

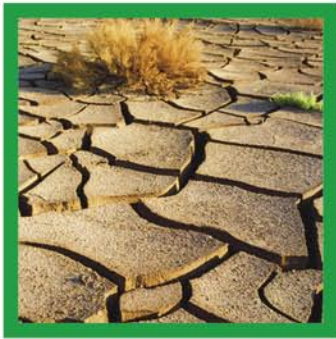
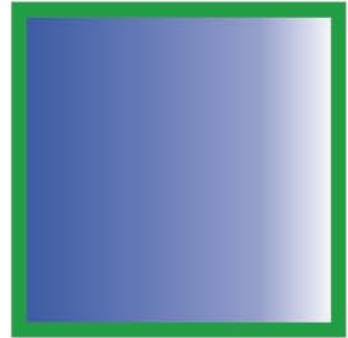
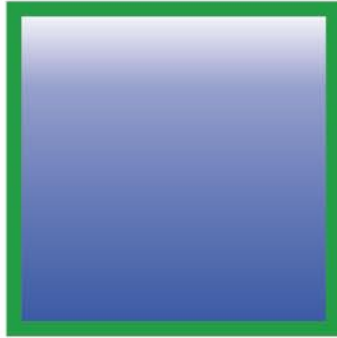


# ACOPAL

ASOCIACION COLOMBIANA DE INGENIERIA  
SANITARIA Y AMBIENTAL



Bogotá, Colombia / Diciembre de 2009 / Año 51 / Revista 224 / Tarifa Postal 578 / ISSN-0120-0798





## PRESENTACIÓN

*Este último número del año la revista tiene una connotación especial. Dada la pluralidad de afiliados de nuestra Asociación, queremos acercarnos cada vez a ellos y por eso nos interesa mucho el poder satisfacer sus intereses. Es así como, desde hace un tiempo y por sugerencia de nuestros afiliados académicos, hemos estado trabajando en la realización de una edición especializada en artículos de carácter netamente científico e investigativo.*

*En este sentido, y con el interés último de poder presentar este número ante Colciencias para que sea evaluada su inclusión en la Base Bibliográfica Nacional Publindex, presentamos en las siguientes páginas cinco artículos que cumplen con esta característica, ya que han pasado por un proceso de evaluación de expertos académicos en cada materia, con la intención de cumplir con los requisitos que se requieren para que la publicación sea incorporada en un índice de reconocimiento científico.*

*Estos requisitos, que se han venido trabajando con el Consejo Editorial de la revista -compuesto por profesionales de gran perfil académico- han tenido en cuenta los lineamientos que se han desarrollado en revistas similares..*

*Hacemos una mención especial al artículo “Influencia de los patrones de flujo en las estructuras de almacenamiento en sistemas urbanos de abastecimiento de agua”, basado en el trabajo técnico ganador del Premio ACODAL Alvaro Pardo Sánchez, realizado por los ingenieros Diego Muriel Delgado, Fabio Garzón Contreras y Carolina Mosquera Ospina.*

*Esta revista es el resultado de un arduo trabajo que culmina con su edición y con la que esperamos lograr un espacio más para beneficio de la Academia y del Sector de agua Potable, Saneamiento y Ambiente.*

# ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL

Calle 39 No. 14-75 PBX: (57) (1) 245 9539 Fax: (57) (1) 323 1407 - (57) (1) 323 1408

E-mail: presidencia@acodal.org.co - gerencia@acodal.org.co - investigacion@acodal.org.co - publicaciones@acodal.org.co - comunicaciones@acodal.org.co - atencionafiliado@acodal.org.co - Web Site: [http:// www.acodal.org.co](http://www.acodal.org.co)

Bogotá D.C. - Colombia

## Consejo Editorial

### SANTIAGO CARDONA GALLO

Ingeniero Sanitario . Ph.D. y M.Sc. Ingeniería Ambiental

### JAVIER MOUTHON BELLO

Ing. Civil con PhD en Ingeniería Ambiental

### JUAN CARLOS ESCOBAR RIVERA

Ingeniero Sanitario, MSC en ingeniería Civil (Hidráulica y Saneamiento), PhD en Ingeniería Civil (Hidráulica y Saneamiento)

### ANDRÉS EDUARDO TORRES ABELLO

M Sc Hidrología Urbana, Ph D Hidrología Urbana

### ALVARO MARTÍN GUTIÉRREZ MALAXECHEBARRIA

Ingeniero Civil, Magíster en Ingeniería Civil.

### SANDRA MÉNDEZ

Ingeniera Civil; Magíster en Ingeniería Civil.

