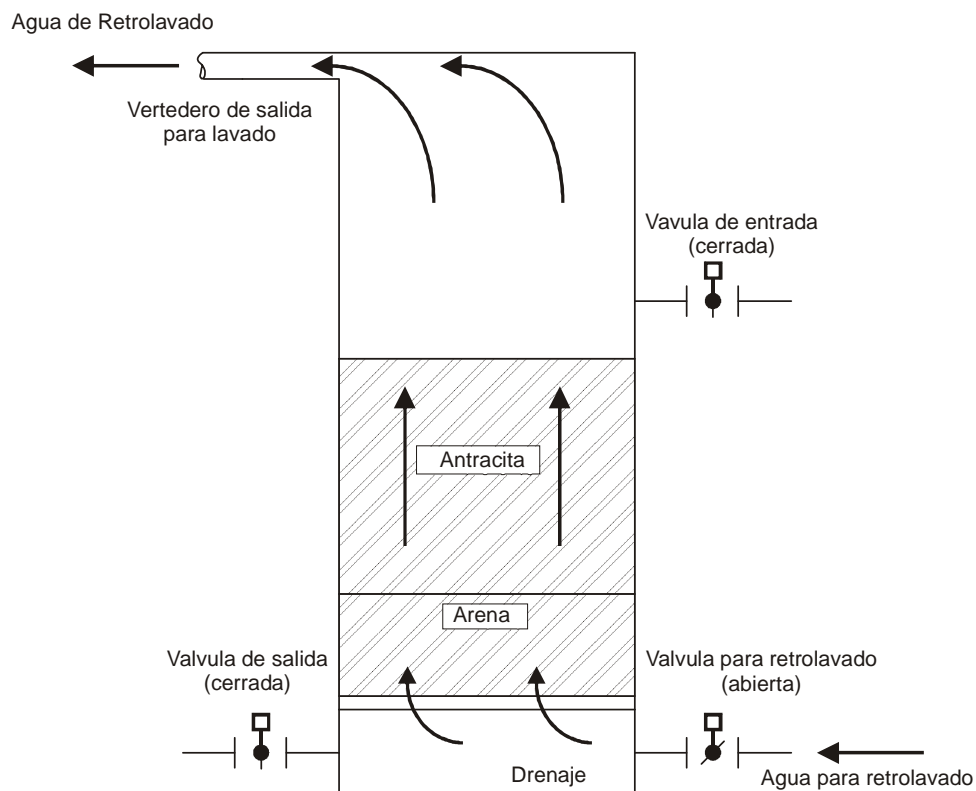
$V_a$  = velocidad ascensional o de fluidificación

$A$  = área superficial del filtro

$$Q_L = 0.65m / \text{min} * 0.0017m^2$$
$$Q_L = 0.0011m^3 / \text{min} = 0.018Lt / \text{seg}$$

Este caudal de lavado se obtuvo en campo, por aforamiento.

**Figura 11. Esquema de dirección de flujos en el filtro durante el retrolavado**



Fuente. Esta investigación

**4.2.2.1.4 Localización y Replanteo:** Una vez determinadas e identificadas las diferentes variables, así como las alturas del medio filtrante a analizar, se procedió a su posterior localización e implantación dentro del CEPA, tomando para ello, una cota de terreno relativa, tal como se muestra en los gráficos anexos, a partir de la cual se establecieron las cotas de los diferentes lechos y de los puntos de entrada y salida del lixiviado en el filtro.

**4.2.2.1.4.1 Construcción Del Filtro:** Una vez determinado la cota de entrada de afluente al filtro, se vió la necesidad de hacer una excavación, la cual se formaleteó y posteriormente se fundió en concreto simple de 10cm de espesor, para facilitar la construcción, implantación, inspección y limpieza. Para la construcción del filtro se utilizó tubería pvc de ½ pulgada, válvulas de cierre, manguera transparente de poliuretano de 1½ pulgadas, accesorios de pvc de ½ pulgada, tales como: tee's, codos, uniones, adaptadores o reductores.





Caja en concreto para el filtro



Cajilla en concreto para toma de muestras

El lixiviado que alimenta al filtro se obtiene de la salida del tanque de sedimentación de uno de los sistemas del CEPA, conectando esta tubería a la de entrada al filtro mediante tubo pvc de ½ pulgada; en medio de esta tubería se instaló una tee para conectar una llave y una derivación (BY PASS) hacia la caja de recolección del CEPA.



Instalación de tubería

Tubería entrada al filtro

BY PASS

Llave de cierre

Caja del filtro

Caja de recolección



El cuerpo del filtro (manguera de poliuretano de 1 ½ pulgadas), se armó tomando como base una tee de pvc, a la cual se conectaron mediante reductores dos llaves de cierre de 1/2 pulgada las cuales sirven para la salida del lixiviado y lavado del filtro, y se accionan de diferente manera según el caso. Para la entrada del lixiviado al filtro se conecta la tubería proveniente del sedimentador, instalando una llave de cierre justo antes de llegar a la manguera de poliuretano. En la parte superior del filtro se adapta una tee PDF-UAD, la cual trabaja como vertedero de rebose, conectando a ésta, un tubo que evacua los excesos hacia la cajilla de toma de muestras.

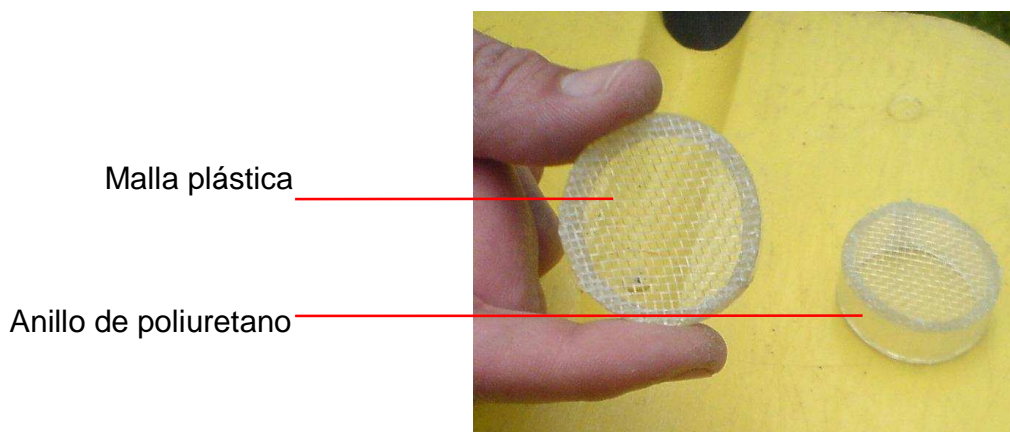


Llaves de cierre para salida (izq.), y lavado (der.)



Llave de cierre para entrada al filtro

Para soportar los lechos, dentro del filtro se adaptó en el fondo un anillo poliuretano que sostiene una malla plástica cuya abertura es de 1mm<sup>2</sup>, sobre el cual se depositara 2 cm de gravilla; la función del soporte y la gravilla es retener los lechos en su lugar y evitar la pérdida del material granular.



Malla plástica

Anillo de poliuretano



Entrada al filtro

Salida del filtro

Llave de entrada para retro- lavado

**4.2.2.1.5 Pérdida Por Colmatación:** Una vez instalado el filtro se procedió a evaluar su tiempo de operación en condiciones normales. Se inició una etapa de observación, dejando fluir el lixiviado a través del filtro, durante el cual se observó que el nivel de afluente que se mantuvo constante durante los primeros días de filtración fue menor que el nivel mínimo de operación calculado, razón por la cual se adoptó este nivel como nivel mínimo de operación; el nivel dinámico mínimo calculado es 54cm sobre la salida del efluente, pero el nivel de afluente en el filtro se mantuvo a 35cm sobre la salida durante los primeros 5 días; esto pudo haberse debido a que el caudal de operación del CEPA es considerablemente bajo. Cabe anotar que el nivel dinámico mínimo calculado se encontró dentro del rango entre el nivel mínimo y el nivel de colmatación observados.

La determinación del nivel de colmatación del filtro, y por lo tanto el tiempo después del cual se debe lavar, se realizó inspeccionando la altura del nivel de la afluente sobre el nivel mínimo de operación del filtro.

**Metodología:** Se realizó la lectura del nivel del afluente, diariamente durante 3 semanas, y en lecturas tomadas 3 veces al día, de la siguiente manera:

Lectura 1 = 8:00 AM

Lectura 2 = 12:00 PM

Lectura 3 = 5:30PM

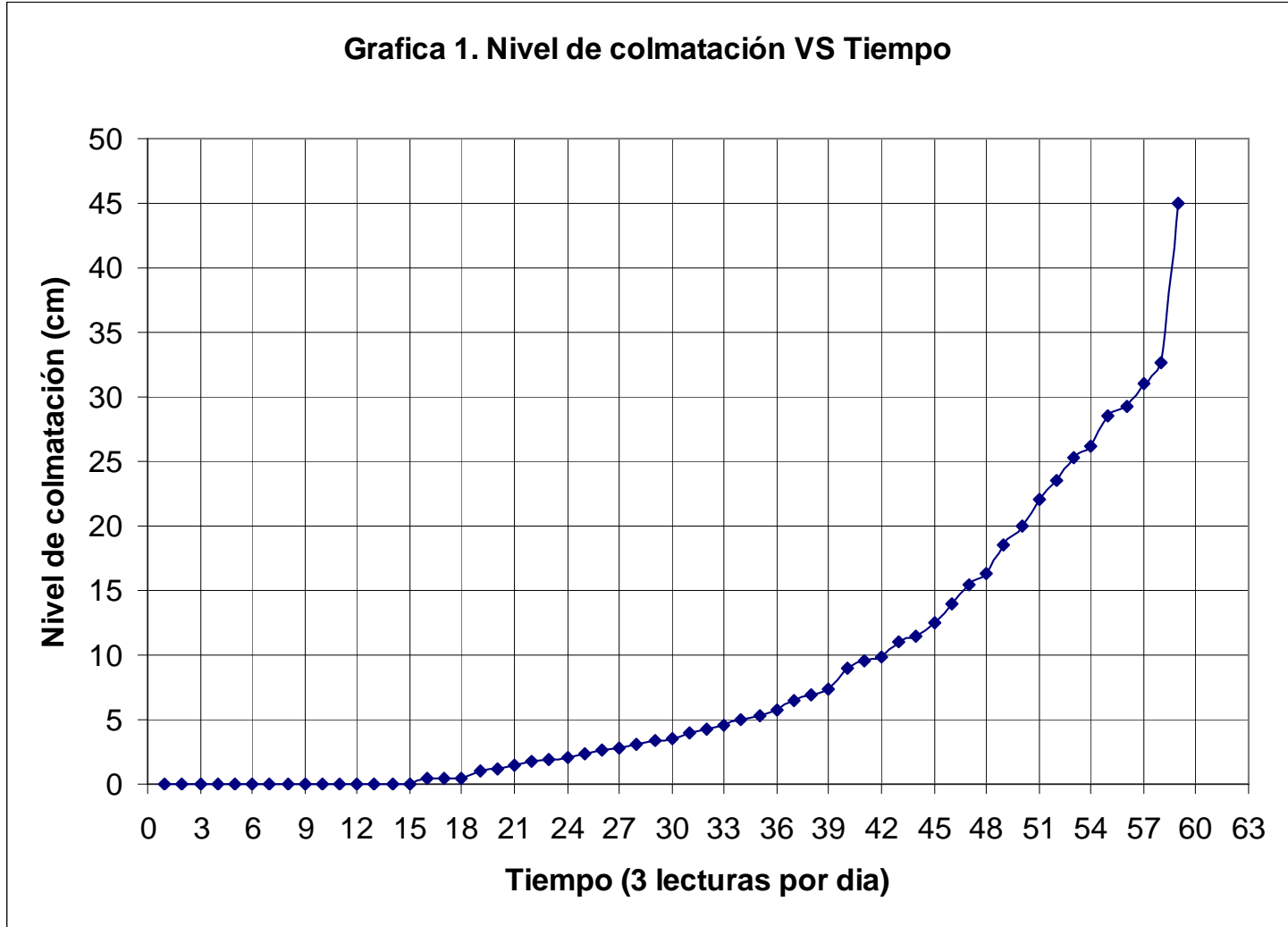
De acuerdo a estos datos y a las inspecciones visuales, se puede concluir que el momento de colmatación del filtro se presentó a entre la segunda y tercera lectura del vigésimo día de observación. Durante este lapso, el registro obtenido de las lecturas determinó un punto en el cual el efluente dejó de salir por el vertedero de salida, y el nivel del afluente continuó elevándose; es entonces en este punto donde se determina el nivel de colmatación del filtro, correspondiendo a una altura de 0.32m sobre el nivel mínimo de operación; las lecturas se muestran en la tabla 9.

**Tabla 9. LECTURAS DE NIVEL DE COLMATACIÓN  
FILTRO ARENA-ANTRACITA**

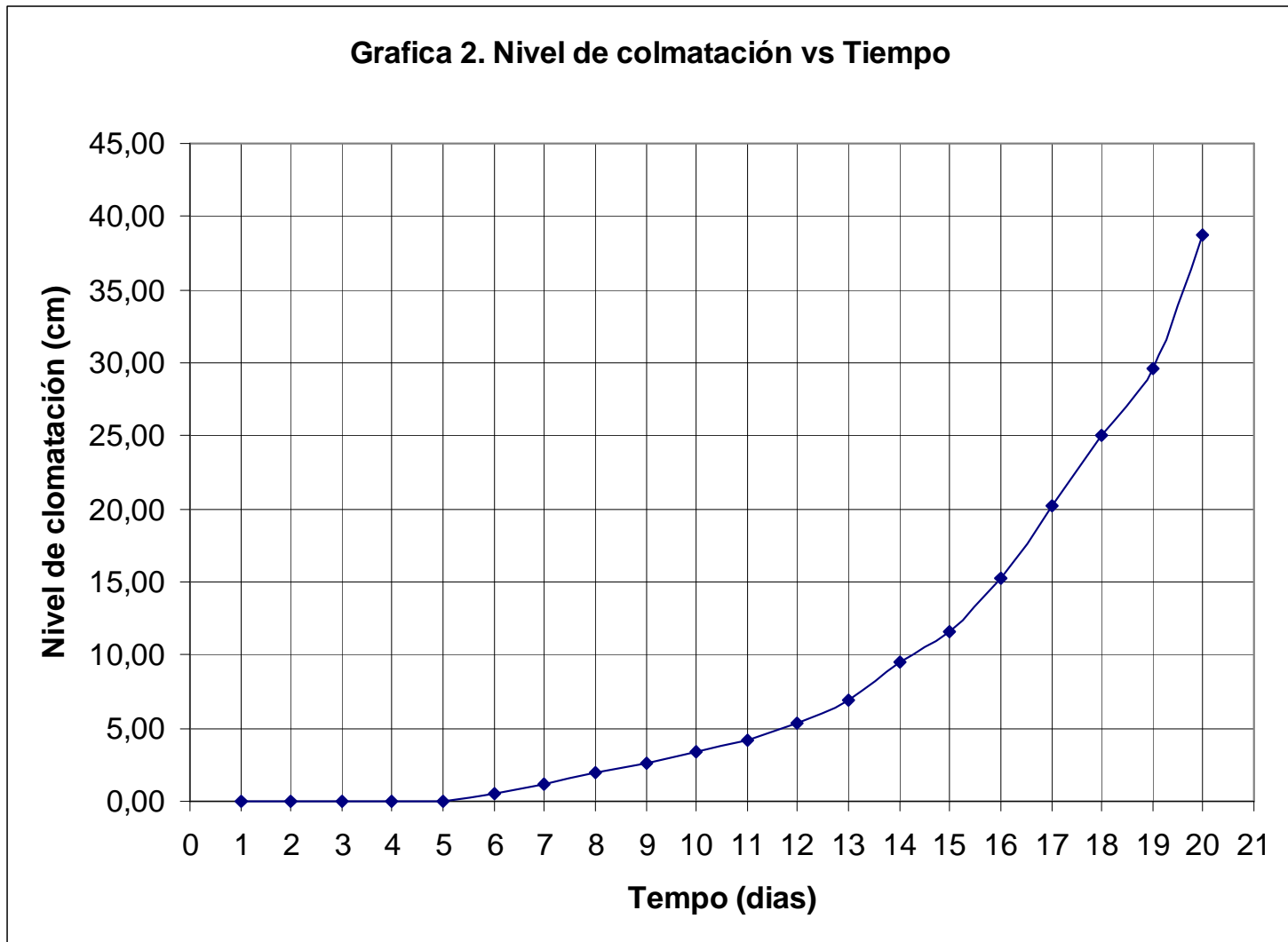
<b>Día</b>	<b>lecturas x día</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>Día</b>	<b>lecturas x día</b>	<b>Altura (cm)</b>
	1	0		31	4
1	2	0	11	32	4,2
	3	0		33	4,5
	4	0		34	5
2	5	0	12	35	5,3
	6	0		36	5,7
	7	0		37	6,4
3	8	0	13	38	6,9
	9	0		39	7,4
	10	0		40	9
4	11	0	14	41	9,5
	12	0		42	9,9
	13	0		43	11
5	14	0	15	44	11,5
	15	0		45	12,5
	16	0,5		46	14
6	17	0,5	16	47	15,5
	18	0,5		48	16,3
	19	1		49	18,5
7	20	1,2	17	50	20
	21	1,5		51	22
	22	1,8		52	23,6
8	23	1,9	18	53	25,3
	24	2		54	26,2
	25	2,3		55	28,5
9	26	2,6	19	56	29,3
	27	2,8		57	31
	28	3,1		58	32,6
10	29	3,4	20	59	45
	30	3,5		60	

Fuente. Esta investigación.

Fuente. Esta investigación.



Fuente. Esta investigación.





**4.2.2.1.5.1 Puesta En Marcha y Tiempo De Operación:** El tiempo de operación del filtro se registró hasta el punto en el cual el lixiviado dejó de salir por el tubo determinado para la evacuación del efluente. De ahí se estimó el periodo de eficiencia en la filtración (el cual se mencionó anteriormente en el numeral 4.2.2.1.5) y el nivel máximo de colmatación. Con base en este nivel, se ubicó el vertedero de rebose a la altura igual al nivel de colmatación (ver figura 10); el primer retro-lavado se realizó a los 20 días de operación.



Filtro con Arena y Antracita



Filtro cubierto con plástico opaco

Debido a que el cuerpo del filtro es transparente, la luz solar lo atraviesa hasta llegar al lecho filtrante, razón por la cual se cubrió el filtro con plástico negro, para evitar esta situación y el consecuente crecimiento biológico (algas) en el lecho filtrante.

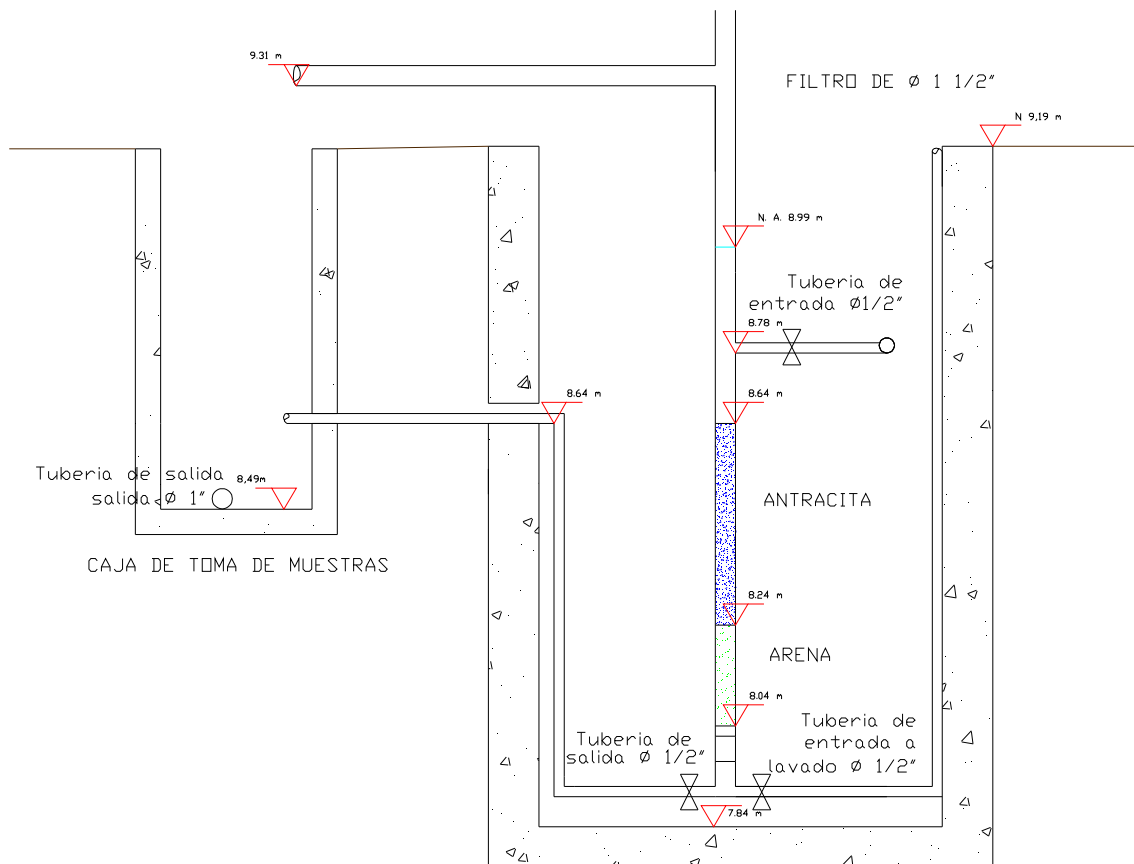


Figura 12. Detalle de los niveles del filtro de Antracita y Arena.