### GABRIEL SALDARRIAGA

Ingeniero Sanitario

### BIBIAN XIMENA GARCÍA

Ingeniera Ambiental y Sanitaria; Magíster en Gestión Urbana,

### Colaboradores permanentes:

Ingeniero **LIBARDO SÁNCHEZ**, Seccional Occidente;

Ingeniero **JULIÁN BEDOYA**, Seccional Noroccidente;

Ingenieros **VENTURA MUÑOZ** y

**LUIS FRANCISCO RAMÍREZ**, Seccional Caribe.

### Coordinador Consejo Editorial:

Ingeniero **ANDRÉS EDUARDO TORRES ABELLO**

M Sc Hidrología Urbana, Ph D Hidrología Urbana

### Recepción de Artículos

revista@acodal.org.co

### Editor

Daniel Jiménez Ángel

### Mercadeo y Publicidad

Sara Teresa Ayala V.

### Diseño y Diagramación

Ramón Gutiérrez C.

### Edición Digital

Prensa Laser Comunicaciones

PBX:3420392 - 286 1391

Cra 5 N° 27 - 27 Oficina 401

info@prensaser.com

www.prensaser.com

### Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental

comunicaciones@acodal.org.co

## Contenido

5

EVALUACIÓN DEL RIESGO SANITARIO CAUSADO POR EL USO DE BIOSÓLIDOS EN EL CULTIVO DE PASTO RYEGRASS

19

RELEVANCIA AMBIENTAL DEL SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO: BOGOTÁ COMO CASO DE ESTUDIO

27

LA INFLUENCIA DE LOS PATRONES DE FLUJO EN LAS ESTRUCTURAS DE ALMACENAMIENTO EN SISTEMAS URBANOS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA

37

APLICACIÓN DE UN ALGORITMO GENÉTICO ASEXUAL AL DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE TUBERÍAS

45

LA IMPORTANCIA DE LA PREVENCIÓN DEL DETERIORO AMBIENTAL SIGNIFICATIVO EN LATINOAMERICA.

# JUNTA NACIONAL PERIODO 2008 - 2010



## MIEMBROS PERSONALES:

**Mary Luz Mejía de Pumarejo** Presidente(P)  
**Luis Anibal Sepúlveda Villada** (Suplente)  
**Freddy Augusto Santiago Molina**(Principal)  
**Geovanis Arrieta Bernate** (Suplente)

## SECTOR INDUSTRIAL Y COMERCIAL

Metalúrgica Construcel Colombia S.A. Metacol  
PVC Gerfor S.A.

## SECTOR INSTITUCIONAL DE SERVICIOS PUBLICOS DOMICILIARIOS

Presea S.A. E.S.P.  
Centroaguas S.A. E.S.P.

## SECTOR UNIVERSITARIO

Pontificia Universidad Javeriana

## SECTOR DE INGENIERÍA Y/O CONSULTORÍA

Acuatécnica S.A.

## MIEMBROS DE LAS SECCIONALES DE ACODAL:

### SECCIONAL CENTRO

Presidente  
Directora Ejecutiva

**Luis Alberto Jaramillo Gómez**  
**Sandra Constanza Martínez Manrique**

### SECCIONAL COSTA CARIBE

Presidente  
Director Ejecutivo

**Víctor Téllez Abuabara**  
**Oiden Araque Mejía**

### SECCIONAL OCCIDENTE

Presidente  
Directora Ejecutiva

**Carmen Eugenia Sterling Sadovnik**  
**Magally González Mancilla**

### SECCIONAL NOROCCIDENTE

Presidente  
Directora Ejecutiva

**Jaime Laíno Quiceno**  
**Ana Mercedes Montoya R.**

## VEEDOR

**Ignacio Restrepo Baquero**

(Principal)

## PERSONAL ADMINISTRATIVO

Gerente  
Coordinadora Técnica  
Coordinador Unidad de  
Investigación Sectorial  
Coordinadora de Afiliados

**Alberto Valencia Monsalve**  
**Bibian Ximena García M.**

**Nelson Castaño Contreras**  
**Cindy A. Rodríguez Forero**



**HELBERT**  
Calidad, experiencia y tecnología

40  
Años

**SOLUCIONES HIDRAULICAS  
PARA ACUEDUCTOS**  
Asesoría en montajes,  
instalación y puesta  
en marcha válvulas especiales  
Helbert y Cía. S.A.  
Av. Cra. 40 # 20 a - 44  
368 1077  
www.helbertycia.com  
Bogotá D.C. - Colombia

Modelo 720



Válvulas reductoras  
de presión

Válvula de control  
de nivel con piloto  
flotador



Modelo 750-66-B

Válvulas de control  
de bombas impulsoras



Modelo 740

Válvulas posicionadoras  
para control electrónico



Modelo 718-03

Modelo 730



Válvulas de alivio /  
sostenedoras de presión

Válvula de control  
de caudal



Modelo 770-U

Modelo 735-M



Válvulas  
anticipadoras de onda



www.montenegrojc.com

## Sistema Anaeróbico Múltiple Mixto

# SAMM®

Es un sistema estándar **para el tratamiento de las aguas residuales orgánicas de origen doméstico o industrial** con grandes ventajas, entre ellas:

1. Remueve más del 80% de la carga orgánica.
2. Admite variaciones de concentraciones de la DBO de caudal de más del 50% del promedio de su diseño.
3. No requiere consumo de energía eléctrica.
4. No emite ruido, humo u olores.
5. No requiere la presencia permanente de un operador.
6. La vida útil del sistema es indefinida.
7. La operación puede ser interrumpida e iniciada cuantas veces se requiera.
8. Puede instalarse bajo el nivel del suelo sin perder el uso de las zonas verdes.
9. Se adapta a las diversas condiciones del terreno.
10. Ofrece facilidad de ampliación de sus capacidades iniciales.