**4.2.2.1.5.2 Proceso De Lavado:** Para realizar el retro-lavado se siguió el siguiente procedimiento:

1. Cierre de la llave de entrada al filtro y apertura de la llave del BY PASS.
2. Apertura de la llave de lavado para evacuar lixiviado de la tubería de salida y del filtro.
3. Cierre de la llave de salida y conexión de manguera en la llave de lavado.
4. Retro-lavado del filtro.



**4.2.2.2 Filtro de Arena:** Dentro de esta etapa investigativa se tomó la determinación de evaluar el desempeño de un filtro de arena, con la particularidad de que el lecho filtrante estará conformado por arena, cuyas características granulométricas serán semejantes a las consideradas en la arena utilizada en el filtro dual de Antracita y Arena.

El cuerpo del filtro es el mismo que se utilizó con los lechos de arena y antracita y únicamente se cambia el lecho filtrante; por lo tanto, para este filtro se conservarán las características hidráulicas tales como:

- Caudal del afluente
- Área transversal del filtro
- Altura total del lecho filtrante = 60cm

Igualmente, se analizó las pérdidas de carga esperadas durante el proceso de filtración, tales como la pérdida de carga inicial, las pérdidas en el lecho, y las pérdidas que se presentarán durante el retro-lavado.

**4.2.2.2.1 Cálculo de la pérdida de carga:** Tal como se planteo en el numeral 3, las perdidas de carga a considerar son:

- Una pérdida de carga inicial, que es la mínima que puede producir el filtro y que llamaremos  $h_o$ .
- Una pérdida de carga por colmatación, que será función del tiempo  $h\phi(t)$ . Esto es:

$$h_f = h_o + h\phi(t)$$

**4.2.2.2.1.1 Pérdida de carga inicial:** La pérdida de carga en la válvula de entrada será la misma calculada para el filtro de arena y antracita, puesto que se ha conservado la estructura anterior.

Con base en la ecuación 4.7:

$$h_{VA} = \frac{K_1}{2g * 86400^2} * \left(\frac{A}{a}\right)^2 q^2$$

Utilizando una válvula de cierre de  $\Phi \frac{1}{2}$ ":

$$a = \frac{\pi * D^2}{4} = \frac{\pi * 0.0127^2 m^2}{4} = 0.00013 m^2$$

$K_1 = 1.56$ , para válvula.

Ahora:

$$h_{VA} = \frac{1.56}{2 * 9.8 m / seg^2 * 86400^2} * \left( \frac{0.0017}{0.00013} \right)^2 * q^2$$

$$h_{VA} = 1.92 * 10^{-9} * q^2$$

Donde:

$h_{VA}$  = pérdida de carga (m)  
 $q$  = tasa de filtración ( $m^3/m^2 \cdot día$ )

**Pérdida de carga en el lecho:** Se hallará mediante la ecuación 4.8:

$$h_o = f * \frac{v}{g} * V * \frac{(1 - p_0)^2}{p_0^3} * \frac{36}{C_e^2} * L_0 * \left( \sum_{i=1}^i \frac{X_i}{d_i^2} \right)$$

Donde:

$f$  = constante experimental y adimensional, igual a 5

$v$  = viscosidad cinemática

$g$  = aceleración de la gravedad

$L$  = profundidad del lecho

$P_0$  = porosidad inicial

$V$  = velocidad de filtración

$X_i$  = Fracción en peso de material retenido entre dos tamices consecutivos, en un ensayo granulométrico.

$d_i$  = Diámetro promedio geométrico entre dos tamices.

Tomando los valores de la tabla 6, y una porosidad para la arena = 0.40, remplazando en la ecuación 4.8, se tiene:

$$h_{oa} = 5 * \frac{0.01206 cm^2 / seg}{980 cm / seg^2 * 86400} * \frac{(1 - 0.4)^2}{0.4^3} * \frac{36}{0.82^2} * 60 cm * 192 cm^{-2} * q$$

$$h_{oa} = 2.46 * 10^{-3} * q$$

**Pérdida en la grava de soporte:**

$$h_G = \frac{L}{3 * 1440} * q$$

Donde:

L = espesor de la grava

$$h_G = \frac{0.02m}{3 * 1440} * q$$

$$h_G = 4.63 * 10^{-6} * q$$

**Pérdida de carga en el falso fondo:**

$$h_D = \frac{K_1}{2g * 86400^2} \left( \frac{A}{a} \right)^2 * q^2$$

Donde:

a = área total hueca del soporte

A = área transversal del filtro

$$h_D = \frac{1.56}{2 * 9.8m / seg^2 * 86400^2} \left( \frac{0.0017}{0.001} \right)^2 * q^2$$

$$h_D = 3.08 * 10^{-11} * q^2$$

**Pérdida de carga en el vertedero:** Esta pérdida es equivalente a la altura de la lámina de agua sobre la cresta. Dado que la salida del filtro es un tubo de ½", el ancho de la cresta equivale se ha considerado como el diámetro de salida.

$$h_{VE} = \left( \frac{A}{1.838 * L * 86400} \right)^{0.6667} * q^{0.6667}$$

Donde:

A = área transversal del filtro

L = diámetro de salida (ancho de la cresta adoptado)

$$h_{VE} = \left( \frac{0.0017}{1.838 * 0.0127 * 86400} \right)^{0.6667} * q^{0.6667}$$

$$h_{VE} = 8.92 \times 10^{-5} * q^{0.6667}$$

### **Pérdida de carga total durante la filtración:**

$$H = h_{VA} + h_{0a} + h_G + h_D + h_{VE}$$

Remplazando;

$$H = 1.92 \times 10^{-9} * q^2 + 2.46 \times 10^{-3} * q + 4.63 \times 10^{-6} * q + 3.08 \times 10^{-11} * q^2 + 8.92 \times 10^{-5} * q^{0.6667}$$

Donde:

q = tasa media de filtración = 288 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>dia.

Entonces.

$$H = 1.92 \times 10^{-9} * 288^2 + 2.46 \times 10^{-3} * 288 + 4.63 \times 10^{-6} * 288 + 3.08 \times 10^{-11} * 288^2 + 8.92 \times 10^{-5} * 288^{0.6667}$$

$$H = 0.71m$$

Nivel mínimo de operación del filtro = 71 cm

**4.2.2.2.2 Pérdida de carga durante el retro-lavado:** Se analiza las pérdidas generadas en el filtro cuando éste sea sometido al proceso de retro-lavado, debido a la altura del lecho filtrante, a la expansión del mismo, y a los accesorios.

#### **4.2.2.2.2.1 Velocidad de fluidificación total:**

**Número de Galileo, Ga:**

$$G_a = \frac{g(S_s - 1).d_{90}^3}{\nu^2}, \text{ donde:}$$

g = gravedad (cm/s<sup>2</sup>)

S<sub>s</sub> = peso específico

d<sub>90</sub> = Diámetro de tamiz

ν = Viscosidad cinemática

$$G_a = \frac{980 \text{ cm} / \text{seg}^2 * (2.65 - 1) * 0.108^3 \text{ cm}^3}{0.01206^2 \text{ cm}^4 / \text{seg}^2}$$

$$G_a = 14005.11 \approx 14005$$

#### Velocidad de fluidificación total:

$$V_a = \frac{1.3v}{d_{90}} \left[ (33.7^2 + 0.0408G_a)^{0.5} - 33.7 \right]$$

$$V_a = \frac{1.3 * 0.01206 \text{ cm}^2 / \text{seg}}{0.108 \text{ cm}} \left[ (33.7^2 + 0.0408 * 14005)^{0.5} - 33.7 \right]$$

$$V_a = 1.106 \text{ cm} / \text{seg} = 0.66 \text{ m} / \text{min}$$

**4.2.2.2.2 Expansión del lecho:** De acuerdo a los valores de las constantes de la tabla 4.

$$Re = \alpha * G_a^m$$

$$Re = 0.5321 * 14005^{0.5554}$$

$$Re = 106.87$$

$$v_s = \frac{v * Re}{d_{90}(\text{Arena})}$$

$$v_s = \frac{0.01206 \text{ cm}^2 / \text{seg} * 106.87}{0.108 \text{ cm}}$$

$$v_s = 11.93 \text{ cm} / \text{seg}$$

$$\beta * Re^\theta$$

$$\beta * Re^\theta = 0.1254 * 106.87^{0.1947} = 0.31$$

$$Pe = \left( \frac{v_a}{v_s} \right)^{\beta * Re^\theta}$$

$$Pe = \left( \frac{1.11 \text{ cm} / \text{seg}}{11.93 \text{ cm} / \text{seg}} \right)^{0.31}$$

$$Pe = 0.48$$

$$\xi_c = \frac{Pe - Po}{1 - Pe}$$

$$\xi_c = \frac{0.48 - 0.4}{1 - 0.48} = 0.15$$

Expansión en el lecho de arena = 0.15m

#### **4.2.2.2.3 Cálculo de pérdidas de carga:**

**Para la arena:**

$$h_L = (S_s - 1) * (1 - P_o) * X_a$$

$$h_L = (2.65 - 1) * (1 - 0.4) * 0.6m$$

$$h_L = 0.594m \approx 0.6m$$

Pérdida en el lecho = 0.6m

**Pérdida en la grava:**

$$h_{LG} = \frac{v_a * X_g}{3}$$

$$h_{LG} = \frac{0.65 * 0.02}{3} = 0.004m$$

#### **4.2.2.2.4 Caudal de lavado:**

$$Q_L = V_a * A$$

Donde:

$V_a$  = velocidad ascensional o de fluidificación

$A$  = área superficial del filtro

$$Q_L = 0.65m / \text{min} * 0.0017m^2$$

$$Q_L = 0.0011m^3 / \text{min} = 0.018Lt / \text{seg}$$

Este caudal de lavado se obtuvo en campo, por aforamientos.

**4.2.2.2.3 Pérdida por colmatación:** Para la determinación del nivel de colmatación del filtro, se utilizó la metodología adoptada para con el filtro anterior (arena y antracita), tomando 3 lecturas diarias hasta el día en que se observó que la altura del afluente se incrementó considerablemente y el efluente dejó de salir casi en su totalidad por el vertedero de salida. De igual manera, se observó que la particularidad del filtro anterior correspondiente a la diferencia entre el nivel mínimo observado y el calculado se presentó en este filtro, siendo 71cm el nivel dinámico mínimo calculado y 50cm el nivel observado durante los primeros días de observación.

El momento de colmatación de este filtro (incremento considerable del nivel de afluente) se presentó durante el duodécimo día de observación.

El nivel máximo de afluente que se alcanzó dentro del filtro antes de llegar al punto de colmatación fue de 18cm por encima del nivel mínimo de operación. Tal como se observa en las lecturas registradas en la tabla 10. y las gráficas 3 y 4.

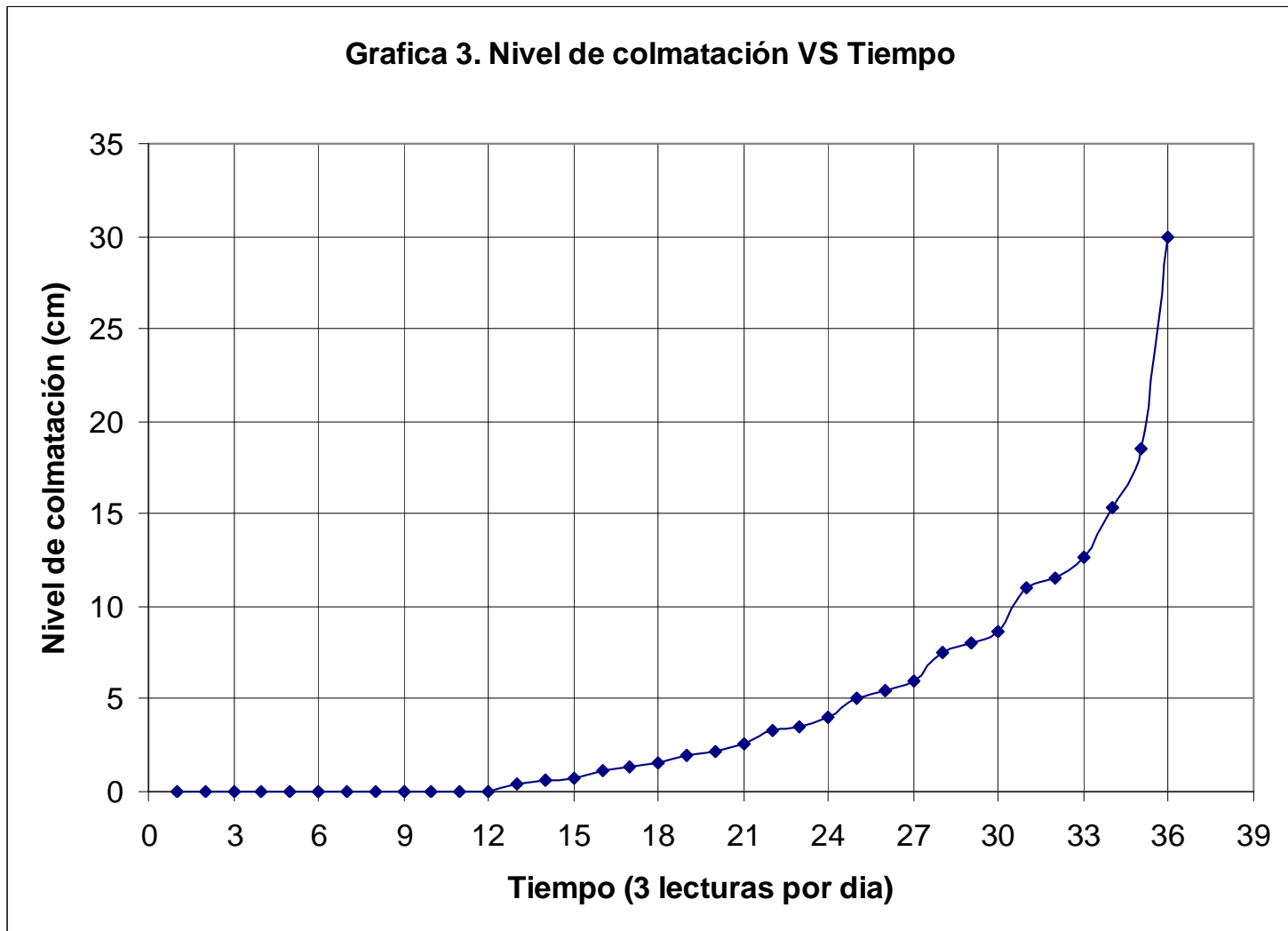
**Tabla 10. LECTURAS DE NIVEL DE COLMATACIÓN  
FILTRO DE ARENA**

<b>Día</b>	<b>lecturas x día</b>	<b>Altura (cm)</b>
	1	0
1	2	0
	3	0
	4	0
2	5	0
	6	0
	7	0
3	8	0
	9	0
	10	0
4	11	0
	12	0
	13	0,4
5	14	0,6
	15	0,7
	16	1,1
6	17	1,3
	18	1,5
	19	2
7	20	2,2
	21	2,6
	22	3,3
8	23	3,5
	24	4
	25	5
9	26	5,5
	27	6
	28	7,5
10	29	8
	30	8,6
	31	11
11	32	11,5
	33	12,7
	34	15,3
12	35	18,5
	36	30

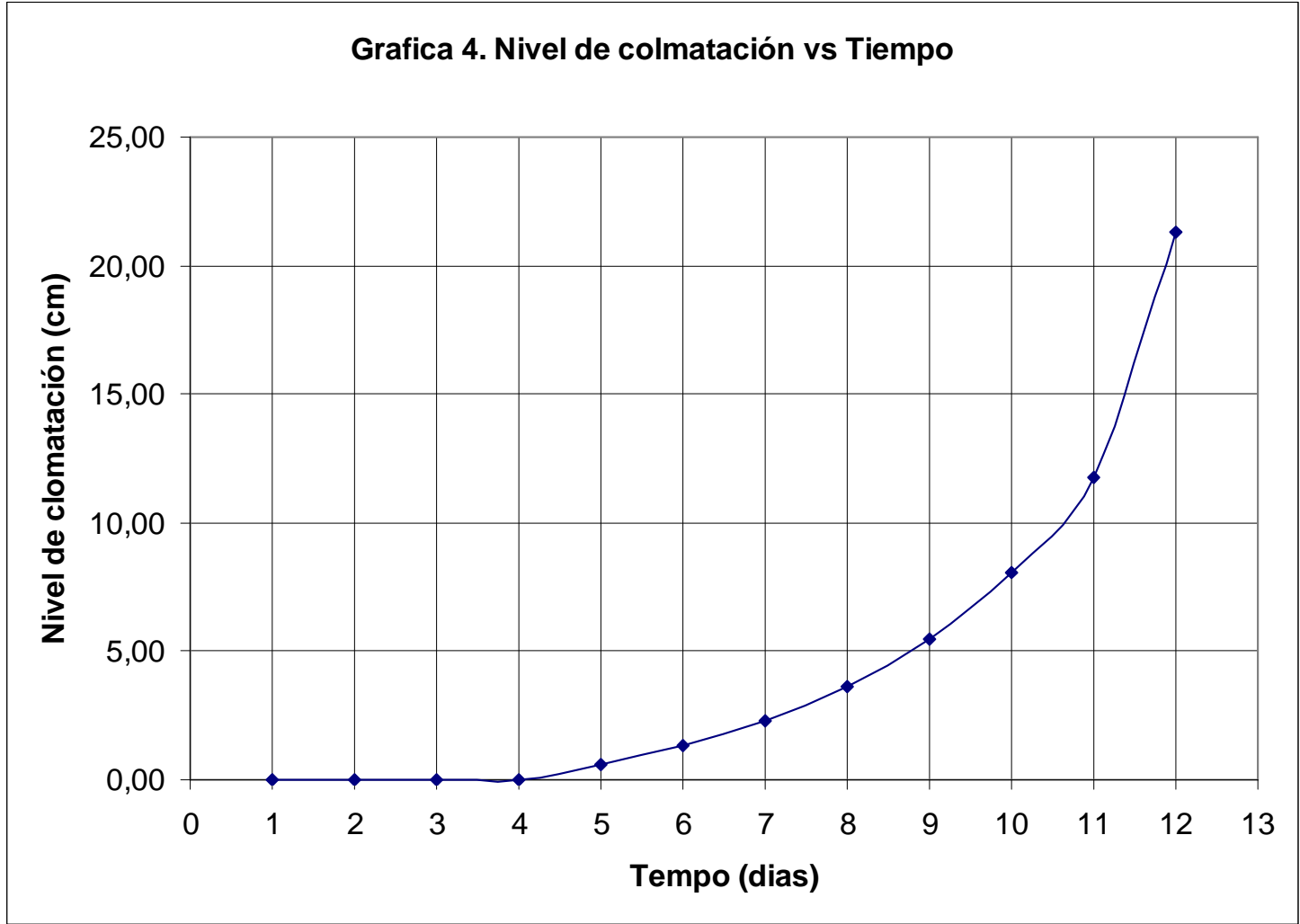
Fuente. Esta investigación.



Fuente. Esta investigación.



Fuente. Esta investigación.



**4.2.2.2 Puesta en marcha y operación:** Después de haber instalado el filtro se procedió a evaluar su tiempo de operación en condiciones normales. De igual manera, se inició una etapa de observación, dejando fluir el lixiviado a través del filtro, hasta el punto en el cual el lixiviado dejó de salir por el tubo determinado para la evacuación del efluente. La estimación del periodo de eficiencia en la filtración con arena se determinó en doce días.

Una vez determinado el nivel de colmatación, se ubicó el vertedero de rebose a la altura igual a este nivel (ver figura 11).

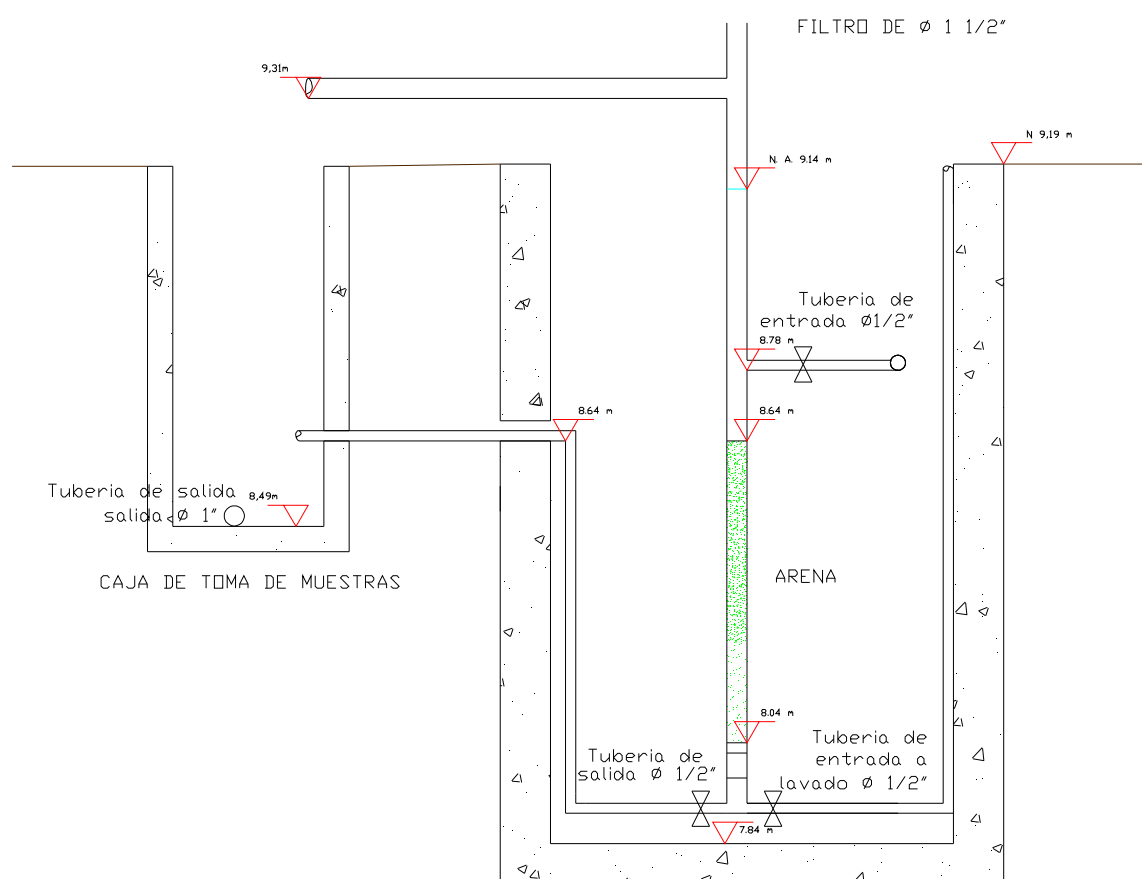


Figura 13. Detalle de los niveles del filtro de Arena.

**4.2.2.3 Filtro de Antracita:** En la evaluación del desempeño del filtro de antracita, las características granulométricas del lecho filtrante serán semejantes a las consideradas en la antracita utilizada en el filtro dual de Antracita y Arena.

El cuerpo del filtro es el mismo que se utilizó con los lechos de arena y antracita y únicamente se cambia el lecho filtrante; por lo tanto, para este filtro se conservarán las características hidráulicas tales como:

- Caudal del afluente
- Área transversal del filtro
- Altura total del lecho filtrante = 60cm

**4.2.2.3.1 Pérdida de carga inicial:** La pérdida de carga en la válvula de entrada será la misma calculada para el filtro de arena y antracita, puesto se ha conservado la estructura anterior.

Con base en la ecuación 4.7:

$$h_{VA} = \frac{K_1}{2g * 86400^2} * \left(\frac{A}{a}\right)^2 q^2$$

Utilizando una válvula de cierre de  $\Phi \frac{1}{2}$ ":

$$a = \frac{\pi * D^2}{4} = \frac{\pi * 0.0127^2 m^2}{4} = 0.00013 m^2$$

$K_1 = 1.56$ , para válvula.

Ahora:

$$h_{VA} = \frac{1.56}{2 * 9.8 m / seg^2 * 86400^2} * \left(\frac{0.0017}{0.00013}\right)^2 * q^2$$

$$h_{VA} = 1.92 * 10^{-9} * q^2$$

Donde:

$h_{VA}$  = pérdida de carga (m)  
 $q$  = tasa de filtración ( $m^3/m^2 \cdot día$ )

### **Pérdida de carga en el lecho**

Se hallará mediante la ecuación 4.8:

$$h_o = f * \frac{v}{g} * V * \frac{(1-p_0)^2}{p_0^3} * \frac{36}{C_e^2} * L_0 \left( \sum_{i=1}^i \frac{X_i}{d_i^2} \right)$$

Donde:

$f$  = constante experimental y adimensional, igual a 5

$v$  = viscosidad cinemática

$g$  = aceleración de la gravedad

$L$  = profundidad del lecho

$P_0$  = porosidad inicial

$V$  = velocidad de filtración

$X_i$  = Fracción en peso de material retenido entre dos tamices consecutivos, en un ensayo granulométrico.

$d_i$  = Diámetro promedio geométrico entre dos tamices.

Tomando los valores de la tabla 6, y una porosidad para la antracita = 0.40, reemplazando en la ecuación 4.8, se tiene:

$$h_{oA} = 5 * \frac{0.01206 \text{cm}^2 / \text{seg}}{980 \text{cm} / \text{seg}^2 * 86400} * \frac{(1-0.4)^2}{0.4^3} * \frac{36}{0.73^2} * 60 \text{cm} * 98 \text{cm}^{-2} * q$$

$$h_{oA} = 1.59 \times 10^{-3} * q$$

### **Pérdida en la grava de soporte:**

Utilizando la ecuación 4.8, se tiene:

$$h_G = \frac{L}{3 * 1440} * q$$

Donde:

$L$  = espesor de la grava

$$h_G = \frac{0.02 \text{m}}{3 * 1440} * q$$

$$h_G = 4.63 \times 10^{-6} * q$$

### **Pérdida de carga en el falso fondo:**

Utilizando la ecuación 4.9, se tiene:

$$h_D = \frac{K_1}{2g * 86400^2} \left( \frac{A}{a} \right)^2 * q^2$$

Donde:

a = área total hueca del soporte

A = área transversal del filtro

$$h_D = \frac{1.56}{2 * 9.8m / seg^2 * 86400^2} \left( \frac{0.0017}{0.001} \right)^2 * q^2$$

$$h_D = 3.08x10^{-11} * q^2$$

**Pérdida de carga en el vertedero:** Esta pérdida es equivalente a la altura de la lámina de agua sobre la cresta. Dado que la salida del filtro es un tubo de ½", el ancho de la cresta equivale se ha considerado como el diámetro de salida. Utilizando la ecuación 4.10, se tiene:

$$h_{VE} = \left( \frac{A}{1.838 * L * 86400} \right)^{0.6667} * q^{0.6667}$$

Donde:

A = área transversal del filtro

L = diámetro de salida (ancho de la cresta adoptado)

$$h_{VE} = \left( \frac{0.0017}{1.838 * 0.0127 * 86400} \right)^{0.6667} * q^{0.6667}$$

$$h_{VE} = 8.92x10^{-5} * q^{0.6667}$$

**Pérdida de carga total durante la filtración:** De acuerdo a la ecuación 4.11, se obtiene:

$$H = h_{VA} + h_{0A} + h_G + h_D + h_{VE}$$

Remplazando;

$$H = 1.92 \times 10^{-9} * q^2 + 1.59 \times 10^{-3} * q + 4.63 \times 10^{-6} * q + 3.08 \times 10^{-11} * q^2 + 8.92 \times 10^{-5} * q^{0.6667}$$

Donde:

q = tasa media de filtración = 288 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>dia.

Entonces.

$$H = 1.92 \times 10^{-9} * 288^2 + 1.59 \times 10^{-3} * 288 + 4.63 \times 10^{-6} * 288 + 3.08 \times 10^{-11} * 288^2 + 8.92 \times 10^{-5} * 288^{0.6667}$$
$$H = 0.46m$$

Nivel mínimo de operación del filtro = 46cm

**4.2.2.3.2 Pérdida de carga durante el retro-lavado:** Se analiza las pérdidas generadas en el filtro cuando éste sea sometido al proceso de retro-lavado, debido a la altura del lecho filtrante, a la expansión del mismo, y a los accesorios.

#### 4.2.2.3.2.1 Velocidad de Fluidificación

**Número de Galileo, Ga:**

De acuerdo a la ecuación 4.10

$$G_a = \frac{g(S_s - 1).d_{90}^3}{\nu^2}, \text{ donde:}$$

g = gravedad (cm/s<sup>2</sup>)

S<sub>s</sub> = peso específico

d<sub>90</sub> = Diámetro de tamiz

ν = Viscosidad cinemática

$$G_a = \frac{980 \text{ cm} / \text{seg}^2 * (1.40 - 1) * 0.1785^3 \text{ cm}^3}{0.01206^2 \text{ cm}^4 / \text{seg}^2}$$

$$G_a = 15328.73 \approx 15328$$

**Velocidad de fluidificación total:** De acuerdo a la ecuación 4.14, se tiene:

$$V_a = \frac{1.3\nu}{d_{90}} \left[ (33.7^2 + 0.0408G_a)^{0.5} - 33.7 \right]$$

$$V_a = \frac{1.3 * 0.01206 \text{ cm}^2 / \text{seg}}{0.1785 \text{ cm}} \left[ (33.7^2 + 0.0408 * 15328)^{0.5} - 33.7 \right]$$

$$V_a = 0.726 \text{ cm} / \text{seg} = 0.44 \text{ m} / \text{min}$$

**4.2.2.3.2.2 Expansión del lecho:** De acuerdo a los valores de las constantes de la tabla 4, y las ecuaciones 4.16, 4.17, 4.18, 4.21, 4.22 y 4.23, se tiene:

$$\text{Re} = \alpha * G_a^m$$

$$\text{Re} = 0.2723 * 15328^{0.6133}$$

$$\text{Re} = 100.47$$

$$v_s = \frac{v * \text{Re}}{d_{90}(\text{Antracita})}$$

$$v_s = \frac{0.01206 \text{ cm}^2 / \text{seg} * 100.47}{0.1785 \text{ cm}} \beta * \text{Re}^\theta$$

$$v_s = 6.79 \text{ cm} / \text{seg}$$

$$\beta * \text{Re}^\theta$$

$$\beta * \text{Re}^\theta = 0.1813 * 100.47^{0.1015} = 0.29$$

$$Pe = \left( \frac{v_a}{v_s} \right)^{\beta * \text{Re}^\theta}$$

$$Pe = \left( \frac{0.73 \text{ cm} / \text{seg}}{6.79 \text{ cm} / \text{seg}} \right)^{0.29}$$

$$Pe = 0.52$$

$$\xi_c = \frac{Pe - Po}{1 - Pe}$$

$$\xi_c = \frac{0.52 - 0.4}{1 - 0.52} = 0.26$$

Expansión en el lecho de antracita = 0.26m

**4.2.2.3.2.3 Cálculo de pérdidas de carga:** De acuerdo a la ecuación 4.29, se tiene:



**Para la antracita:**

$$h_L = (S_s - 1) * (1 - P_o) * X_a$$
$$h_L = (1.4 - 1) * (1 - 0.4) * 0.6m$$
$$h_L = 0.144m \approx 0.14m$$

Pérdida total en el lecho = 0.14m

**Pérdida en la grava:**

De acuerdo a la ecuación 4.12, se tiene:

$$h_{LG} = \frac{v_a * X_g}{3}$$
$$h_{LG} = \frac{0.65 * 0.02}{3} = 0.004m$$

**4.2.2.3.2.4 Caudal de Lavado:** Según la ecuación 4.30, se tiene:

$$Q_L = V_a * A$$

Donde:

$V_a$  = velocidad ascensional o de fluidificación  
 $A$  = área superficial del filtro

$$Q_L = 0.65m / \text{min} * 0.0017m^2$$
$$Q_L = 0.0011m^3 / \text{min} = 0.018Lt / \text{seg}$$

Este caudal de lavado se obtuvo en campo, por aforamientos.

**4.2.2.3.3 Pérdida por colmatación:** Igual que en los filtros anteriores se realizó 3 lecturas diarias del nivel del afluente dentro del filtro, hasta el día en que se observó que el efluente dejó de salir por el vertedero de salida. La diferencia entre el nivel mínimo observado y el calculado se presentó nuevamente en este filtro, siendo 46cm el nivel dinámico mínimo calculado y 37cm el nivel observado durante los primeros días de observación.

El momento de colmatación de este filtro se presentó durante el vigésimo cuarto día de observación.

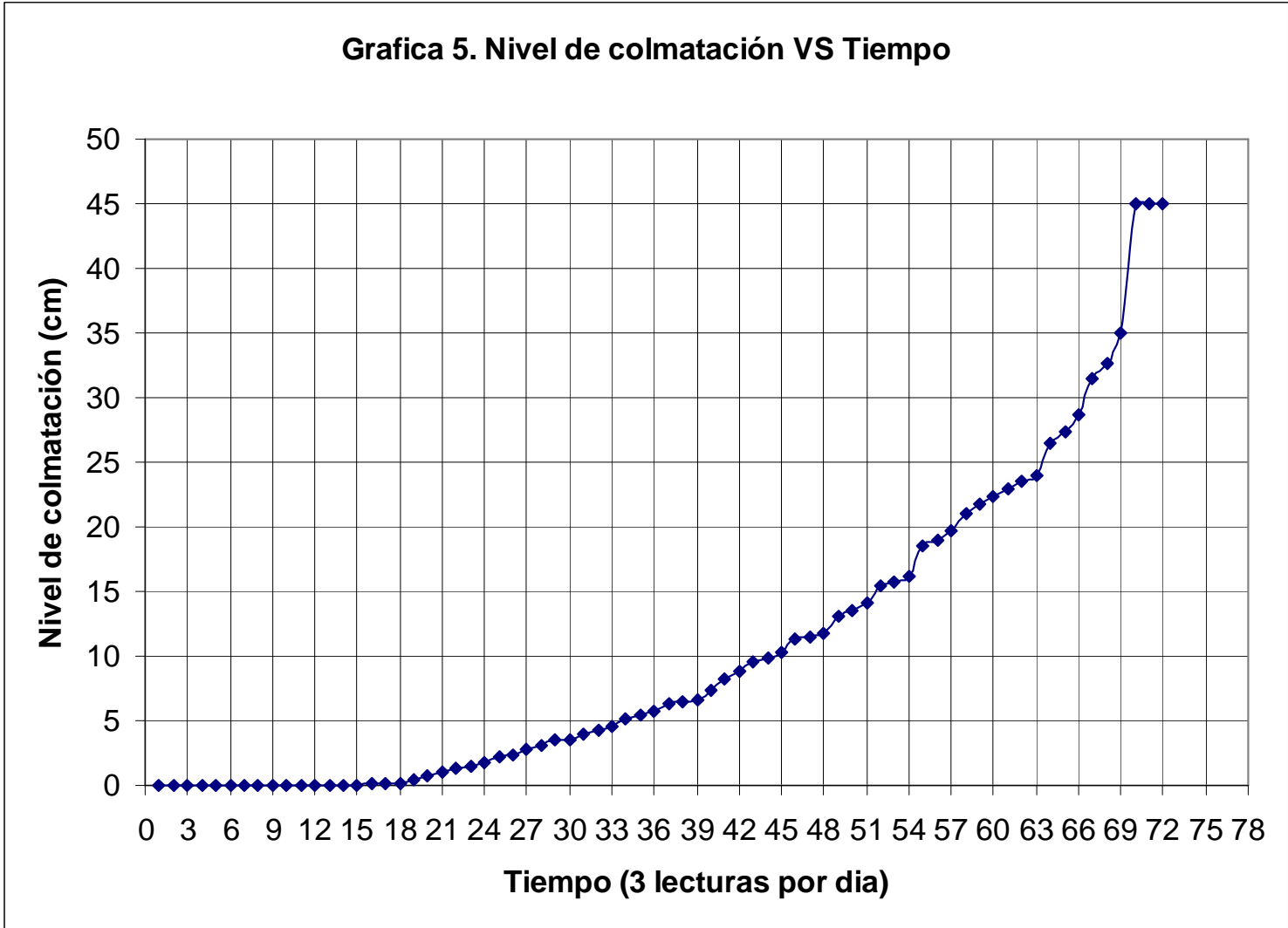
El nivel máximo de afluente que se alcanzó dentro del filtro antes de llegar al punto de colmatación fue de 36cm por encima del nivel mínimo de operación. Tal como se observa en las lecturas registradas en la tabla 11, y las gráficas 5 y 6.

**Tabla 11. Lecturas de nivel de colmatación  
FILTRO DE ANTRACITA**

<b>Día</b>	<b>lecturas x día</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>Día</b>	<b>lecturas x día</b>	<b>Altura (cm)</b>
	1	0		37	6,3
1	2	0	13	38	6,5
	3	0		39	6,6
	4	0		40	7,3
2	5	0	14	41	8,2
	6	0		42	8,8
	7	0		43	9,5
3	8	0	15	44	9,8
	9	0		45	10,3
	10	0		46	11,3
4	11	0	16	47	11,5
	12	0		48	11,8
	13	0		49	13,1
5	14	0	17	50	13,6
	15	0		51	14,1
	16	0,2		52	15,4
6	17	0,2	18	53	15,7
	18	0,2		54	16,2
	19	0,5		55	18,6
7	20	0,7	19	56	19
	21	1		57	19,7
	22	1,3		58	21,1
8	23	1,5	20	59	21,8
	24	1,7		60	22,4
	25	2,2		61	23
9	26	2,4	21	62	23,5
	27	2,8		63	24
	28	3,1		64	26,4
10	29	3,5	22	65	27,3
	30	3,6		66	28,7
	31	4		67	31,4
11	32	4,2	23	68	32,6
	33	4,5		69	35
	34	5,2		70	45
12	35	5,4	24	71	45
	36	5,7		72	45

Fuente. Esta investigación.

Fuente. Esta investigación.



Fuente. Esta investigación.



**4.2.2.3.4 Puesta en marcha:** El proceso de funcionamiento del filtro de antracita, y de los siguientes filtros a ser analizados, es similar al llevado a cabo para los dos anteriores filtros analizados.

Una vez determinado el nivel de colmatación, se ubicó el vertedero de rebose a la altura igual a este nivel (ver figura 12).

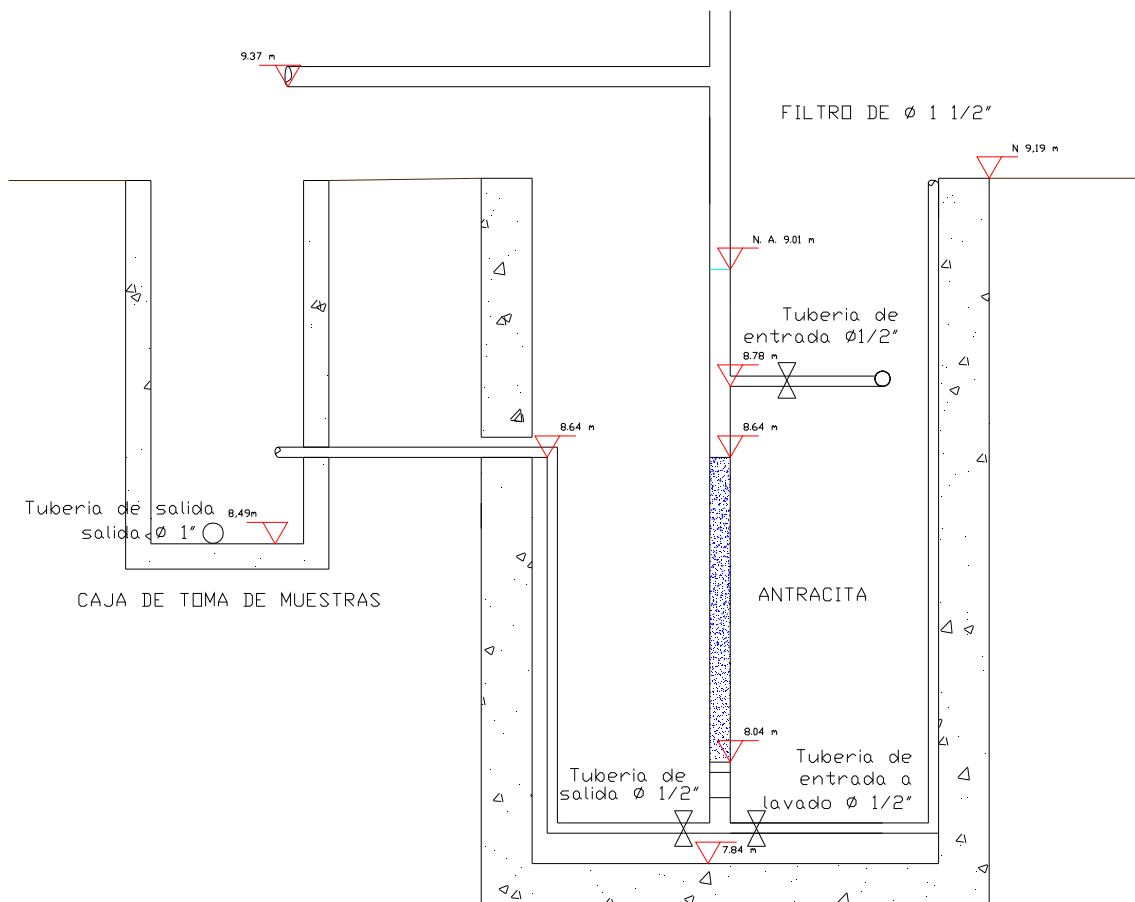


Figura 14. Detalle de los niveles del filtro de Antracita.

**4.2.2.4 Filtro de antracita + carbón activado + arena:** Igual que en los filtros anteriores, las características granulométricas del lecho filtrante serán semejantes a las consideradas a las utilizadas en el filtro dual de Antracita y Arena, adicionalmente se estudiarán las características granulométricas del carbón activado.

El cuerpo del filtro es el mismo que se utilizó con los lechos de arena y antracita y únicamente se cambia el lecho filtrante; por lo tanto, para este filtro se conservarán las características hidráulicas tales como:

- Caudal del afluente
- Área transversal del filtro
- Altura total del lecho filtrante = 60cm
  - 20cm de Antracita
  - 20cm de Carbón activado
  - 20cm de Arena

**4.2.2.4.1 Pérdida de carga inicial:** La pérdida de carga en la válvula de entrada será la misma calculada para el filtro de arena y antracita, puesto se ha conservado la estructura anterior.

Con base en la ecuación 4.7:

$$h_{VA} = \frac{K_1}{2g * 86400^2} * \left(\frac{A}{a}\right)^2 q^2$$

Utilizando una válvula de cierre de  $\Phi \frac{1}{2}$ ":

$$a = \frac{\pi * D^2}{4} = \frac{\pi * 0.0127^2 m^2}{4} = 0.00013 m^2$$

$K_1 = 1.56$ , para válvula.