**NOVATEC**  
FLUID SYSTEM S. A.

Consúltenos en Cali al tel. **(2) 418 40 06** o a través del correo **novatec@novatecfs.com**

www.novatecfs.com





# EVALUACIÓN DEL RIESGO SANITARIO CAUSADO POR EL USO DE BIOSÓLIDOS EN EL CULTIVO DE PASTO RYEGRASS

Milena Beltrán Villarraga. Microbióloga Industrial\*.  
Nubia León MSc.\*\*  
Martha Liliana Cárdenas Guzmán MSc.\*  
Gerardo Moreno Durán MSc.\*  
María Claudia Campos Pinilla PhD.\*  
Carrera 7 N° 43-82. Bogotá. Colombia.  
campos@javeriana.edu.co

## Resumen

*El objetivo del presente estudio fue evaluar el riesgo sanitario causado por el uso de biosólidos en el cultivo de pasto ryegrass.*

*Se realizaron análisis de patógenos, metales pesados, características agronómicas y bromatológicas y de producción a las muestras obtenidas de los tratamientos con mezclas de suelo-biosólido y al pasto.*

*Transcurridos 26 meses de evaluación se observa que los indicadores microbiológicos de tipo bacteriano disminuyeron hasta el límite propuesto por la **Environmental Protection Agency (EPA)** para biosólidos clase A mientras que los indicadores virales y parasitarios se encontraron por encima del límite establecido para esta clasificación. La concentración de metales pesados se mantuvo bajo el límite establecido y la productividad del pasto aumentó de manera gradual durante el periodo de estudio.*

## Introducción

El tratamiento de aguas residuales genera lodos provenientes tanto de sistemas primarios como secundarios y terciarios, que posteriormente son sometidos a diversos procesos de estabilización para obtener un material conocido como biosólido.

El tratamiento primario de aguas residuales implica generalmente la sedimentación de las partículas o sólidos en suspensión que se eliminan por efecto de la gravedad. Cerca de la mitad de los sólidos suspendidos contenidos en aguas residuales se elimina por este tipo de tratamiento. Los residuos sólidos concentrados en este tratamiento se denominan lodos primarios que más adelante se pueden estabilizar para dar lugar al biosólido. Estos lodos se componen principalmente de nutrientes, patógenos, oligoelementos, y los compuestos orgánicos aportados según el tipo de agua residual tratada. La generación de lodos en este proceso puede aumentar si se adicionan sustancias químicas o coadyuvantes que permitan la unión de las partículas sólidas en suspensión.

El tratamiento secundario de aguas residuales, en caso de contar con un proceso biológico, se caracteriza por la presencia de microorganismos que consumen la materia

\* Departamento de Microbiología. Pontificia Universidad Javeriana.

\*\* Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá

**Palabras claves:** Biosólido, Contaminación fecal, Metales pesados, Pasto ryegrass, , Riesgo sanitario.[a1]

orgánica biodegradable proveniente del tratamiento primario. Al final del proceso los lodos se espesan, aumentan su volumen inicial y sedimentan por gravedad hasta la parte inferior de los tanques de proceso. Los lodos concentrados en este tratamiento se denominan lodos secundarios o lodos biológicos.

El tratamiento terciario o avanzado se utiliza en las depuradoras de aguas residuales que necesitan generar efluentes de alta calidad. Este tratamiento consiste a menudo en la adición de productos químicos para desinfectar el efluente; generalmente no se recuperan lodos en este proceso ya que la mayoría de los sólidos se incorporan en los lodos primarios y secundarios (WEF/ AWWA, 1999).

Los beneficios de la disposición de biosólidos en suelos se relacionan con el aporte de materia orgánica, macro y micronutrientes, el aumento y la capacidad de intercambio catiónico, la porosidad, la retención del agua y el incremento del pH de los suelos ácidos agilizando el establecimiento vegetal. A su vez, disminuyen los procesos de erosión, contribuyendo notablemente a mejorar los suelos y su fertilidad (Pacheco y Patiño, 2003; ADEME, 2001; Estrada, 2001; García, 2001).

En cuanto a las características biológicas que puede aportar la aplicación de los biosólidos, se observa un incremento significativo en las comunidades microbianas y por consiguiente de la actividad biológica del suelo. La mayor o menor presencia de estas comunidades refleja el mejoramiento en las características del suelo, gracias a su participación en los procesos de humificación, agregación y regulación de los ciclos biogeoquímicos.