Ahora:

$$h_{VA} = \frac{1.56}{2 * 9.8 m / seg^2 * 86400^2} * \left(\frac{0.0017}{0.00013}\right)^2 * q^2$$

$$h_{VA} = 1.92 * 10^{-9} * q^2$$

Donde:

$h_{VA}$  = pérdida de carga (m)  
 $q$  = tasa de filtración ( $m^3/m^2 \cdot día$ )

**Pérdida de carga en el lecho:** Se hallará mediante la ecuación 4.8:

$$h_o = f * \frac{v}{g} * V * \frac{(1-p_0)^2}{p_0^3} * \frac{36}{C_e^2} * L_0 \left( \sum_{i=1}^i \frac{X_i}{d_i^2} \right)$$

Donde:

$f$  = constante experimental y adimensional, igual a 5

$v$  = viscosidad cinemática

$g$  = aceleración de la gravedad

$L$  = profundidad del lecho

$P_0$  = porosidad inicial

$V$  = velocidad de filtración

$X_i$  = Fracción en peso de material retenido entre dos tamices consecutivos, en un ensayo granulométrico.

$d_i$  = Diámetro promedio geométrico entre dos tamices.

**Pérdida en la Antracita:** Tomando los valores de la tabla 6, y una porosidad para la antracita = 0.40, remplazando en la ecuación 4.8, se tiene:

$$h_{oA} = 5 * \frac{0.01206 \text{cm}^2 / \text{seg}}{980 \text{cm} / \text{seg}^2 * 86400} * \frac{(1-0.4)^2}{0.4^3} * \frac{36}{0.73^2} * 20 \text{cm} * 98 \text{cm}^{-2} * q$$

$$h_{oA} = 5.30 \times 10^{-4} * q$$

**Pérdida en el carbón activado:** Según los valores de las tablas 12 y 13. los valores de porosidad = 0.5, y coeficiente de esfericidad = 0.75, remplazando en la ecuación 4.8, se tiene:

**Tabla 12. Propiedades típicas de medios filtrantes comunes para filtros de lecho granular<sup>1</sup>**

Características	Arena	Antracita	Carbón Activado	Granate
Densidad del material ( $\rho_s$ ) (g/cm <sup>3</sup> )	2,65	1,45 – 1,73	1,3 – 1,5*	4,0 – 4,2
Porosidad perdida del lecho ( $\epsilon_0$ )	0,42 – 0,47	0,56 – 0,60	0,5	0,45 – 0,65
Esfericidad ( $C_e$ )	0,7 – 0,8	0,46 – 0,60	0,5	0,6

<sup>1</sup> DISPONIBLE EN INTERNET: <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manuall/cinco.pdf>

**Tabla 13. Diámetro promedio y porcentaje retenido para el carbón activado**

# tamiz	d <sub>1</sub> (cm)	d <sub>2</sub> (cm)	d <sub>i</sub> (cm)	d <sub>i</sub> <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )	X <sub>i</sub>	X <sub>i</sub> /d <sub>i</sub> <sup>2</sup>
30-20	0,059	0,084	0,0715	0,005	0,13	25,43
20-16	0,084	0,119	0,1015	0,010	0,28	27,18
16-10	0,119	0,2	0,1595	0,025	0,4	15,72
10-8	0,2	0,238	0,219	0,048	0,19	3,96
					Σ=1	72,29

$$h_{oCA} = 5 * \frac{0.01206 \text{ cm}^2 / \text{seg}}{980 \text{ cm} / \text{seg}^2 * 86400} * \frac{(1-0.5)^2}{0.5^3} * \frac{36}{0.75^2} * 20 \text{ cm} * 72.29 \text{ cm}^{-2} * q$$

$$h_{oCA} = 1.32 \times 10^{-4} * q$$

**Pérdida en la arena:**

$$h_{oa} = 5 * \frac{0.01206 \text{ cm}^2 / \text{seg}}{980 \text{ cm} / \text{seg}^2 * 86400} * \frac{(1-0.4)^2}{0.4^3} * \frac{36}{0.82^2} * 20 \text{ cm} * 192 \text{ cm}^{-2} * q$$

$$h_{oa} = 8.2 \times 10^{-4} * q$$

**Pérdida de carga total en el lecho:** La pérdida de carga inicial en lecho es la suma de la que se produce en la arena, en el carbón activado y en la antracita.

$$h_0 = h_{oA} + h_{oCA} + h_{oa}$$

$$h_0 = 1.48 \times 10^{-3} * q$$

**Pérdida en la grava de soporte:** Utilizando la ecuación 4.8, se tiene:

$$h_G = \frac{L}{3 * 1440} * q$$

Donde:

L = espesor de la grava

$$h_G = \frac{0.02 \text{ m}}{3 * 1440} * q$$

$$h_G = 4.63 \times 10^{-6} * q$$



### **Pérdida de carga en el falso fondo:**

Utilizando la ecuación 4.9, se tiene:

$$h_D = \frac{K_1}{2g * 86400^2} \left( \frac{A}{a} \right)^2 * q^2$$

Donde:

a = área total hueca del soporte

A = área transversal del filtro

$$h_D = \frac{1.56}{2 * 9.8m / seg^2 * 86400^2} \left( \frac{0.0017}{0.001} \right)^2 * q^2$$

$$h_D = 3.08x10^{-11} * q^2$$

**Pérdida de carga en el vertedero:** Esta pérdida es equivalente a la altura de la lámina de agua sobre la cresta. Dado que la salida del filtro es un tubo de ½”, el ancho de la cresta equivale se ha considerado como el diámetro de salida. Utilizando la ecuación 4.10, se tiene:

$$h_{VE} = \left( \frac{A}{1.838 * L * 86400} \right)^{0.6667} * q^{0.6667}$$

Donde:

A = área transversal del filtro

L = diámetro de salida (ancho de la cresta adoptado)

$$h_{VE} = \left( \frac{0.0017}{1.838 * 0.0127 * 86400} \right)^{0.6667} * q^{0.6667}$$

$$h_{VE} = 8.92x10^{-5} * q^{0.6667}$$

**Pérdida de carga total durante la filtración:** De acuerdo a la ecuación 4.11, se obtiene:

$$H = h_{VA} + h_0 + h_G + h_D + h_{VE}$$

Remplazando;

$$H = 1.92 \times 10^{-9} * q^2 + 1.48 \times 10^{-3} * q + 4.63 \times 10^{-6} * q + 3.08 \times 10^{-11} * q^2 + 8.92 \times 10^{-5} * q^{0.6667}$$

Donde:

q = tasa media de filtración = 288 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>dia.

Entonces.

$$H = 1.92 \times 10^{-9} * 288^2 + 1.48 \times 10^{-3} * 288 + 4.63 \times 10^{-6} * 288 + 3.08 \times 10^{-11} * 288^2 + 8.92 \times 10^{-5} * 288^{0.6667}$$

$$H = 0.43m$$

Nivel mínimo de operación del filtro = 43cm

**4.2.2.4.2 Proceso De Lavado Del Filtro:** Dado que en el numeral 3.10.3, se mencionan las propiedades del carbón activado, se sabe que su tiempo de trabajo en la remoción de partículas es limitado, y para su reutilización, el carbón activado granular debe ser sometido a un nuevo proceso de activación.

De acuerdo a esto, un proceso de retro-lavado no sería el indicado en el momento en que el filtro se haya colmatado. De ahí que el lecho filtrante debe ser removido para lavar individualmente los materiales, y reactivar el carbón activado granular, o en su defecto reemplazarlo por carbón activado granular nuevo.

**4.2.2.4.3 Pérdida Por Colmatación:** Igual que en los filtros anteriores se realizó 3 lecturas diarias del nivel del afluente dentro del filtro, hasta el día en que se observó que el efluente dejó de salir por el vertedero de salida. La diferencia entre el nivel mínimo observado y el calculado se presentó nuevamente en este filtro, siendo 33cm el nivel dinámico mínimo calculado y 30cm el nivel observado durante los primeros días de observación.

El momento de colmatación de este filtro se presentó durante el décimo octavo día de observación.

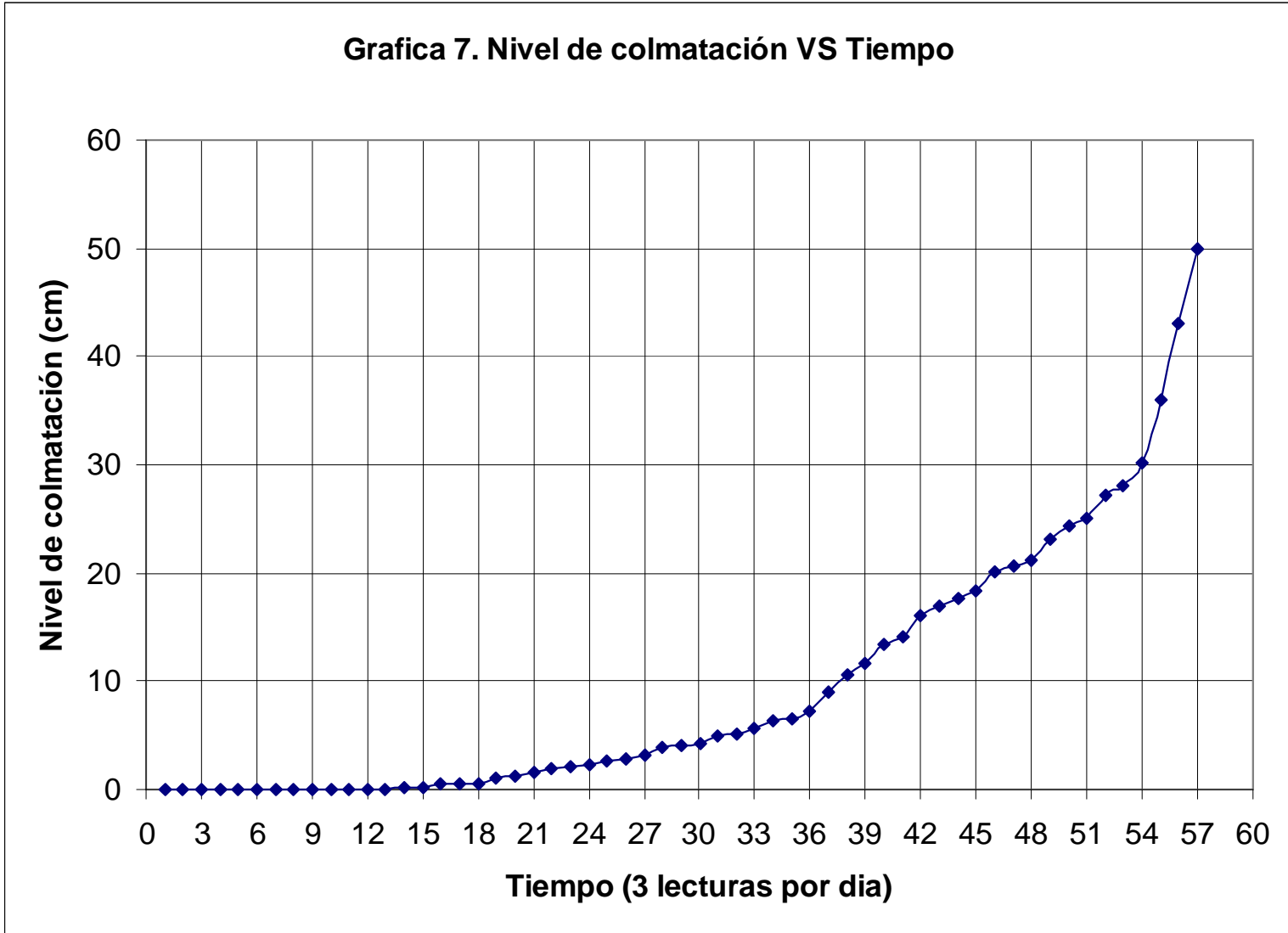
El nivel máximo de afluente que se alcanzó dentro del filtro antes de llegar al punto de colmatación fue de 30cm por encima del nivel mínimo de operación. Tal como se observa en las lecturas registradas en la tabla 14, y las gráficas 7 y 8.

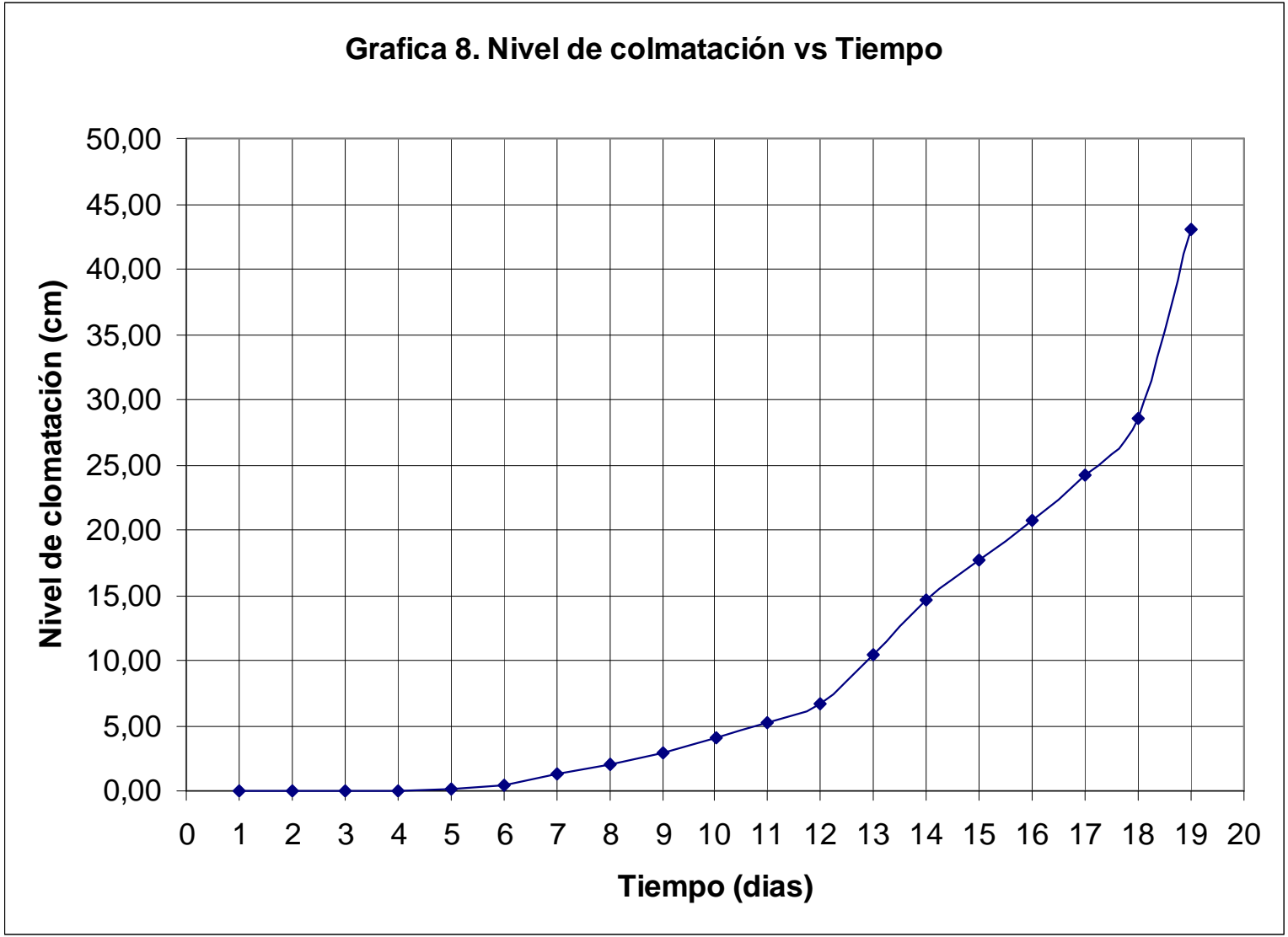
**Tabla 14. lecturas de nivel de colmatación filtro Arena + Carbón activado + Antracita**

<b>Día</b>	<b>lecturas x día</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>Día</b>	<b>lecturas x día</b>	<b>Altura (cm)</b>
	1	0		31	4,9
1	2	0	11	32	5,2
	3	0		33	5,6
	4	0		34	6,3
2	5	0	12	35	6,6
	6	0		36	7,2
	7	0		37	9
3	8	0	13	38	10,6
	9	0		39	11,7
	10	0		40	13,5
4	11	0	14	41	14,2
	12	0		42	16
	13	0		43	17
5	14	0,2	15	44	17,6
	15	0,2		45	18,3
	16	0,5		46	20,1
6	17	0,5	16	47	20,7
	18	0,5		48	21,2
	19	1		49	23,1
7	20	1,3	17	50	24,3
	21	1,6		51	25
	22	1,9		52	27,2
8	23	2,1	18	53	28,1
	24	2,3		54	30,2
	25	2,6		55	36
9	26	2,9	19	56	43
	27	3,1		57	50
	28	3,8			
10	29	4			
	30	4,3			

Fuente. Esta investigación

Fuente. Esta investigación





**4.2.2.4.4 Puesta En Marcha:** El proceso de funcionamiento del filtro es similar a los anteriores filtros analizados.

Una vez determinado el nivel de colmatación, se ubicó el vertedero de rebose a la altura igual a este nivel (ver figura 13).

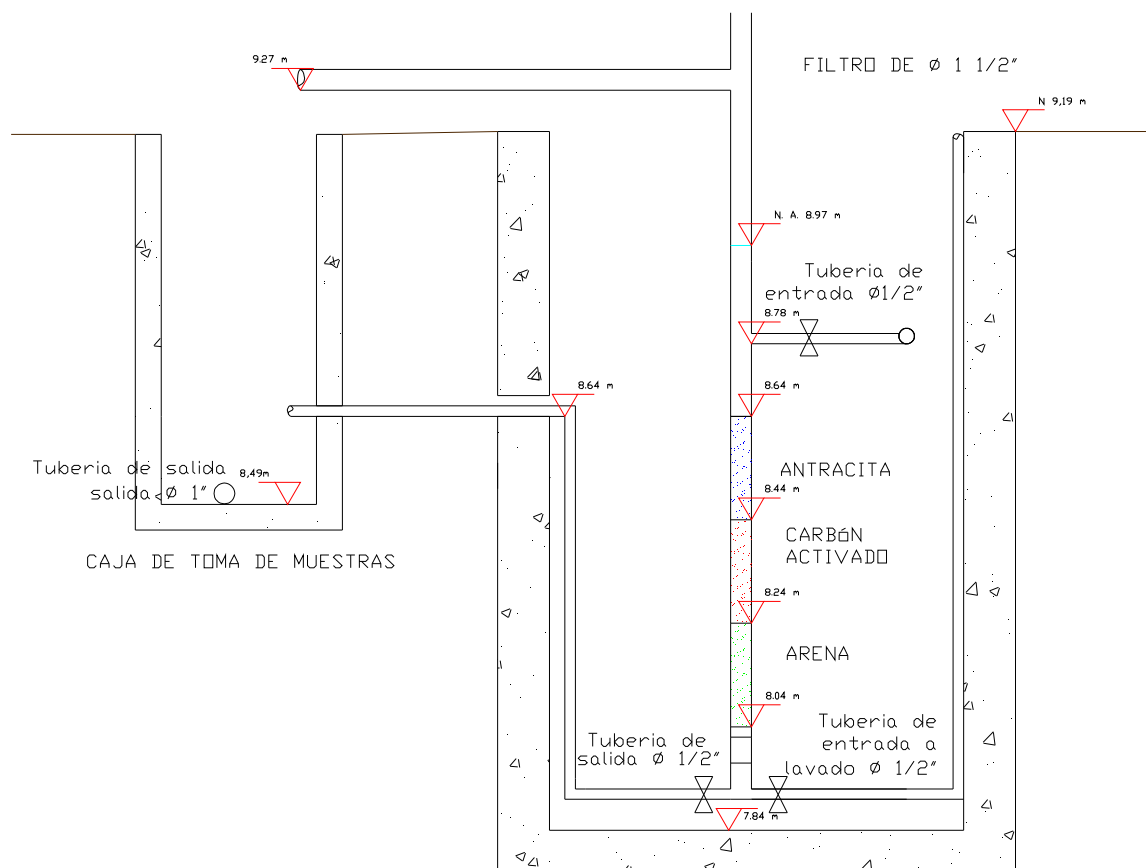


Figura 15. Detalle de los niveles del filtro de Antracita + Carbón activado + Arena

**4.2.2.5 Filtro de antracita + carbón activado:** Igual que en los filtros anteriores, las características granulométricas del lecho filtrante serán semejantes a las consideradas a las utilizadas en el filtro dual de Antracita y Arena, adicionalmente se estudiarán las características granulométricas del carbón activado.

El cuerpo del filtro es el mismo que se utilizó con los lechos de arena y antracita y únicamente se cambia el lecho filtrante; por lo tanto, para este filtro se conservarán las características hidráulicas tales como:

- Caudal del afluente
- Área transversal del filtro
- Altura total del lecho filtrante = 60cm
  - 20cm de Antracita
  - 20cm de Carbón activado
  - 20cm de Antracita

**4.2.2.5.1 Pérdida de carga inicial:** La pérdida de carga en la válvula de entrada será la misma calculada para el filtro de arena y antracita, puesto se ha conservado la estructura anterior.

Con base en la ecuación 4.7:

$$h_{VA} = \frac{K_1}{2g * 86400^2} * \left(\frac{A}{a}\right)^2 q^2$$

Utilizando una válvula de cierre de  $\Phi \frac{1}{2}$ ":

$$a = \frac{\pi * D^2}{4} = \frac{\pi * 0.0127^2 m^2}{4} = 0.00013 m^2$$

$K_1 = 1.56$ , para válvula.

Ahora:

$$h_{VA} = \frac{1.56}{2 * 9.8 m / seg^2 * 86400^2} * \left(\frac{0.0017}{0.00013}\right)^2 * q^2$$

$$h_{VA} = 1.92 * 10^{-9} * q^2$$

Donde:

$h_{VA}$  = pérdida de carga (m)

q = tasa de filtración (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.día)

**Pérdida de carga en el lecho:** Se hallará mediante la ecuación 4.8:

$$h_o = f * \frac{v}{g} * V * \frac{(1-p_0)^2}{p_0^3} * \frac{36}{C_e^2} * L_0 \left( \sum_{i=1}^i \frac{X_i}{d_i^2} \right)$$

Donde:

f = constante experimental y adimensional, igual a 5

v = viscosidad cinemática

g = aceleración de la gravedad

L = profundidad del lecho

P<sub>0</sub> = porosidad inicial

V = velocidad de filtración

X<sub>i</sub> = Fracción en peso de material retenido entre dos tamices consecutivos, en un ensayo granulométrico.

d<sub>i</sub> = Diámetro promedio geométrico entre dos tamices.

**Pérdida en la Antracita:** Tomando los valores de la tabla 6, y una porosidad para la antracita = 0.40, reemplazando en la ecuación 4.8, se tiene:

$$h_{oA} = 5 * \frac{0.01206 \text{cm}^2 / \text{seg}}{980 \text{cm} / \text{seg}^2 * 86400} * \frac{(1-0.4)^2}{0.4^3} * \frac{36}{0.73^2} * 20 \text{cm} * 98 \text{cm}^{-2} * q$$

$$h_{oA} = 5.30 \times 10^{-4} * q$$

Como el lecho esta compuesto por dos lechos de antracita de 20cm la perdida total será:

$$h_{oA} = 2 * 5.30 \times 10^{-4} * q$$

$$h_{oA} = 1.06 \times 10^{-3} * q$$

**Pérdida en el carbón activado:** Según los valores de las tablas 12 y 13. los valores de porosidad = 0.5, y coeficiente de esfericidad = 0.75, reemplazando en la ecuación 4.8, se tiene:

$$h_{oCA} = 5 * \frac{0.01206 \text{cm}^2 / \text{seg}}{980 \text{cm} / \text{seg}^2 * 86400} * \frac{(1-0.5)^2}{0.5^3} * \frac{36}{0.75^2} * 20 \text{cm} * 72.29 \text{cm}^{-2} * q$$

$$h_{oCA} = 1.32 \times 10^{-4} * q$$



**Pérdida de carga total en el lecho:** La pérdida de carga inicial en lecho es la suma de la que se produce en la arena, en el carbón activado y en la antracita.

$$h_0 = h_{oA} + h_{oCA}$$

$$h_0 = 1.192 \times 10^{-3} * q$$

**Pérdida en la grava de soporte:** Utilizando la ecuación 4.8, se tiene:

$$h_G = \frac{L}{3 * 1440} * q$$

Donde:

L = espesor de la grava

$$h_G = \frac{0.02m}{3 * 1440} * q$$

$$h_G = 4.63 \times 10^{-6} * q$$

**Pérdida de carga en el falso fondo:** Utilizando la ecuación 4.9, se tiene:

$$h_D = \frac{K_1}{2g * 86400^2} \left( \frac{A}{a} \right)^2 * q^2$$

Donde:

a = área total hueca del soporte

A = área transversal del filtro

$$h_D = \frac{1.56}{2 * 9.8m / seg^2 * 86400^2} \left( \frac{0.0017}{0.001} \right)^2 * q^2$$

$$h_D = 3.08 \times 10^{-11} * q^2$$

**Pérdida de carga en el vertedero:** Esta pérdida es equivalente a la altura de la lámina de agua sobre la cresta. Dado que la salida del filtro es un tubo de ½", el ancho de la cresta equivale se ha considerado como el diámetro de salida. Utilizando la ecuación 4.10, se tiene:

$$h_{VE} = \left( \frac{A}{1.838 * L * 86400} \right)^{0.6667} * q^{0.6667}$$

Donde:

A = área transversal del filtro

L = diámetro de salida (ancho de la cresta adoptado)

$$h_{VE} = \left( \frac{0.0017}{1.838 * 0.0127 * 86400} \right)^{0.6667} * q^{0.6667}$$

$$h_{VE} = 8.92 \times 10^{-5} * q^{0.6667}$$

**Pérdida de carga total durante la filtración:** De acuerdo a la ecuación 4.11, se obtiene:

$$H = h_{VA} + h_0 + h_G + h_D + h_{VE}$$

Remplazando;

$$H = 1.92 \times 10^{-9} * q^2 + 1.192 \times 10^{-3} * q + 4.63 \times 10^{-6} * q + 3.08 \times 10^{-11} * q^2 + 8.92 \times 10^{-5} * q^{0.6667}$$

Donde:

q = tasa media de filtración = 288 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> día.

Entonces.

$$H = 1.92 \times 10^{-9} * 288^2 + 1.48 \times 10^{-3} * 288 + 4.63 \times 10^{-6} * 288 + 3.08 \times 10^{-11} * 288^2 + 8.92 \times 10^{-5} * 288^{0.6667}$$

$$H = 0.35m$$

Nivel mínimo de operación del filtro = 35cm

**4.2.2.5.2 Proceso de lavado del filtro:** Dado que en el numeral 4.10.3 se mencionan las propiedades del carbón activado, se sabe que su tiempo de trabajo en la remoción de partículas es limitado, y para su reutilización, el carbón activado granular debe ser sometido a un nuevo proceso de activación.

De acuerdo a esto, un proceso de retro-lavado no sería el indicado en el momento en que el filtro se haya colmatado. De ahí que el lecho filtrante debe ser removido para lavar individualmente los materiales, y reactivar el carbón activado granular, o en su defecto remplazarlo por carbón activado granular nuevo.

**4.2.2.5.3 Pérdida por colmatación:** Igual que en los filtros anteriores se realizó 3 lecturas diarias del nivel del afluente dentro del filtro, hasta el día en que se observó que el efluente dejó de salir por el vertedero de salida. La diferencia entre el nivel mínimo observado y el calculado se presentó nuevamente en este filtro, siendo 35cm el nivel dinámico mínimo calculado y 33cm el nivel observado durante los primeros días de observación.

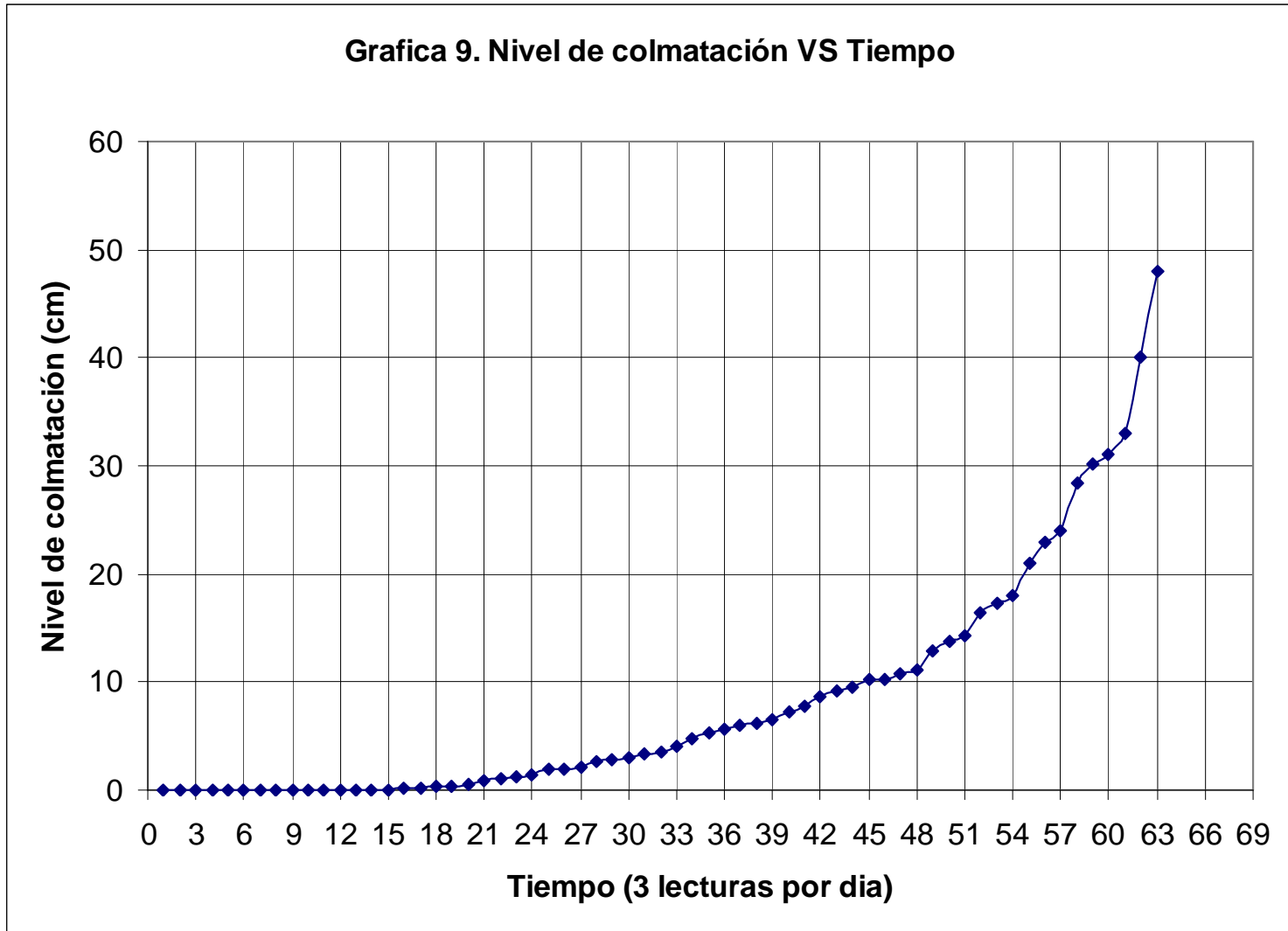
El momento de colmatación de este filtro se presentó durante el vigésimo primer día de observación.

El nivel máximo de afluente que se alcanzó dentro del filtro antes de llegar al punto de colmatación fue de 33cm por encima del nivel mínimo de operación. Tal como se observa en las lecturas registradas en la tabla 15, y las gráficas 9 y 10.

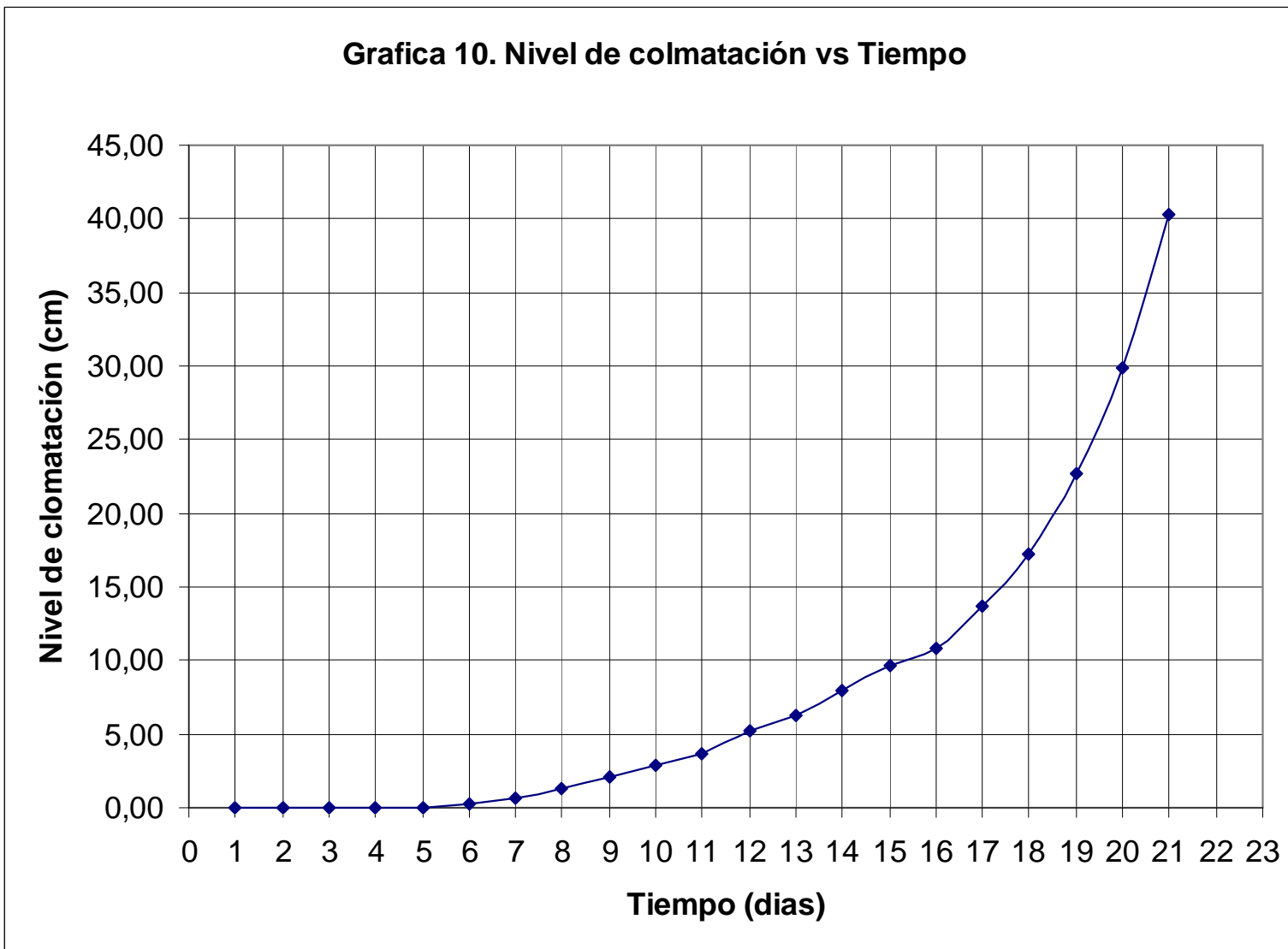
**Tabla 15. Lecturas de nivel de colmatación filtro Antracita + Carbón activado + Antracita**

<b>Día</b>	<b>lecturas x día</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>Día</b>	<b>lecturas x día</b>	<b>Altura (cm)</b>
	1	0		34	4,8
1	2	0	12	35	5,3
	3	0		36	5,6
	4	0		37	6
2	5	0	13	38	6,2
	6	0		39	6,5
	7	0		40	7,2
3	8	0	14	41	7,8
	9	0		42	8,7
	10	0		43	9,1
4	11	0	15	44	9,6
	12	0		45	10,3
	13	0		46	10,3
5	14	0	16	47	10,8
	15	0		48	11,2
	16	0,2		49	12,8
6	17	0,2	17	50	13,8
	18	0,3		51	14,3
	19	0,4		52	16,4
7	20	0,6	18	53	17,3
	21	0,8		54	18
	22	1		55	21
8	23	1,3	19	56	23
	24	1,5		57	24
	25	1,9		58	28,5
9	26	2	20	59	30,1
	27	2,2		60	31
	28	2,7		61	33
10	29	2,8	21	62	40
	30	3		63	48
	31	3,3			
11	32	3,5			
	33	4			

Fuente. Esta investigación



**Grafica 10. Nivel de colmatación vs Tiempo**



**4.2.2.5.4 Puesta en marcha:** El proceso de funcionamiento del filtro es similar a los anteriores filtros analizados.

Una vez determinado el nivel de colmatación, se ubicó el vertedero de rebose a la altura igual a este nivel (ver figura 14).

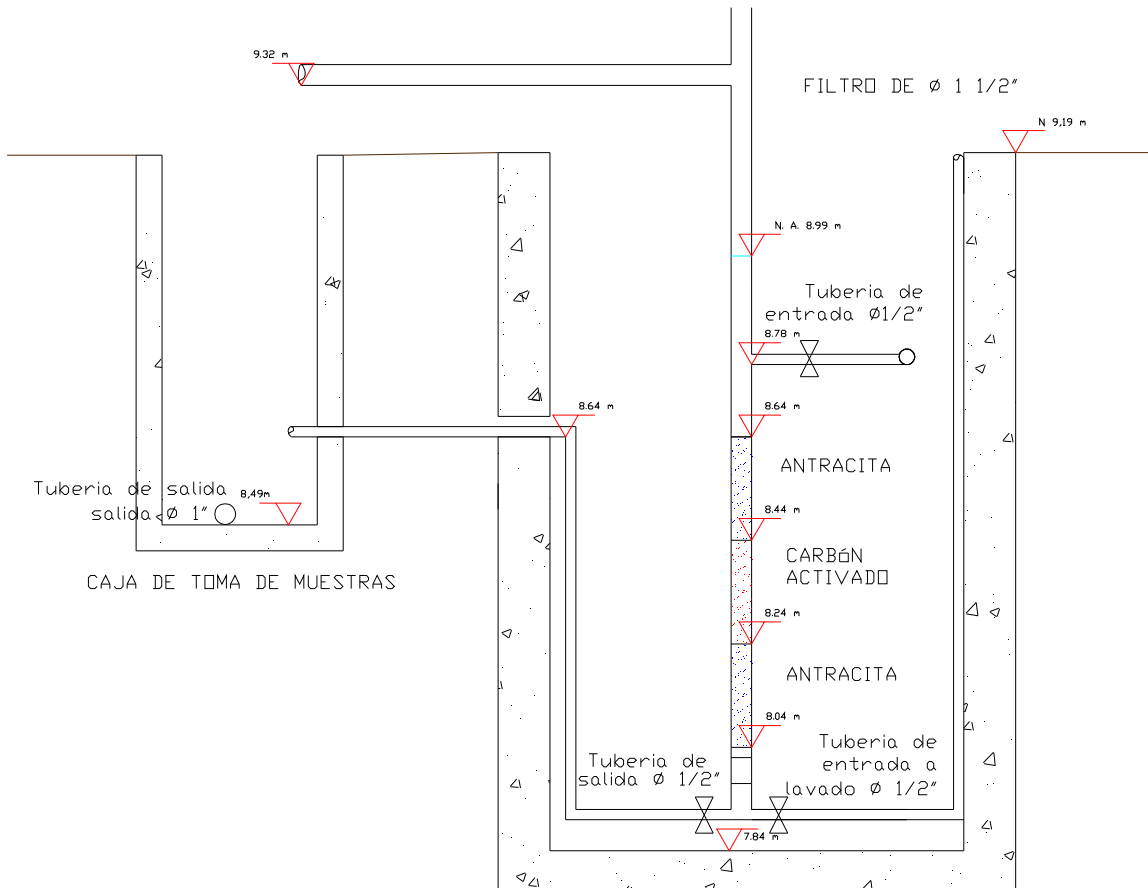


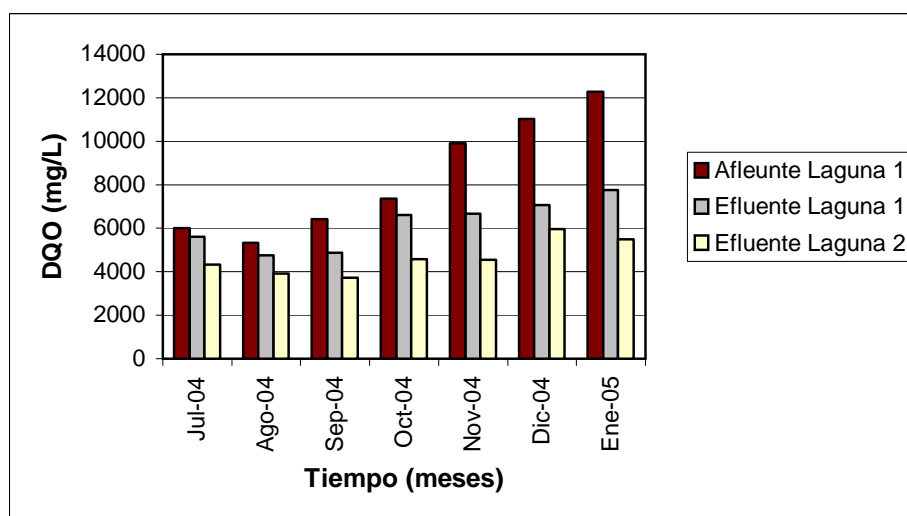
Figura 14. Detalle de los niveles en el filtro de antracita + carbón activado

## 5. ANALISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS

Dado que los estudios realizados en el CEPA (Centro Experimental Piloto De Antanas), indicaban que el 75% de la carga orgánica del lixiviado, expresada en DQO era eliminada biológicamente, y el objetivo del filtro aerobio es reducir la carga contaminante del lixiviado proveniente de las piscinas aerobia y anaerobia, y el sedimentador, (la eliminación del 25% restante, el cual es materia orgánica difícilmente biodegradable y/o materia no orgánica).

En la gráfica 11 se registran los datos de concentración de DQO a la entrada y salida de la laguna durante los meses de estudio realizados en la investigación “EVALUACIÓN DE LAS LAGUNAS AIREADA Y ANAEROBIA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS EN EL RELLENO SANITARIO “ANTANAS” DEL MUNICIPIO DE PASTO” por EDGAR FERNANDO PONCE VALLEJO de la Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira en el año 2005.

**Gráfico 11. Concentraciones de entrada y salida de DQO<sup>1</sup>**



Los parámetros principales a monitorear en la filtración del lixiviado son: DQO, DBO5, pH, sólidos totales y sólidos suspendidos, los cuales se analizaron una vez por semana.

<sup>1</sup> PONCE VALLEJO, Edgar Fernando. EVALUACIÓN DE LAS LAGUNAS AIREADA Y ANAEROBIA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS EN EL RELLENO SANITARIO “ANTANAS” DEL MUNICIPIO DE PASTO. Palmira, 2005, 91 p. Trabajo de grado (Ingeniero Ambiental). Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. Facultad de Ingeniería y Administración. Gestión del medio ambiente.



Los parámetros anteriores se monitorearon por igual para las diferentes combinaciones de lechos filtrantes que se instalaron, y se probaron tal como lo indica la tabla 16.