En varios países, los biosólidos son aplicados en tierras destinadas a la agricultura al igual que en tierras que no se proyectan con fines agrícolas; ya que pueden mejorar propiedades físicas y químicas del suelo contribuyendo al crecimiento vegetal. De igual forma se aplica en suelos disturbados como lugares de explotación minera y canteras (León-Zapata y Trejos, 2005; Luna y Rojas, 2004; Pacheco y Patiño, 2003; National Research Council, 2002).

Moss y otros (2002) muestran que los biosólidos, compost y otras enmiendas orgánicas pueden producir buenos rendimientos al aplicarlos al suelo y son comparables o superiores a los cultivos que han sido tratados con fertilizantes químicos.

En muchos casos el uso de biosólidos en cultivos restaura el nitrógeno, fósforo, azufre y otros nutrientes del sue-

lo. Sin embargo, el nitrógeno es el nutriente limitante más común para el crecimiento de las plantas. Gran parte del nitrógeno que poseen los biosólidos está presente en forma orgánica y sólo puede estar disponible en el suelo a través de un proceso de mineralización.

Se ha observado que la aplicación de biosólidos reduce en un 90% la erosión de suelos que fueron utilizados para cultivo, comparados con suelos que no recibieron ningún tipo de enmienda orgánica. Aún en eventos de lluvia, las tasas de erosión y movilización de partículas causadas por la escorrentía son mínimas cuando el suelo posee esta clase de enmiendas.

En términos generales, la productividad de los cultivos por la adición de este tipo de enmiendas orgánicas se incrementa. Sin embargo el crecimiento de las plantas se puede ver afectado dependiendo del tipo de suelo, tipo de cultivo, clima, tipo de riego, prácticas de manejo de cultivos y suelo y las características de los materiales orgánicos que son aplicados.

De otra parte, los biosólidos pueden contener diferentes concentraciones de metales pesados, contaminantes orgánicos y patógenos presentes en aguas residuales, los cuales pueden limitar su uso, en especial si son empleados para cultivos de consumo directo (EPA, 2005).

Uno de los riesgos más relevantes está relacionado con la presencia de patógenos y su supervivencia en concentraciones importantes. Dichos microorganismos (bacterias, virus y/o parásitos) pueden ser causantes de enfermedades en humanos y animales por contacto directo o por consumo de alimentos cultivados con este tipo de enmienda agrícola (National Research Council, 2002).

Los metales pesados son importantes en los procesos vitales del suelo y las plantas y su influencia depende del tipo de metal y de su concentración en el medio ambiente. Sin embargo, el mayor riesgo está relacionado con la acumulación de éstos en la cadena alimenticia, ya que no se degradan en el medio ambiente y al ser poco móviles en el suelo pueden acumularse y permanecer allí por mucho tiempo (ADEME, 2001). Debido a estos riesgos, la disposición de los biosólidos para agricultura se realiza bajo condiciones controladas y dentro de los límites propuestos por la legislación vigente en cada país.

En Colombia actualmente se trabaja en la normativa para disposición de biosólidos, pero aún no hay un docu-



Tabla 1. Clasificación de biosólidos según la Norma 503 de la EPA, 2003

BIOSÓLIDO CLASE A		
PARAMETROS	UNIDADES	LIMITES
Coliformes fecales	NMP ó UFC/g PS	1000
<i>Salmonella sp</i>	NMP/4g PS	3
Enterovirus	UFP/4g PS	< 1
Huevos de helminto viables	HHV/4 g PS	< 1
BIOSÓLIDO CLASE B		
Coliformes fecales	NMP ó UFC/g PS	< 2 X 10 <sup>6</sup>

NMP: Número más probable  
 UFC: Unidades formadoras de colonia  
 UFP: Unidades formadoras de placa  
 HHV: Huevos de helminto viables  
 PS: Peso seco (en gramos)  
 Fuente: EPA, 2003

mento aprobado, razón por la cual se toma como referencia el A apartado 503 de la norma 40 CFR de la EPA (Reglamento sobre generación, uso y disposición de biosólidos de 2003). En dicho reglamento se propone la clasificación de los biosólidos de acuerdo con la concentración de patógenos en Clase A y Clase B. Los biosólidos clase A no contienen patógenos a niveles detectables y cuentan con bajas concentraciones de coliformes fecales. Estos biosólidos pueden ser aplicados sin ningún tipo de restricción. El biosólido Clase B es aquel que presenta una concentración mayor de coliformes fecales y presencia de patógenos a niveles detectables (Tabla 1). Los biosólidos clase B pueden ser aplicados en suelos, pero se deben tener en cuenta ciertas restricciones para ser utilizados; como el tiempo de espera para sembrar un cultivo en la zona enmendada o para permitir el paso de personas o animales, distancia a fuentes de agua superficial y subterránea, época del año y tipo de cultivo. De igual forma se establecen las concentraciones máximas de metales en los biosólidos que van a ser aplicados; estas son las concentraciones límite, parámetro que también se consideró en el análisis del presente estudio (EPA, 2005).