**Tabla 16. Tiempo de evaluación del medio filtrante:**

<b><i>Medio Filtrante</i></b>	<b><i>Tiempo de seguimiento</i></b>
Arena	15 días
Antracita	15 días
Arena + Antracita	15 días
Arena + Antracita + Carbón Activado	15 días
Antracita + Carbón Activado	15 días

## **5.1 PROGRAMACIÓN DE MUESTREOS**

La totalidad de los muestreos para la caracterización físico-química, se ejecutaron durante el segundo semestre del año 2007, durante los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre, como se muestra en el Anexo de resultados de laboratorio Físico – Químico.

La toma de muestras fue desarrollada por el operario de la planta y los autores, las pruebas de laboratorio fueron realizadas en el laboratorio de aguas en las instalaciones de los laboratorios especializados de la Universidad de Nariño de la ciudad de Pasto.

Para cada jornada de muestreo se tomó dos litros de lixiviado antes de entrar al filtro, y dos litros de lixiviado a la salida del mismo. Una vez obtenidas las muestras a analizar, fueron llevadas inmediatamente al laboratorio para evitar la posible alteración de los resultados en los parámetros de interés. Las cantidades de afluente y efluente tomadas se determinaron por sugerencia de los Laboratorios Especializados de aguas de la Universidad de Nariño, debido a que un análisis no aporta información sobre la variabilidad de los resultados, y los químicos someten varias porciones (2 a 5) (*duplicados o replicas*) de una muestra a un procedimiento analítico completo. Cada uno de los resultados de un conjunto de medidas tiende a ser distinto a los demás, así que por lo general se considera a la *mejor* estimación como el valor central del conjunto (media aritmética).<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Fundamentos de Química analítica SKOOG, WEST, HOLER & CROUCH

## 5.2 RESULTADOS

**5.2.1 Filtro de arena + antracita:** Los resultados de los análisis de los parámetros realizados para este filtro, así como las fechas de muestreo y realización se indican en las tablas 17(a) y 18(a).

**Fecha:** 11 de septiembre de 2007  
**Filtro:** Arena + Antracita

PARAMETRO	ENTRADA FILTRO	SALIDA FILTRO
Ph	8,12	8,17
DQO mg/L	3625	2191
DBO5 mg/L	1750	960
SÓLIDOS TOTALES mg/L	8606	7092
SÓLIDOS SUSPENDIDOS mg/L	260	846

Tabla 17(a).

**Fecha:** 17 de septiembre de 2007  
**Filtro:** Arena + Antracita

PARAMETRO	ENTRADA FILTRO	SALIDA FILTRO
Ph	8	8,01
DQO mg/L	6932	4760
DBO5 mg/L	5198	3592
SÓLIDOS TOTALES mg/L	6126	6033
SÓLIDOS SUSPENDIDOS mg/L	172	100

Tabla 18(a).

Los porcentajes de remoción después de la filtración, para los diferentes parámetros se indican en las tablas 17(b) y 18(b), respectivamente:

PARAMETRO	DQO mg/L	DBO5 mg/L	SÓLIDOS TOTALES mg/L	SÓLIDOS SUSPENDIDOS mg/L
% REMOCION	39,56%	45,14%	17,59%	-225,38%

Tabla 17(b).

PARAMETRO	DQO mg/L	DBO5 Mg/L	SÓLIDOS TOTALES mg/L	SÓLIDOS SUSPENDIDOS mg/L
% REMOCION	31,33%	30,90%	1,52%	41,86%

Tabla 18(b).

En la primera semana de operación, se puede observar que respecto a la carga de DQO del afluente, el filtro proporcionó una remoción cercana al 40%; al final de la segunda semana de operación, la remoción obtenida se reduce aproximadamente hasta un 30%. De ahí se puede concluir que la eficiencia de remoción de la DQO empieza a disminuir, guardando una proporción directa con el tiempo de operación del filtro, que se determinó hasta observar la colmatación total, estudiada anteriormente en el numeral 5.2.2.1.5, en la tabla 9.

A pesar de la disminución en la remoción presentada en el segundo muestreo se observa que el filtro conserva una eficiencia aceptable en la remoción y puede ser considerado como un resultado satisfactorio dentro de la investigación.

En cuanto al parámetro del DBO se observa de igual manera una disminución en el efluente del 45% en el primer muestreo y de un 30% en el segundo; esta diferencia de lecturas conserva la proporcionalidad con el tiempo de operación del filtro.

El filtro en la remoción de sólidos totales ofrece un desempeño menor del esperado, dado que sólidos totales del efluente son apenas un 17.6% menores que los del afluente durante la primera semana, y la diferencia se reduce aun más durante la segunda semana.

Los sólidos suspendidos del efluente durante la primera semana son mayores que los del afluente; esto se puede deber a cantidad de partículas finas presentes en el material del lecho filtrante, las cuales empiezan a ser arrastradas por el lixiviado y han sido removidas completamente para la segunda semana, notándose únicamente la remoción de los sólidos suspendidos del lixiviado alcanzando un valor cercano al 42% de remoción.

**5.2.2 Filtro de antracita:** Los resultados de los análisis de los parámetros realizados para este filtro, así como las fechas de muestreo y realización se indican en las tablas 19(a) y 20(a).

**Fecha:** 5 de octubre de 2007  
**Filtro:** Antracita

PARAMETRO	ENTRADA FILTRO	SALIDA FILTRO
Ph	8,03	8,03
DQO mg/L	7524	6732
DBO5 mg/L	4021	3094
SÓLIDOS TOTALES mg/L	16565	16217
SÓLIDOS SUSPENDIDOS mg/L	7621	7238

**Tabla 19(a).**

**Fecha:** 12 de octubre de 2007  
**Filtro:** Antracita

PARAMETRO	ENTRADA FILTRO	SALIDA FILTRO
Ph	8,1	8,14
DQO mg/L	9900	8712
DBO5 mg/L	3345	2252
SÓLIDOS TOTALES mg/L	12905	9720
SÓLIDOS SUSPENDIDOS mg/L	986	1266

**Tabla 20(a).**

Los porcentajes de remoción después de la filtración, para los diferentes parámetros se indican en las tablas 19(b) y 20(b), respectivamente:

PARAMETRO	DQO mg/L	DBO5 mg/L	SÓLIDOS TOTALES mg/L	SÓLIDOS SUSPENDIDOS mg/L
% REMOCION	10,53%	23,05%	2,10%	5,03%

**Tabla 19(b).**

PARAMETRO	DQO mg/L	DBO5 mg/L	SÓLIDOS TOTALES mg/L	SÓLIDOS SUSPENDIDOS mg/L
% REMOCION	12,00%	32,68%	24,68%	-28,40%

**Tabla 20(b).**

Se puede observar que respecto a la carga de DQO del afluente del filtro anterior, el lixiviado contiene una carga de DQO mucho mayor; y durante la primera semana el filtro proporcionó una remoción apenas del 10.5% y de la cual, la lectura de la segunda semana no tiene mucha diferencia, llegando a un 12% de remoción. Cabe anotar que la carga de DQO del lixiviado a tratar en este filtro alcanza valores entre 7000 y 10000 mg/L, mientras que el filtro anterior trató lixiviado con una carga de DQO entre 3600 y 7000 mg/L.

En cuanto al parámetro del DBO se observa de una disminución en el efluente del 23% en el primer muestreo y de un 32.7% en el segundo.

Los sólidos totales removidos en la primera semana alcanzan un valor de 2.1% notándose la concentración de carga contaminante del lixiviado; esta carga contaminante disminuye para la segunda semana ya que la remoción de los sólidos totales aumentó hasta un 24.7%.

Los sólidos suspendidos del efluente durante la primera semana alcanzan un valor del 5% de manera similar al valor de los sólidos totales. En la segunda semana se nota el proceso de colmatación que se lleva a cabo dentro del filtro, dado que los sólidos suspendidos del efluente son mayores que los del afluente.

**5.2.3 Filtro de arena:** Los resultados de los análisis de los parámetros realizados para este filtro, así como las fechas de muestreo y realización se indican en las tablas 21(a) y 22(a).

**Fecha:** 29 de octubre de 2007  
**Filtro:** Arena

PARAMETRO	ENTRADA FILTRO	SALIDA FILTRO
Ph	8,09	8,13
DQO mg/L	2970	1980
DBO5 mg/L	2000	1050
SÓLIDOS TOTALES mg/L	7003	6311
SÓLIDOS SUSPENDIDOS mg/L	208	45

**Tabla 21(a).**

Fecha:

2 de noviembre de 2007

Filtro:

Arena

PARAMETRO	ENTRADA FILTRO	SALIDA FILTRO
Ph	8,11	8,11
DQO mg/L	2770	2380
DBO5 mg/L	2000	1200
SÓLIDOS TOTALES mg/L	6487	4225
SÓLIDOS SUSPENDIDOS mg/L	339	714

Tabla 22(a).

Los porcentajes de remoción después de la filtración, para los diferentes parámetros se indican en las tablas 21(b) y 22(b), respectivamente:

PARAMETRO	DQO mg/L	DBO5 mg/L	SÓLIDOS TOTALES mg/L	SÓLIDOS SUSPENDIDOS mg/L
% REMOCION	33,33%	47,50%	9,88%	78,37%

Tabla 21(b).

PARAMETRO	DQO mg/L	DBO5 mg/L	SÓLIDOS TOTALES mg/L	SÓLIDOS SUSPENDIDOS mg/L
% REMOCION	14,08%	40,00%	34,87%	-110,62%

Tabla 22(b).

El lixiviado tratado durante la implementación del filtro de arena se caracteriza por tener una carga contaminante baja respecto a los lixiviados anteriormente tratados.

Se puede observar que con una carga de 2970 mg/L en términos de DQO, la remoción obtenida durante la primera semana es de 33.3%; aunque la carga de DQO del lixiviado en la segunda semana no varía demasiado, la remoción se reduce a un 14%.

En cuanto a la DBO se observa de una disminución en el efluente del 47% en el primer muestreo y de un 40% en el segundo, observando un desempeño casi constante.

Los sólidos totales removidos en la primera semana alcanzan un valor cercano al 10% y un incremento en la remoción hasta el 35%.

Los sólidos suspendidos del efluente durante la primera semana alcanzan un valor del 78.37% debido al tamaño de los gránulos de la arena empleada; esta ventaja se

convierte en desventaja para el segundo muestreo, el cual se realiza a los 11 días dado que se observó una inminente colmatación temprana respecto a los filtros anteriores tal como se menciona en el numeral 5.2.2.2.3 y la tabla 10.

**5.2.4 Filtro de arena + carbón activado + antracita:** Los resultados de los análisis de los parámetros realizados para este filtro, así como las fechas de muestreo y realización se indican en las tablas 23(a) y 24(a).

**Fecha:** 9 de noviembre de 2007  
**Filtro:** Arena+Antracita+CA

PARAMETRO	ENTRADA FILTRO	SALIDA FILTRO
Ph	8	8,03
DQO mg/L	3445	1180
DBO5 mg/L	2000	1000
SÓLIDOS TOTALES mg/L	4142	2850
SÓLIDOS SUSPENDIDOS mg/L	1061	88

**Tabla 23(a).**

**Fecha:** 30 de noviembre de 2007  
**Filtro:** Arena+Antracita+CA

PARAMETRO	ENTRADA FILTRO	SALIDA FILTRO
Ph	8,2	8,3
DQO mg/L	5940	1544
DBO5 mg/L	4500	500
SÓLIDOS TOTALES mg/L	9907	3804
SÓLIDOS SUSPENDIDOS mg/L	460	995

**Tabla 24(a).**

Los porcentajes de remoción después de la filtración, para los diferentes parámetros se indican en las tablas 23(b) y 24(b), respectivamente:

PARAMETRO	DQO mg/L	DBO5 mg/L	SÓLIDOS TOTALES mg/L	SÓLIDOS SUSPENDIDOS mg/L
<b>% REMOCION</b>	65,75%	50,00%	31,19%	91,71%

**Tabla 23(b).**

PARAMETRO	DQO mg/L	DBO5 mg/L	SÓLIDOS TOTALES mg/L	SÓLIDOS SUSPENDIDOS mg/L
% REMOCION	74,01%	88,89%	61,60%	-116,30%

Tabla 24(b).

La implementación de carbón activado en el filtro de arena y antracita arroja buenos resultados en cuanto a la remoción de DQO, DBO5, sólidos totales y suspendidos.

En la primera semana de operación, se puede observar que respecto a la carga de DQO del afluente, el filtro proporcionó una remoción cercana al 66%; al final de la segunda semana de operación, la remoción obtenida se aumentó hasta un 74% con una carga mayor de DQO en el afluente con respecto a la primera semana, siendo las cargas de 5940 y 3445 mg/L de DQO respectivamente. De ahí se puede concluir que el uso de carbón activado aporta más de un 25% adicional en la remoción que la observada en el filtro de *Arena y Antracita*, ofreciendo un buen desempeño en la remoción de la DQO y una eficiencia que se conservó durante el tiempo de estudio.

Igualmente en la remoción de la DBO se observa una remoción de un 50% durante el primer muestreo, teniendo en cuenta las características del lixiviado mencionadas anteriormente, la carga de DBO alcanzó un valor de 2000 mg/L durante el primer muestreo y ascendió a 4500 mg/L para el segundo muestreo, en este caso el porcentaje de remoción alcanzó un valor cercano al 89%, lo que significa que la eficiencia aumentó a medida que los gránulos que están en contacto con el lixiviado al principio (parte superior del lecho) realizan la mayor parte del trabajo de adsorción y se van saturando, entonces los gránulos que se encuentran posteriormente (al fondo del lecho) inician el desarrollo de su potencial de adsorción.

De acuerdo a la cualidad mencionada en el anterior párrafo, se observa que la remoción de sólidos totales durante la segunda semana se duplica respecto a la primera, pasando de un 31% a un 61%. En cuanto a los sólidos suspendidos se observa un alto índice de remoción durante la primera semana; el cual disminuye abruptamente hacia la segunda semana; esto se puede deber a que el carbón activado granular se obtiene de la trituración de trozos más grandes, por lo tanto es estimable que contenga muchas cantidades de material fino procedente de la trituración, el cual tiende a ser arrastrado por el flujo de lixiviado a través del filtro; este arrastre se hace evidente durante la segunda semana de acuerdo a la concentración de sólidos suspendidos obtenida en el efluente del segundo muestreo, la cual alcanza un incremento de 116% respecto al afluente.

**5.2.5 Antracita + carbón activado:** Los resultados de los análisis de los parámetros realizados para este filtro, así como las fechas de muestreo y realización se indican en las tablas 25(a) y 26(a).



**Fecha:** 7 de diciembre de 2007  
**Filtro:** Antracita+CA

PARAMETRO	ENTRADA FILTRO	SALIDA FILTRO
Ph	8,12	8,12
DQO mg/L	3345	1089
DBO5 mg/L	500	400
SÓLIDOS TOTALES mg/L	3242	2520
SÓLIDOS SUSPENDIDOS mg/L	102	225

**Tabla 25(a).**

**Fecha:** 14 de diciembre de 2007  
**Filtro:** Antracita+CA

PARAMETRO	ENTRADA FILTRO	SALIDA FILTRO
Ph	8,13	8,12
DQO mg/L	5742	1683
DBO5 mg/L	2850	650
SÓLIDOS TOTALES mg/L	5245	4517
SÓLIDOS SUSPENDIDOS mg/L	102	131

**Tabla 26(a).**

Los porcentajes de remoción después de la filtración, para los diferentes parámetros se indican en las tablas 25(b) y 26(b), respectivamente:

PARAMETRO	DQO mg/L	DBO5 mg/L	SÓLIDOS TOTALES mg/L	SÓLIDOS SUSPENDIDOS mg/L
<b>% REMOCION</b>	67,44%	20,00%	22,27%	-120,59%

**Tabla 25(b).**

PARAMETRO	DQO mg/L	DBO5 mg/L	SÓLIDOS TOTALES mg/L	SÓLIDOS SUSPENDIDOS mg/L
% REMOCION	70,69%	77,19%	13,88%	-28,43%

Tabla 26(b).

En la primera semana de operación, se puede observar que respecto a la carga de DQO del afluente, el filtro proporcionó una remoción cercana al 67%; al final de la segunda semana de operación, la remoción obtenida se aumentó hasta un 70.7% con una carga mayor de DQO en el afluente con respecto a la primera semana, siendo las cargas de 5742 y 3345 mg/L de DQO respectivamente. De ahí se puede concluir que el uso de carbón activado que las ventajas del uso del carbón activado se vuelven a apreciar en cuanto a la remoción de la DQO.

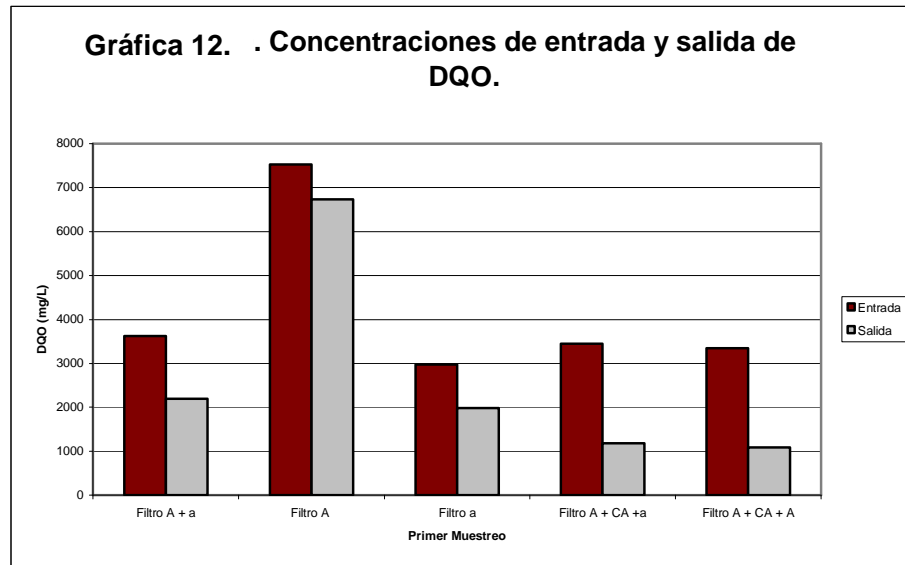
Igualmente en la remoción de la DBO se observa una remoción de un 20% durante el primer muestreo, teniendo en cuenta las características del lixiviado mencionadas anteriormente, la carga de DBO alcanzó un valor de 500 mg/L durante el primer muestreo y ascendió a 2850 mg/L para el segundo muestreo, en este caso el porcentaje de remoción alcanzo un valor cercano al 77%, obedeciendo al comportamiento descrito en el filtro anterior en cuanto a la remoción de la DBO.

La remoción de los sólidos totales disminuye hacia la segunda semana desde un 22% obtenido en el primer muestreo, hasta un 13% en el segundo.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el anterior filtro (arena + CA + antracita) en cuanto a la remoción de sólidos suspendidos se corrobora en éste la expectativa de las lecturas; observando un incremento del 120% durante el primer muestreo en comparación con la concentración de sólidos suspendidos en el afluente, y la notable reducción de este incremento hasta un 28% de concentración mayor que en el afluente durante el segundo muestreo. En comparación con el filtro anterior estos resultados se pueden deber a que la arena al estar en el fondo del lecho y contener gránulos de menor tamaño, pudo haber estado reteniendo las partículas finas del carbón activado, y que dentro del proceso de colmatación fueron arrastrados por el flujo de lixiviado tal como se evidenció durante la segunda semana del filtro en mención. Para el filtro de antracita y carbón se nota que el material fino del carbón activado es arrastrado por el flujo y durante la segunda semana la cantidad de material fino disminuye puesto que ha estado en un constante proceso de arrastre.

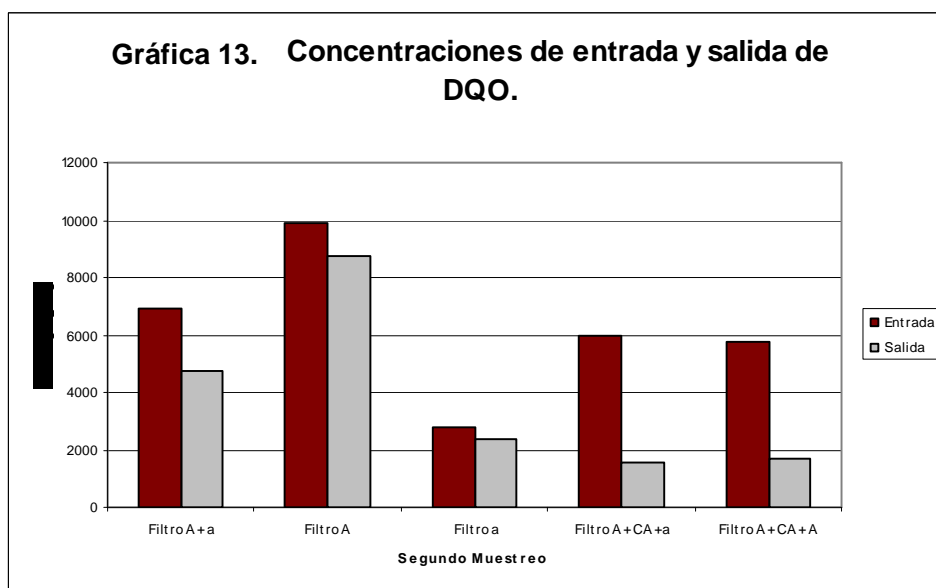
### 5.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

**5.3.1 Demanda química de oxígeno DQO:** En las gráficas 12 y 13, se registran los datos de concentración de DQO a la entrada y salida de los diferentes filtros analizados, correspondientes al primer y segundo muestreo respectivamente; aquí se pueden evidenciar las diferentes concentraciones presentes en el Lixiviado y la remoción que realizan los Filtros durante su periodo de trabajo.



De acuerdo al gráfico 12, el valor predominante de la carga de DQO oscila entre 3000 y 4000 mg/L durante el tiempo de análisis, únicamente se presenta una mayor concentración de carga a lo largo del tiempo de evaluación del filtro de antracita, con un valor entre los 7000 y 8000 mg/L.

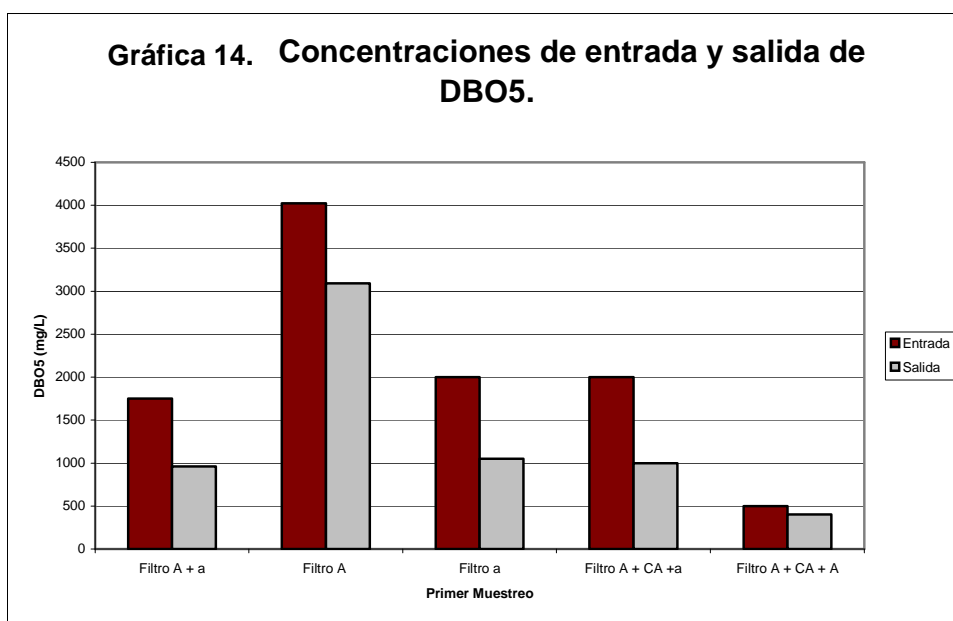
El primer muestreo de los filtros indica que los porcentajes de remoción más representativos se observan en los filtros de *arena + antracita*, *arena + CA + antracita* y *antracita + carbón activado*, siendo estos dos últimos los de mejor desempeño en la remoción de la DQO.

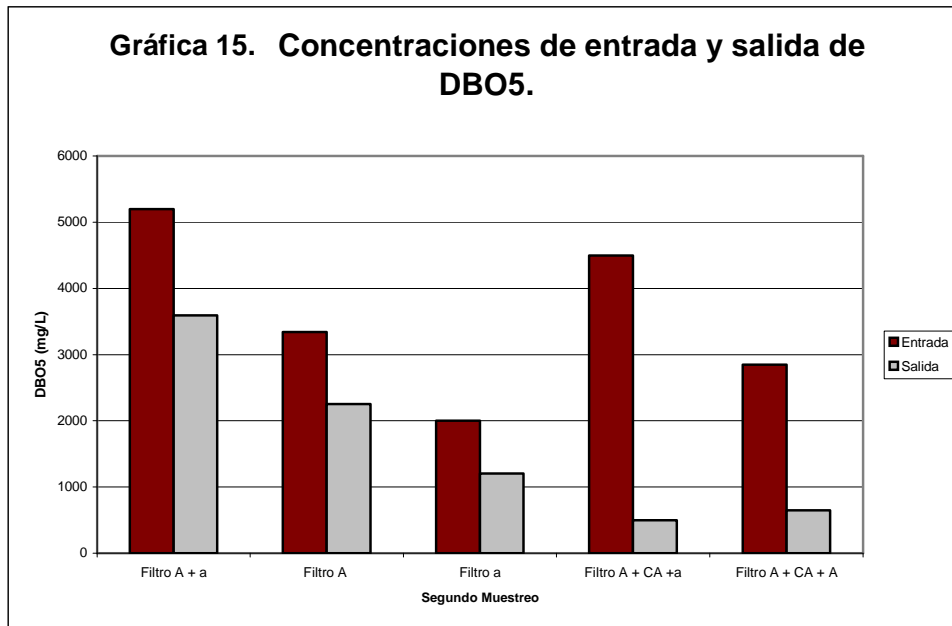


El gráfico 13 indica que el valor predominante de la carga de DQO para los segundos muestreos es variable pero se mantienen en un promedio alrededor de los 6000 y 7000 mg/L.

El segundo muestreo indica que para la segunda semana el desempeño del filtro de arena + antracita presenta una disminución en la eficiencia de remoción; el filtro de antracita, así como el filtro de arena muestran un índice de remoción bajo, dado que la concentración de DQO del efluente está próxima a la del afluente. Por el otro lado, los filtros que contienen carbón activado han incrementado la eficiencia de remoción gracias a las particularidades del carbón activado anteriormente descritas.

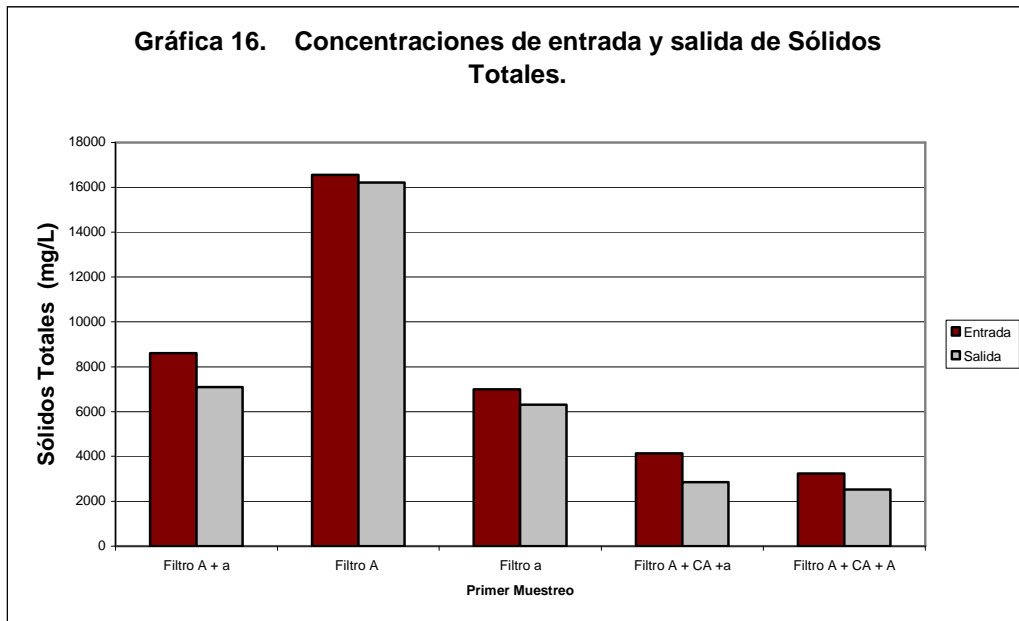
**5.3.2 Demanda química de oxígeno DBO5:** En las gráficas 14 y 15, se registran los datos de concentración de DBO5 a la entrada y salida de los diferentes filtros analizados, correspondientes al primer y segundo muestreo respectivamente; aquí se pueden evidenciar las diferentes concentraciones presentes en el Lixiviado y la remoción que realizan los Filtros durante su periodo de trabajo.



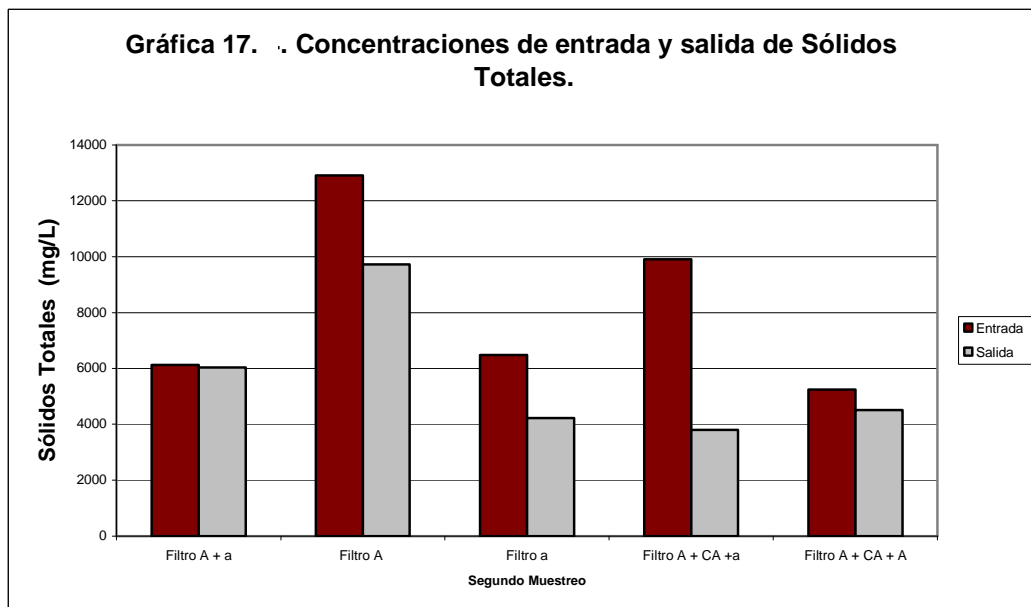


De acuerdo a los gráficos 14 y 15, se puede observar que todos los filtros a excepción del filtro de *antracita + carbón activado* presentan un desempeño aceptable en cuando a la reducción de la DBO desde la primera semana; durante la segunda semana se observa que en los filtros de *arena + antracita*, *arena + CA + antracita* y *antracita + carbón activado*, la concentración de DBO ha aumentado y su eficiencia en la reducción se ha aumentado, especialmente en los filtros con carbón activado los cuales a pesar de tener una carga alta de DBO en el afluente, presentan un alto índice de reducción, siendo el más alto el obtenido en el filtro de *arena + CA + antracita*, notándose la activación del potencial de reducción en los gránulos posteriores del carbón activado.

**5.3.3 Sólidos totales y sólidos suspendidos:** En las gráficas 16 y 17, se registran los datos de concentración de Sólidos Totales a la entrada y salida de los diferentes filtros analizados, correspondientes al primer y segundo muestreo respectivamente; aquí se pueden evidenciar las diferentes concentraciones presentes en el Lixiviado y la remoción que realizan los Filtros durante su periodo de trabajo.

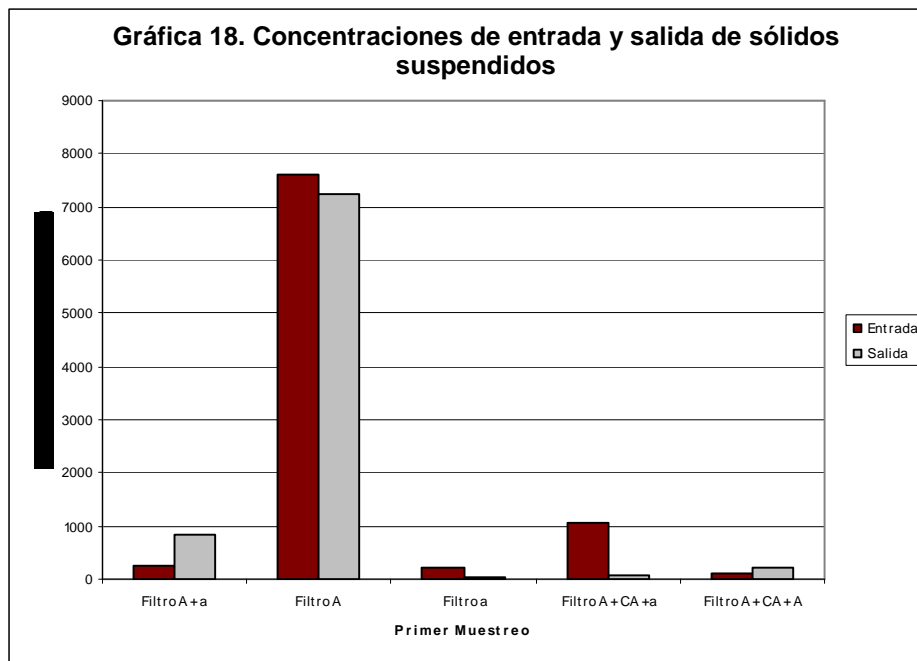


En el gráfico 16 se observa porcentajes bajos de remoción de sólidos totales durante el primer muestreo para cada concentración del lixiviado en particular, analizado en cada uno de los filtros.

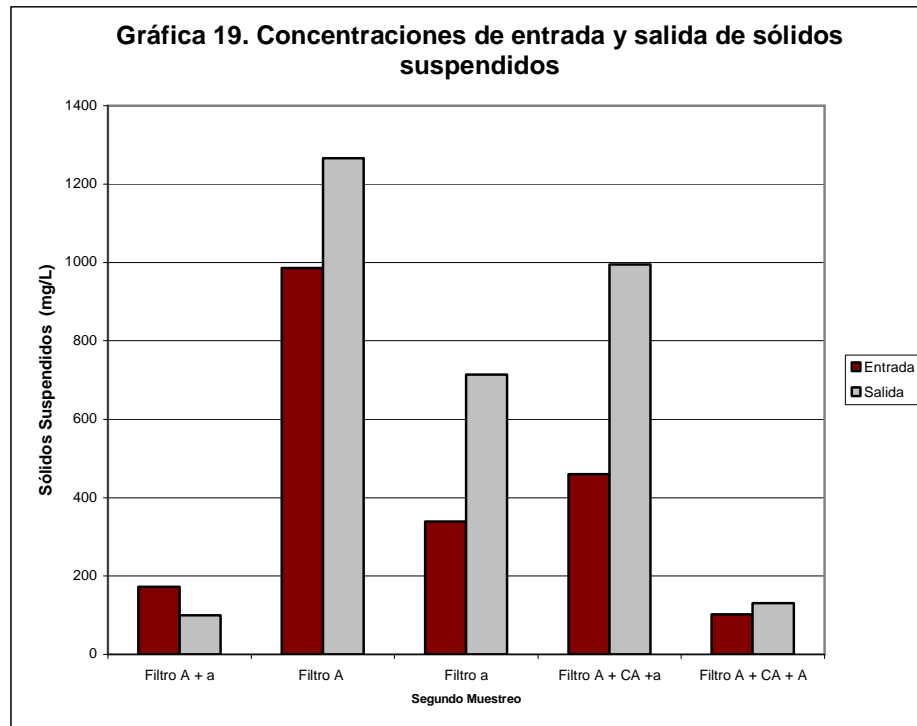


El gráfico 17 indica un mejor desempeño en la remoción de sólidos totales durante la segunda semana para el filtro de *antracita*, *el de arena* y *el de arena + CA + antracita*, mientras que los otros dos (*arena + antracita* y *antracita + CA*) disminuyeron su porcentaje de remoción. La eficiencia más notable se presenta en el filtro de *arena + CA + antracita*.

En las gráficas 18 y 19, se registran los datos de concentración de Sólidos Suspendidos a la entrada y salida de los diferentes filtros analizados, durante su periodo de estudio.



El gráfico 18 indica una baja concentración de sólidos suspendidos para todos los filtros, a excepción del filtro de *antracita*. Las remociones para este primer muestreo ofrecen un porcentaje bajo de eficiencia. En el caso de los filtros de *arena + antracita*, y *antracita + CA* se presenta un incremento en la concentración de sólidos suspendidos del efluente respecto a la concentración del afluente debido a la presencia de material fino en los gránulos de la arena y el CA, tal como se mencionó en el numeral 6.2.5. Dentro de los valores obtenidos, la remoción más representativa se obtiene en el filtro de *Arena + CA + Antracita*.



El gráfico 19 indica que para la segunda semana se muestran incrementos en la concentración de sólidos suspendidos del efluente, para todos los filtros a excepción del filtro de *Arena + Antracita*, el cual presenta una eficiencia de remoción alrededor del 50% de la concentración del afluente. El incremento observado en los otros filtros obedece al proceso de colmatación que se está llevando a cabo dentro de los lechos filtrantes, y al contenido de material fino de los mismos, mencionados anteriormente en el numeral 6.2.5.

De acuerdo al análisis de los resultados obtenidos, y a la comparación de los diferentes filtros en cada uno de los parámetros analizados se puede concluir que el filtro que mejor desempeño global ofrece es el filtro de *Arena + CA + Antracita*.



## CONCLUSIONES

- De acuerdo a la carga contaminante del lixiviado proveniente de las piscinas aerobia y anaerobia del CEPA, ubicado en el Relleno Sanitario Urbano ANTANAS, todos los lechos filtrantes analizados ofrecen reducciones de DQO; además de la reducción considerable en los parámetros de DBO y Sólidos Totales. Las reducciones obtenidas en términos de DQO (mg/l) en el proceso de filtración, previos al tratamiento químico, para cada uno de los lechos filtrantes estudiados, al final del tiempo de operación son:
  - Filtro de Arena y Antracita: entre 31 y 39%
  - Filtro de Antracita: entre 10 y 12%
  - Filtro de Arena: entre 14 y 33%
  - Filtro de Arena + Carbón Activado + Antracita: entre 65 y 74%
  - Filtro de Antracita + Carbón Activado: entre 67 y 71%

Las reducciones obtenidas en términos de DBO (mg/l) en el proceso de filtración, para cada uno de los lechos filtrantes estudiados son:

- Filtro de Arena y Antracita: entre 30 y 45%
- Filtro de Antracita: entre 23 y 32%
- Filtro de Arena: entre 40 y 47%
- Filtro de Arena + Carbón Activado + Antracita: entre 50 y 89%
- Filtro de Antracita + Carbón Activado: entre 20 y 77%

Las reducciones obtenidas en términos de Sólidos Totales (mg/l) en el proceso de filtración, para cada uno de los lechos filtrantes estudiados son:

- Filtro de Arena y Antracita: entre 1 y 17%
- Filtro de Antracita: entre 2 y 24%
- Filtro de Arena: entre 9 y 34%
- Filtro de Arena + Carbón Activado + Antracita: entre 31 y 61%
- Filtro de Antracita + Carbón Activado: entre 13 y 22%

Las reducciones obtenidas en términos de Sólidos Suspendidos (mg/l) en el proceso de filtración, para cada uno de los lechos filtrantes estudiados son:

- Filtro de Arena y Antracita: hasta un 41%
- Filtro de Antracita: hasta un 5%
- Filtro de Arena: hasta un 78%
- Filtro de Arena + Carbón Activado + Antracita: hasta un 92%
- Filtro de Antracita + Carbón Activado: no se obtuvo reducción.

- Se puede estimar que el objetivo principal de la investigación se cumplió, dado que mediante procesos meramente físicos se logra reducir la carga contaminante del lixiviado que se entregaría a un posterior tratamiento. dentro de las unidades de coagulación, floculación, sedimentación.
- Teniendo en cuenta únicamente la eficiencia en la reducción del DQO, se puede concluir que el filtro de mejor desempeño es el filtro de Filtro de Arena + Carbón Activado + Antracita, el cual ofrece reducciones entre 65 y 74% del DQO en el proceso de filtración. En cuanto a su costo de implementación no es la alternativa más viable, debido a que el uso de Carbón Activado implica que en el momento en que se deba realizar la limpieza del filtro, el Carbón Activado debe someterse a un complejo proceso de reactivación, o en su defecto, cambiarse por un nuevo material.
- El costo de los materiales y las cantidades respectivas utilizados en los lechos de cada uno de los filtros se resumen de la siguiente manera:

**Filtro de Arena + Antracita**

Material	Unidad	Precio unitario	Cantidad	Precio Total
Arena	gr	0.5	5.61	2.805
Antracita	gr	1.5	503.2	754.8
<b>costo total</b>				<b>\$ 757.61</b>

**Filtro de Antracita**

Material	Unidad	Precio unitario	Cantidad	Precio Total
Antracita	gr	1.5	754.8	1132.2
<b>costo total</b>				<b>\$ 1,132.20</b>

**Filtro de Arena**

Material	Unidad	Precio unitario	Cantidad	Precio Total
Arena	gr	0.5	1683	841.5
<b>costo total</b>				<b>\$ 841.50</b>

**Filtro de Arena +Carbón Activado+ Antracita**

Material	Unidad	Precio unitario	Cantidad	Precio Total
Arena	gr	0.5	561	280.5
Carbón Activado	gr	6	204	1224
Antracita	gr	1.5	251.6	377.4
<b>costo total</b>				<b>\$ 1,881.90</b>

**Filtro de Antracita +Carbón Activado+ Antracita**

Material	Unidad	Precio unitario	Cantidad	Precio Total
Carbón Activado	gr	6	204	1224
Antracita	gr	1.5	503.2	754.8
<b>costo total</b>				<b>\$ 1,978.80</b>

En cuanto al costo de implementación, operación y mantenimiento, la alternativa más viable es el filtro de Arena + Antracita, que aún ofrece resultados aceptables, con reducciones de DQO entre 31 y 39%, además, los lechos de Antracita y Arena se pueden someter a un sencillo proceso de retro-lavado, para posteriormente iniciar nuevas carreras de filtración.