La ciudad de Bogotá cuenta con la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales El Salitre (PTAR Salitre) que trata aguas principalmente de tipo doméstico que se originan en el norte de la ciudad de Bogotá. Esta planta opera con un caudal de tratamiento de 4 m<sup>3</sup>/s de aguas residuales, y mediante un tratamiento primario químicamente asistido logra remover el 40% de la materia orgánica expresada como demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y el 60% de los sólidos suspendidos. Diariamente, esta planta produce entre 130 a 150 toneladas de biosólidos.

Estos biosólidos se generan a partir de lodos primarios, los cuales son sometidos a procesos de espesamiento, digestión anaerobia y deshidratación dentro de la misma planta de tratamiento. La digestión permite a los microorganismos

descomponer la materia orgánica presente en los lodos y bajo condiciones anaerobias eliminar algunos patógenos. Finalmente la deshidratación de lodos permite el secado parcial de los lodos digeridos para reducir su volumen, disminuir el porcentaje de humedad presente y facilitar su transporte.

Estos biosólidos son fuente de nutrientes principalmente de nitrógeno, fósforo y potasio, además de materia orgánica; características que los hacen ideales para uso en la agricultura. No sobrepasan los límites máximos para metales pesados, según la normativa de la EPA, pero en el caso de los patógenos presentan concentraciones propias de biosólido clase B, según los estudios de seguimiento realizados en la PTAR Salitre (EAAB, 2006-2007). En la actualidad se evalúa la posibilidad de la disposición y aprovechamiento de estos biosólidos como enmienda orgánica en suelos de la Sabana de Bogotá, ya que en esta zona predomina la industria de producción lechera, y para su mantenimiento es necesario contar con suelos que produzcan pastos en abundancia y de buena calidad para el consumo del ganado vacuno. Es por esta razón, que los objetivos de este estudio fueron evaluar la producción de pasto ryegrass en mezclas de suelo de la zona con biosólido, analizando el comportamiento de los patógenos presentes tanto en las mezclas como en los pastos cosechados y de igual manera, evaluar la concentración de metales pesados presentes, las características agronómicas de las mezclas realizadas y la calidad nutricional de los pastos.

Transcurrido el periodo de estudio se encontró que la producción del pasto mantuvo a lo largo del estudio valores ascendentes que sobrepasaron el rango promedio de producción (ton/ha) reportado para el cultivo de pasto ryegrass en Colombia.

La concentración inicial de coliformes fecales (indicadores bacterianos) y de fagos somáticos (indicadores virales) en las mezclas realizadas y en el pasto cosechado, disminuyó a niveles aceptables por la normativa. Sin embargo, los indicadores parasitarios en las mezclas continúan fuera de norma pero ausentes en los pastos.

En relación a los metales pesados estuvieron presentes en el suelo en concentraciones que no sobrepasaron el límite de la norma EPA. En cuanto a las condiciones agronómicas del suelo, éstas mejoraron notablemente. Las características nutricionales del pasto son buenas ya que se observa aumento de la fibra, lo que generó pastos más digeribles y apetecidos por el ganado de la zona.

## Metodología

**Características de la zona de estudio.** El estudio se realizó en la Estación Experimental de la Universidad Javeriana, Finca San Javier, localizada en el municipio de Cogua (Cundinamarca), aproximadamente a 50 km de la ciudad de Bogotá. La zona se encuentra ubicada a una altura sobre el nivel del mar de 2600 m. La temperatura ambiente oscila entre 12 y 18 °C y la precipitación promedio anual se encuentra entre 1000 y 2000 mm (Cárdenas, 2006).

La sección del terreno en la cual se realizó el montaje de las parcelas presenta una topografía plana, con pendientes inferiores al 1 %, y tiene un área aproximada de 4000 m<sup>2</sup>. Los suelos de la zona son suelos pobremente drenados, superficiales, de texturas medias a moderadamente finas y de baja evolución. Se caracterizan por presentar alta saturación de bases, mediana a baja capacidad de intercambio catiónico, mediana a baja saturación de aluminio, contenidos medios a bajos de potasio y fósforo; los niveles de calcio son medios y los de magnesio son bajos; son de reacción extremada a muy fuertemente ácida y fertilidad baja y han sido clasificados como suelos franco-arcillosos con pH tendiente a la acidez (pH: 4.8 - 5.0) (IGAC, 2000). **Preparación de la zona de estudio para el experimento.** Como paso preliminar, se adecuó el terreno retirando del suelo aquellos materiales que pudieran interferir con la prueba. Para erradicar el pasto presente en el área, se adicionó *Roundup* (glifosato), un herbicida que afecta gramíneas destruyendo sus raíces. Se descompone fácilmente al entrar en contacto con el suelo, por lo cual no tiene efectos sobre el nuevo cultivo. La EPA menciona que el glifosato en contacto con el suelo es absorbido fuertemente aún en suelos con bajos contenidos de arcillas y materia orgánica; evitando de esta manera el posible efecto sobre siembras posteriores y aunque es altamente soluble en agua, se considera que es inmóvil o casi inmóvil, permaneciendo en las capas superiores del suelo, siendo poco propenso a la percolación y con bajo potencial de esorrentía. Sin embargo, Cox (1995) afirma que el glifosato se libera fácilmente de las partículas del suelo pudiendo ser muy móvil. Por ejemplo en un suelo, 80 % del glifosato adicionado se libera en un período de dos horas.

Posteriormente, se inició la construcción de las parcelas en forma de camas levantadas rectangulares utilizando tablonces de madera de 0.20 m de altura, para delimitar los espacios donde se dispusieron cada una de las mezclas. Cada parcela se aisló de las restantes a través de una tira de plástico de 0.30 m que se colocó alrededor de los tablonces, con el fin de impedir que el suelo saliera de la cama y pudiera

contaminar los caminos y/o las camas vecinas. Las parcelas tuvieron un tamaño de 9 m x 6 m, para un área de 54 m<sup>2</sup> por parcela con un total de 1320 m<sup>2</sup>. La profundidad de cada parcela era de 15 cm. El espacio entre cada cama fue de 1 metro. **Montaje de las mezclas.** El suelo superficial utilizado para preparar las mezclas se extrajo con una retroexcavadora y se dispuso en forma de pilas. El biosólido utilizado en el montaje de las mezclas fue transportado desde la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) El Salitre a la Estación Experimental de la Universidad Javeriana. Las características físicas, químicas y microbiológicas y la concentración de metales pesados presentes en los biosólidos de la planta El Salitre se encuentran descritas en la *Tabla 2*.

En el experimento se montaron 3 tratamientos con diferentes proporciones de mezcla de suelo con biosólido y 2 controles (suelo y biosólido). Cada tratamiento y control se construyó con 3 repeticiones distribuidas al azar, para un total de 15 parcelas. Las proporciones de mezcla utilizadas fueron las siguientes: Tratamiento 1 (T1): Mezcla de 3 Partes de Suelo + 1 Parte de Biosólido (75 % S - 25 % B), Tratamiento 2 (T2): Mezcla de 2 Partes de Suelo + 1 Parte de Biosólido (66.6 % S - 33.4 % B), Tratamiento 3 (T3): Mezcla de 1 Parte de Suelo + 1 Parte de Biosólido (50 % S - 50 % B). Los controles fueron: Control Suelo (CS): 1 Parte de Suelo + 0 Partes de Biosólido (100 % S - 0 % B) y Control Biosólido (CB): 0 Partes de Suelo + 1 Parte de Biosólido (0 % S - 100 % B). Estas proporciones se montaron con base en un estudio preliminar realizado por Luna y Rojas (2004) en el cual se utilizaron este tipo de mezclas en suelos para el cultivo de rábanos.

La *Figura 1* muestra la distribución de los tratamientos y sus repeticiones. **Siembra de las parcelas montadas.** La siembra de la semilla de pasto ryegrass (*Lolium perenne*) variedad comercial Boxer se realizó al voleo, distribuyendo manualmente toda la semilla sobre el área de cada parcela experimental. La dosis de siembra fue de 25 kg/ha (Cárdenas, 2006). **Muestreo.** El periodo de muestreo fue del 2 de Septiembre de 2005 al 7 de Noviembre de 2007. El primer periodo de evaluación finalizó el 5 de Enero de 2006 y se tomaron muestras de las mezclas biosólido - suelo para análisis microbiológicos (a los 0, 30, 60, 75 y 120 días) y muestras para análisis de metales pesados (a los 0 y 120 días). En las muestras de pasto se realizaron análisis microbiológicos y de productividad (a los 120, 165 y 210 días).

El segundo período de evaluación fue del 7 de Mayo de 2007 al 7 de Noviembre de 2007. Durante este tiempo, se realizaron dos muestreos y se recogieron muestras tanto de mezclas de suelo-biosólido como de pasto para análisis

**Tabla 2. Características físicas, químicas, microbiológicas y concentración de metales pesados en el Biosólido de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales el Salitre. Bogotá.**