- La mayor eficiencia en la reducción de DBO se obtuvo con los filtros cuyos lechos involucran el uso de Carbón Activado; pero su implementación se descartaría debido al inconveniente que representan los costos de operación mencionados anteriormente. Por otra parte, los filtros que contienen arena y antracita, bien sea trabajando individualmente o unidos en un filtro, ofrecen una eficiencia aceptable, siendo: Antracita + Arena hasta un 45%; Antracita hasta un 32% y Arena hasta un 47%.
- De igual manera en la reducción de Sólidos Totales se obtienen con los filtros que usan Carbón Activado, siendo el de mejor desempeño el filtro de Arena + Carbón Activado + Antracita, con un valor de reducción del 61%. Entre los filtros que no utilizan Carbón Activado, el de mejor desempeño es el filtro de Arena, cuya reducción fue hasta un 34%.
- Las reducciones de Sólidos Suspendidos fueron variables en todos los filtros, presentando tanto reducciones como incrementos en las concentraciones. Los filtros que presentaron mayor porcentaje de remoción son los filtros de: Arena + Carbón Activado + Antracita hasta un 92%; filtro de Arena hasta un 78%; y filtro de Arena + Antracita hasta un 41%.
- Los incrementos en las concentraciones de Sólidos Suspendidos se deben a que los filtros trabajan principalmente por acción de cernido con un lixiviado que no se ha sometido a un tratamiento químico previo de desestabilización. De utilizar la ayuda de un coagulante antes del proceso de filtración o situar el filtro después de los procesos de coagulación, floculación y sedimentación, se contribuiría a la formación de flóculos y se aprovecharía mejor el trabajo de los filtros, aumentando las reducciones de los sólidos, DQO y DBO por acción de los mecanismos de adhesión, floculación y absorción físico – química los cuales se harían presentes durante el proceso de filtración.
- Se apreció diferencia entre las pérdidas iniciales obtenidas con la utilización de las fórmulas diseñadas por diferentes autores, y las pérdidas iniciales observadas en campo, aunque cabe mencionar que los datos de campo siempre se mantuvieron en el rango de niveles apreciados por las diferentes teorías de filtración, ofreciendo un comportamiento aceptable para la investigación; esta diferencia se puede deber al bajo caudal con el que operaron los filtros pilotos, y que la remoción se realizó principalmente por acción de cernido y sedimentación, dado que las partículas presentes en el lixiviado afluente no fueron sometidas a ningún proceso de desestabilización mediante coagulación y/o floculación.

- Con respecto a las ecuaciones de diseño para la etapa de lavado, cabe anotar que hay diferencia entre las expansiones obtenidas y las formulas obtenidas, esto se debe a que las ecuaciones son para áreas más grandes en las cuales la frontera del tanque no afectan el movimiento de las partículas en el retro lavado.

## RECOMENDACIONES

- Considerar la investigación del desempeño de filtros aerobios de Antracita + Arena a los cuales llegaría un lixiviado proveniente de las piscinas previamente tratado con la ayuda de algún tipo de coagulante que favorezca la desestabilización de las partículas y la formación de flóculos, con el fin de aprovechar mejor la eficiencia de remoción del filtro, incrementando la acción de los diferentes mecanismos de remoción de partículas en la filtración, dado que el estudio actual indica que los mecanismos de filtración de mayor influencia son el cernido y la sedimentación.
- Dar continuidad a esta investigación evaluando el desempeño de filtros aerobios de Antracita + Arena, variando su ubicación dentro del sistema de tratamiento actual del Relleno Sanitario ANTANAS; evaluar su desempeño implementándolos al final del sistema, de ésta manera, los filtros trabajarían con un lixiviado desestabilizado químicamente, incrementando así los niveles de remoción de partículas y reduciendo el tiempo de colmatación.
- Considerar que en el caso de implementar a escala real, las paredes del filtro deben evitar el paso de la luz solar hacia el lecho filtrante, para evitar el crecimiento biológico y la consecuente colmatación prematura del sistema.
- Continuar realizando toda clase de investigaciones que conduzcan a la optimización de las diferentes unidades que conforman la Planta de tratamiento de lixiviados actual, que aunque se encuentra a la vanguardia en el país en cuanto al tratamiento y disposición de los lixiviados, aún es susceptible de mejorías.

## BIBLIOGRAFIA

ACODAL. Seminario Internacional sobre Tecnología Simplificada para Potabilización del agua. Memorias. Cali, Colombia, Agosto de 1987. 627 p. (Cleasby)

ARBOLEDA V., Jorge. Teoría, Diseño y Control de los procesos de Clarificación de Agua. Lima, CEPIS, 1975. 558 p. (Serie Técnica, 13).

Armitharajah, A. y Wetstein, P. Initial degradation of effluent quality during filtration. *Journal of the American Water Works Association*, 72(9), setiembre, 1980, pp. 518-524.

Conley W. R. y Pitman, R. W. Test program for filter evaluation at Hanford. *Journal of the American Water Works Association*, 52(2), febrero, 1960, pp. 209-218.

Di Bernardo, L. y Cleasby, J. L. Declining-rate versus constant-rate filtration. *Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE*, 106(EE6), diciembre, 1980, pp. 1023-1041.

DI BERNARDO, Luiz. Teoría de Filtración: Manual de Instrucción. Programa Regional OPS, EHP, CEPIS de Mejoramiento de Calidad de Agua para Consumo Humano, Versión Preliminar, 1981. 83 p.

Dharmarajah, A. H. y Cleasby, J. L. *Predicting the expansion behaviour of filter media*. *Journal of the American Water Works Association*, vol. 78(12), diciembre.

FAIR, Gordon M., GEYER, John C., OKUN, Daniel A. Purificación de Aguas y Tratamiento y Remoción de Aguas Residuales. México, Limusa, 1971. 764 p. (Volumen 2).

MUNERA BEDOYA, Juan Gonzalo., QUICENO RESTREPO, Carlos Arturo. Retrolavado de Filtros Granulares. Tesis Ingeniería Civil. Medellín, Universidad Nacional de Colombia. Facultad Nacional de Minas, 1978. 99 p.

PEREZ PARRA, Jorge Arturo. Expansión de Lecho contra Caudal de Lavado en un Filtro. Tesis Magíster Ingeniería Civil. Medellín, Universidad Nacional de Colombia. Facultad Nacional de Minas, 1977. 51 p

PONCE VALLEJO, Edgar Fernando. EVALUACIÓN DE LAS LAGUNAS AIREADA Y ANAEROBIA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS EN EL RELLENO SANITARIO "ANTANAS" DEL MUNICIPIO DE PASTO. Palmira, 2005, 91 p. Trabajo de grado (Ingeniero Ambiental). Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. Facultad de Ingeniería y Administración. Gestión del medio ambiente.

RICHTER, Carlos A., SCREMIN, Paulo Roriz. Lavagem dos Filtros. S.p.i. 13 p.

Segall, B. A. y Okun, D. A. Effect of filtration rate on filtrate quality. *Journal of the American Water Works Association*, 58(3), marzo, 1966, pp. 368-378.

SKOOG, Douglas, WEST, Donald, HOLLER, James, CROUCH, Stanley. Fundamentos de Química Analítica. Octava Edición, 2005 pp. 93 – 1065.

TCHOBANOGLIOUS G, ELIASSEN, Wastewater Engineering: Treatment and Reuse, McGraw-Hill's, 1970, pp. 1044-1072

TCHOBANOGLIOUS G, SCHROEDER E, Water Quality: Characteristics, Modeling, Modification, Addison-Wesley, 1985, pp 506-525.

Tuepker, J. L. Filter performance under varying operating conditions. *Proceedings of the Conference on Water Filtration*. University of Missouri at Rolla, abril, 1965.

# **ANEXOS**



**ANEXO A  
RESULTADOS DE ANÁLISIS FISCOQUÍMICO FILTRO ARENA + ANTRACITA  
(PRIMER MUESTREO)**



**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
SECCION DE LABORATORIOS**



**LABORATORIO DE QUIMICA**

Telefono: 7311449 - 7312289 - 7312895 Ext. 222 - 256

Fecha: Septiembre 11 de 2007 Analisis No. LAQ-07-716-717  
 Solicitante Richard Salas Nit. C.C N 12.749.936  
 Direccion \_\_\_\_\_ Tel. \_\_\_\_\_  
 Tipo de muestra Lixiviado  
 Analisis Solicitado Analisis Fisicoquimico Parcial  
 Sitio de Muestreo: Relleno Sanitario EMAS S.A.  
 Fecha de muestreo: (Solicitud de análisis) Septiembre 3 de 2007  
 Observaciones \_\_\_\_\_

PARAMETRO	Entrada filtro	Salida filtro
pH	8,12	8,17
DQO mg/L	3625	2191
DBOs mg/L	1750	960
Sólidos Totales mg/L	8606	7092
Sólidos Suspendedos mg/L	260	846

  
**Mabel Tupaz Enriquez**  
 Quimica T.P.Q No. 2197

*Nuestro Compromiso con la Universidad es la Excelencia*

Ciudad Universitaria- Torobajo - Teléfonos 7316850 - 7311449 Ext. 222 - 256 Telefax 7314477 - A.A. 1176 y 1176

**ANEXO B  
RESULTADOS DE ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO FILTRO ARENA + ANTRACITA  
(SEGUNDO MUESTREO)**



**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
SECCION DE LABORATORIOS**




**LABORATORIO DE QUIMICA**

Telefono: 7311449 - 7312289 - 7312896 Ext. 222 - 266

NIT: 800118964-1

Fecha: Octubre 19 del 2007 Analisis No. LAQ-07-745-746  
 Solicitante Richard Salas NIT. C.C N° 12.749.938  
 Direccion \_\_\_\_\_ Tel. \_\_\_\_\_  
 Tipo de muestra Lixiviados  
 Analisis Solicitado Fisicoquímico Prcial  
 Sitio de Muestreo: Relleno Sanitario de Antanas (EMAS)  
 Fecha de muestreo: (Solicitud de análisis) Septiembre 17 del 2007  
 Observaciones \_\_\_\_\_

PARAMETRO	RESULTADOS	
	Entrada Filtro	Salida Filtro
pH	8	8,01
Sólidos Totales mg/L	6126	6033
Sólidos Suspendidos mg/L	172	100
DBO <sub>5</sub>	5198	3592
DQO	6932	4760

  
 UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
 LABORATORIO DE QUIMICA  
 Tecnóloga Química  
 RICHARD SALAS  
 TÉCNICO

*Nuestro Compromiso con la Universidad es la Excelencia*

Ciudad Universitaria-Torobajo - Teléfonos 7316860 - 7311449 Ext. 222 - 266 Telefax 7314477 - A.A. 1175 y 1176

**ANEXO C  
RESULTADOS DE ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO FILTRO ANTRACITA  
(PRIMER MUESTREO)**



**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
SECCION DE LABORATORIOS**

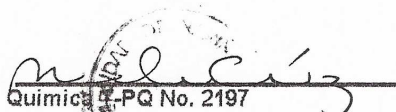


**LABORATORIO DE QUIMICA**

Telefono: 7311449 - 7312289 - 7312895 Ext. 222 - 256

Fecha:	Enero 15 de 2008	Analisis No.	LAQ-07-1024-1026
Solicitante	Richard Salas	Nit. C.C	12.749.936
Direccion		Tel.	
Tipo de muestra		Lixiviado	
Analisis Solicitado		Analisis Fisicoquimico Parcial	
Sitio de Muestreo:		Filtro Antracita. Reileno Sanitario EMAS S.A.	
Fecha de muestreo: (Solicitud de análisis)		Octubre 5 de 2007	
Observaciones			

PARAMETRO	Entrada filtro	Salida filtro
pH	8,03	8,03
DQO mg/L	7524	6732
DBO5 mg/L	4021	3094
Sólidos Totales mg/L	16565	16217
Sólidos Suspendidos mg/L	7621	7238

  
 Quimica F. PQ No. 2197

*Nuestro Compromiso con la Universidad es la Excelencia*

Ciudad Universitaria- Torobajo - Teléfonos 7315850 - 7311449 Ext. 222 - 256 Telefax 7314477 - A.A. 1175 y 1176

**ANEXO D  
RESULTADOS DE ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO FILTRO ANTRACITA  
(SEGUNDO MUESTREO)**



**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
SECCION DE LABORATORIOS**

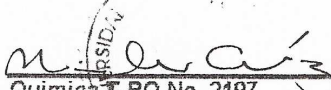


**LABORATORIO DE QUIMICA**

Telefono: 7311449 - 7312289 - 7312895 Ext. 222 - 256

Fecha:	Enero 15 de 2008	Análisis No.	LAQ-07-1026-1027
Solicitante	Richard Salas	Nit. C.C	12.749.936
Dirección		Tel.	
Tipo de muestra		Lixiviado	
Análisis Solicitado		Análisis Físicoquímico Parcial	
Sitio de Muestreo:		Filtro Antracita. Relleno Sanitario EMAS S.A.	
Fecha de muestreo: (Solicitud de análisis)		Octubre 12 de 2007	
Observaciones			

PARAMETRO	Entrada filtro	Salida filtro
pH	8,1	8,14
DQO mg/L	9900	8712
DBO5 mg/L	3345	2252
Sólidos Totales mg/L	12905	9720
Sólidos Suspendidos mg/L	986	1266

  
 Químico T.PQ No. 2197

*Nuestro Compromiso con la Universidad es la Excelencia*

Ciudad Universitaria- Torobajo - Teléfonos 7315850 - 7311449 Ext. 222 - 256 Telefax 7314477 - A.A. 1175 y 1176

**ANEXO E  
RESULTADOS DE ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO FILTRO ARENA  
(PRIMER MUESTREO)**



**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
SECCION DE LABORATORIOS**

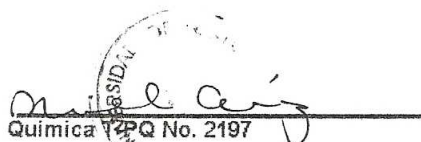


**LABORATORIO DE QUIMICA**

Telefono: 7311449 - 7312289 - 7312895 Ext. 222 - 256

Fecha: Enero 15 de 2008 Analisis No. LAQ-07-1028-1029  
 Solicitante Richard Salas Nit. C.C N 12.749.936  
 Direccion \_\_\_\_\_ Tel. \_\_\_\_\_  
 Tipo de muestra Lixiviado  
 Analisis Solicitado Analisis Fisicoquimico Parcial  
 Sitio de Muestreo: Filtro Arena. Relleno Sanitario EMAS S.A.  
 Fecha de muestreo: (Solicitud de análisis) Octubre 29 de 2007  
 Observaciones \_\_\_\_\_

PARAMETRO	Entrada filtro	Salida filtro
pH	8,09	8,13
DQO mg/L	2970	1980
DBO5 mg/L	2000	1050
Sólidos Totales mg/L	7003	6311
Sólidos Suspendidos mg/L	208	45

  
 Química FQ No. 2197

*Nuestro Compromiso con la Universidad es la Excelencia*

Ciudad Universitaria- Torobajo - Teléfonos 7315850 - 7311449 Ext. 222 - 256 Telefax 7314477 - A.A. 1175 y 1176



**ANEXO F  
RESULTADOS DE ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO FILTRO ARENA  
(SEGUNDO MUESTREO)**



**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
SECCION DE LABORATORIOS**



**LABORATORIO DE QUIMICA**

Telefono: 7311449 - 7312289 - 7312895 Ext. 222 - 256

Fecha:	Enero 15 de 2008	Analisis No.	LAQ-07-1030-1031
Solicitante	Richard Salas	Nit. C.C N°	12.749.936
Direccion		Tel.	
Tipo de muestra		Lixiviado	
Analisis Solicitado		Analisis Fisicoquimico Parcial	
Sitio de Muestreo:		Filtro Arena. Relleno Sanitario EMAS S.A.	
Fecha de muestreo: (Solicitud de análisis)		Noviembre 2 de 2007	
Observaciones			

PARAMETRO	Entrada filtro	Salida filtro
pH	8,11	8,11
DQO mg/L	2770	2380
DBO5 mg/L	2000	1200
Sólidos Totales mg/L	6487	4225
Sólidos Suspendidos mg/L	339	714

  
 Química T-PQ No. 2197

*Nuestro Compromiso con la Universidad es la Excelencia*

Ciudad Universitaria- Torobajo - Teléfonos 7315850 - 7311449 Ext. 222 - 256 Telefax 7314477 - A.A. 1175 y 1176

**ANEXO G**  
**RESULTADOS DE ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO FILTRO ARENA + CA + ANTRACITA**  
**(PRIMER MUESTREO)**



**UNIVERSIDAD DE NARIÑO**  
**SECCION DE LABORATORIOS**



**LABORATORIO DE QUIMICA**

Telefono: 7311449 - 7312289 - 7312895 Ext. 222 - 256

Fecha:	Enero 15 de 2008	Análisis No.:	LAQ-07-1032-1033
Solicitante:	Richard Salas	Nit. C.C N°:	12.749.936
Dirección:		Tel.:	
Tipo de muestra:		Lixiviado	
Análisis Solicitado:		Análisis Físicoquímico Parcial	
Sitio de Muestreo:	Filtro Antracita+Carbón activado+Arena. Relleno Sanitario EMAS S.A.		
Fecha de muestreo: (Solicitud de análisis)	Noviembre 8 de 2007		
Observaciones			

PARAMETRO	Entrada filtro	Salida filtro
pH	8,00	8,03
DQO mg/L	3445	1180
DBO5 mg/L	2000	1000
Sólidos Totales mg/L	4142	2850
Sólidos Suspendidos mg/L	1061	88

  
 Química T-PQ No. 2197

*Nuestro Compromiso con la Universidad es la Excelencia*

Ciudad Universitaria- Torobajo - Teléfonos 7315850 - 7311449 Ext. 222 - 266 Telefax 7314477 - A.A. 1175 y 1176

**ANEXO H**  
**RESULTADOS DE ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO FILTRO ARENA + CA + ANTRACITA**  
**(SEGUNDO MUESTREO)**



**UNIVERSIDAD DE NARIÑO**  
**SECCION DE LABORATORIOS**

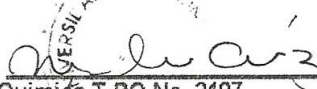


**LABORATORIO DE QUIMICA**

Telefono: 7311449 - 7312289 - 7312895 Ext. 222 - 256

Fecha:	Enero 15 de 2008	Análisis No.	LAQ-07-1034-1035
Solicitante	Richard Salas	Nit.	C.C. † 12.749.936
Dirección		Tel.	
Tipo de muestra			Lixiviado
Análisis Solicitado			Análisis Físicoquímico Parcial
Sitio de Muestreo:	Filtro Antracita+Carbón activado+Arena. Relleno Sanitario EMAS S.A.		
Fecha de muestreo: (Solicitud de análisis)	Noviembre 30 de 2007		
Observaciones			

PARAMETRO	Entrada filtro	Salida filtro
pH	8,2	8,3
DQO mg/L	5940	1544
DBO5 mg/L	4500	500
Sólidos Totales mg/L	9907	3804
Sólidos Suspendidos mg/L	480	995

  
 Química T-PQ No. 2197

*Nuestro Compromiso con la Universidad es la Excelencia*

Ciudad Universitaria- Torobajo - Teléfonos 7315850 - 7311449 Ext. 222 - 256 Telefax 7314477 - A.A. 1175 y 1176



**ANEXO I  
RESULTADOS DE ANÁLISIS FISCOQUÍMICO ANTRACITA + CA  
(PRIMER MUESTREO)**



**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
SECCION DE LABORATORIOS**



**LABORATORIO DE QUIMICA**

Telefono: 7311449 - 7312289 - 7312895 Ext. 222 - 256

Fecha: Enero 15 de 2008 Analisis No. LAQ-07-1036-1037  
 Solicitante Richard Salas Nit. C.C N° 12.749.936  
 Direccion \_\_\_\_\_ Tel. \_\_\_\_\_  
 Tipo de muestra Lixivado  
 Analisis Solicitado Analisis Fisicoquimico Parcial  
 Sitio de Muestreo: Filtro Antracita + Carbón activado. Relleno Sanitario EMAS S.A.  
 Fecha de muestreo: (Solicitud de análisis) Diciembre 7 de 2007  
 Observaciones \_\_\_\_\_

PARAMETRO	Entrada filtro	Salida filtro
pH	8,12	8,12
DQO mg/L	3346	1089
DBO5 mg/L	500	400
Sólidos Totales mg/L	3242	2520
Sólidos Suspendedos mg/L	102	225

  
 Quimica T-PQ No. 2197

*Nuestro Compromiso con la Universidad es la Excelencia*

Ciudad Universitaria- Torobajo - Teléfonos 7315850 - 7311449 Ext. 222 - 256 Telefax 7314477 - A.A. 1175 y 1176

**ANEXO J  
RESULTADOS DE ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO ANTRACITA + CA  
(SEGUNDO MUESTREO)**



**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
SECCION DE LABORATORIOS**





**LABORATORIO DE QUIMICA**

Telefono: 7311449 - 7312289 - 7312895 Ext. 222 - 256

Fecha:	Enero 15 de 2008	Analisis No.	LAQ-07-1038-1039
Solicitante	Richard Salas	Nit.	C.C N° 12.749.936
Direccion		Tel.	
Tipo de muestra		Lixiviado	
Analisis Solicitado		Analisis Fisicoquimico Parcial	
Sitio de Muestreo:		Filtro Antracita + Carbón activado. Relleno Sanitario EMAS S.A.	
Fecha de muestreo: (Solicitud de análisis)		Diciembre 14 de 2007	
Observaciones			

PARAMETRO	Entrada filtro	Salida filtro
pH	8,13	8,12
DQO mg/L	5742	1683
DBO5 mg/L	2850	650
Sólidos Totales mg/L	5245	4517
Sólidos Suspendidos mg/L	102	131

  
 Química T-PQ No. 2197  


*Nuestro Compromiso con la Universidad es la Excelencia*

Ciudad Universitaria- Torobajo - Teléfonos 7315850 - 7311449 Ext. 222 - 256 Telefax 7314477 - A.A. 1175 y 1176