Características físicas *			
Parámetro	Unidades	Biosólidos PTAR El Salitre	
Humedad	%	67	
Sequedad	%	33	
Sólidos volátiles	%	16.3	
Producción	Toneladas/día	145	
Características químicas *			
Parámetro	Biosólidos PTAR El Salitre		
pH	7.51		
Materia orgánica	16.3 %		
Nitrógeno	2.5 %		
Fósforo	8608 ppm		
Calcio	2.16 meq/100g		
Magnesio	13.78 meq/100g		
Potasio	0.76 ppm		
Sodio	0.76 meq/100g		
Hierro	470 ppm		
Manganeso	9.1 ppm		
Zinc	1007.5 ppm		
Boro	30 ppm		
Capacidad de Intercambio Catiónico	104 meq/100g		
Características microbiológicas *			
Parámetro	Unidades	Biosólido PTAR El Salitre	Norma EPA 40 CFR 503
Coliformes fecales	UFC/g PS	1.0 X 10 <sup>6</sup>	< 1 X 10 <sup>3</sup> (Clase A) < 2 X 10 <sup>6</sup> (Clase B)
Fagos somáticos	PFP/4g PS	2.5 X 10 <sup>6</sup>	< 1 (Clase A)
Huevos de helmintos viables	HH viables/4g PS	7.34	< 1 (Clase A)
Concentración de metales pesados *			
Parámetro	Biosólido PTAR El Salitre (mg/Kg)	Norma EPA 40 CFR 503- Límites máximos en mg/Kg	
Arsénico	18.6	75	
Cadmio	76	85	
Cobre	163.4	4300	
Cromo	72.5	3000	
Mercurio	8	57	
Níquel	42.9	420	
Plomo	87.5	840	
Selenio	24.4	100	
Zinc	1014.2	7500	

\* Datos mensuales promedio período 2006-2007  
 meq/100 g: miliequivalentes por cien gramos; ppm: partes por millón  
 PS: Peso seco  
 ST: Sólidos Totales  
 UFC/g ST: Unidades Formadoras de Colonias por gramo de sólidos totales.  
 PFP/g 4 ST: Unidades Formadoras de Placa por cuatro gramos de sólidos totales.  
 HH/g 4 ST: Huevos de helmintos viables por cuatro gramos de sólidos totales.  
 Fuente: EAAB, 2006-2007; EPA, 2003.

**Figura 1. Distribución de los tratamientos y sus repeticiones**

CSa	T3c	CSc
T3a	CBc	
T1a	CSb	
T2a	T2b	
CBa	T1b	
T3b	T2c	
CBb	T1c	

Tratamiento 1 (T1): Mezcla de 3 Partes de suelo + 1 Parte de biosólido (75 % S - 25 % B).  
 Tratamiento 2 (T2): Mezcla de 2 Partes de suelo + 1 Parte de biosólido (66 % S - 33 % B).  
 Tratamiento 3 (T3): Mezcla de 1 Parte de suelo + 1 Parte de biosólido (50 % S - 50 % B).  
 Control suelo (CS): Mezcla de 1 Parte de suelo + 0 Partes de biosólido (100 % S - 0 % B).  
 Control Biosólido (CB): Mezcla de 0 Partes de suelo + 1 Parte de biosólido (0 % S - 100 % B).  
 a: Primera réplica - b: Segunda réplica - c: Tercera réplica  
 Fuente: Cárdenas, 2006

microbiológicos, análisis de metales pesados y de productividad.

Los dos muestreos para análisis fisicoquímicos y agronómicos de mezclas de suelo-biosólido y el análisis foliar y bromatológico de pasto se realizaron durante del segundo periodo de evaluación.

Las muestras de las mezclas y controles para el análisis microbiológico, metales pesados, fisicoquímicos y agronómicos se tomaron de los cuatro extremos y en el centro de cada tratamiento a 20 cm de profundidad, haciendo un pequeño hoyo con un palustre. Cada porción de muestra de estos 5 puntos se dispuso en una balde plástico en el cual se hacía una mezcla homogénea de las porciones tomadas y a partir de esta mezcla se disponía una porción representativa en una bolsa de cierre hermético debidamente marcada, diferente para cada análisis. Finalmente, el transporte de las muestras para análisis microbiológico se llevó a cabo en neveras de icopor a una temperatura de 4 °C. Las muestras recolectadas para los demás análisis se mantuvieron a temperatura ambiente (IGAC, 2007).

Para el análisis microbiológico, de metales pesados, bromatológicos y de materia foliar se tomaron subporciones

del pasto en los cuatro extremos y en el centro de cada tratamiento, a unos 5 cm por encima del suelo. Cada porción de muestra de estos 5 puntos se dispuso en una bolsa de cierre hermético debidamente marcada, diferente para cada análisis. Para el análisis de productividad se utilizó un recuadro de balsa de 20 cm x 20 cm de largo y 5 cm de altura, el cual era arrojado al azar en diferentes puntos de la parcela. El corte del pasto se hacía de los puntos en los cuales caía el recuadro. El recuadro se arrojaba 5 veces y, en cada ocasión, el pasto era recolectado en una bolsa de plástico diferente, para un total de 5 muestras de pasto por parcela. El pasto crecía a un altura mayor de 15 cm por tanto no era arrancado o cortado desde sus raíces, únicamente se tomaba la muestra de manera superficial. Se conservaron las muestras en neveras de icopor a una temperatura de 4 °C

para análisis microbiológicos y análisis de metales pesados y a temperatura ambiente para análisis de productividad (CIAA, 2006).

Paralelo al proceso de toma de muestras, se realizó la medición de la temperatura de cada parcela y se organizó a partir del primer muestreo un monitoreo diario de la temperatura ambiente y las precipitaciones en la zona mediante instrumentos de medición (termómetro de máxima y de mínima y pluviómetro) dispuestos apropiadamente. Es necesario aclarar que las parcelas se mantuvieron al aire libre y el riego era natural, es decir proveniente de las precipitaciones de la zona, cuyos datos se tomaron diariamente durante todo el tiempo de estudio; sin embargo, en épocas de intenso verano era necesario realizar riego a las parcelas con agua que se captaba por medio de una canal natural que posee la finca y se bombeaba hasta un tanque de almacenamiento para posteriormente realizar el riego a las parcelas.

**Análisis de las muestras.** Para el análisis microbiológico fue necesario realizar una elusión previa por tratarse de matrices sólidas. Por tanto, las técnicas que aparecen a continuación se describen de la siguiente manera: en primer lugar, se menciona la técnica empleada para pasar los microorganismos de la fase sólida a la fase líquida y en segundo lugar, se encuentra la técnica empleada para el procesamiento de dicha fase acuosa, excepto para el caso del análisis de coliformes fecales (en suelo y pasto) y el análisis de huevos de helmintos (en suelo) que incluyen la técnica de elusión en el mismo protocolo.

Los análisis microbiológicos realizados a las muestras de mezclas de suelo y al pasto fueron: coliformes fecales en suelo y pasto (EPA 625-R-92-013, 2003), fagos somáticos en suelo (Lasobras y otros, 1999; ISO 10705-2, 1999), fagos somáticos en pasto (Dubois y otros, 2006; ISO 10705-2, 1999), huevos de helmintos en suelo (Norma Oficial Mexicana, 2002) y huevos de helmintos en pasto (Kozan y otros, 2005 y Norma Oficial Mexicana, 2002).

Los análisis de metales pesados realizados a las muestras de mezclas de suelo y al pasto fueron: Arsénico, Cadmio, Cobre, Cromo, Molibdeno, Níquel, Plomo, Selenio y Zinc mediante el Método IC Plasma (Acoplamiento Inductivo) y de Mercurio mediante el Método de Absorbancia Atómica.

El análisis de productividad del pasto ryegrass se realizó pesando las cinco muestras de pasto obtenidas de cada parcela en gramos y convirtiéndolos a ton/ha.

Los análisis fisicoquímicos y agronómicos de las mezclas suelo-biosólido realizados a las muestras fueron: textura (método *Bouyoucos*), acidez intercambiable (con KCl), conductividad (en extracto de saturación), carbono orgánico (método *Walkley-Balck*), fósforo disponible (método *Bray II*), capacidad de intercambio catiónico y bases intercambiables (con acetato de amonio), elementos menores (extracción con DPTA), boro disponible (agua caliente), azufre extractable con Ca(HPO) 2 0.008M, nitrógeno total (método de *Kjeldalh*), nitratos y amonio (KCl<sub>2</sub>N) y carbonato de calcio (HCl 10 %). Los análisis de materia foliar realizados a las muestras de pasto fueron: nitrógeno (método de *Kjeldalh*), fósforo y boro (colometría), azufre (turbidimetría), potasio, calcio, magnesio, sodio, hierro, manganeso, cobre y zinc (absorción atómica) y los análisis bromatológicos realizados a las mismas muestras fueron: fibra detergente neutro, fibra detergente ácido, hemicelulosa, lignina, sílice y proteína cruda (resultados en base 95 % en materia seca) amonio y nitratos (destilación). **Análisis Estadístico.** El diseño del experimento fue completamente al azar. El análisis estadístico se realizó con los datos expresados en unidades logarítmicas en base 10, por gramo de peso seco, mediante el análisis de varianza (ANOVA) para buscar si había o no diferencias significativas en cuanto a la concentración de microorganismos y producción de pasto en los tratamientos evaluados (STAR GRAPHICS versión Centurión XV, 2006).

En el programa estadístico, la prueba F en la tabla ANOVA determina si hay diferencias estadísticamente significativas entre las medias que se analizaron con un valor  $P > 0.05$  con una confiabilidad de 95 %.

## **Resultados y Discusion**

**Análisis microbiológicos de las mezclas de suelo-biosólido.** En la *Tabla 3* se puede observar la concentración promedio de coliformes fecales en los diferentes tratamientos y controles comparando los resultados del primer y último muestreo de la primera evaluación realizados en el día 0 y a los 4 meses con los obtenidos a los 20 meses y 26 meses. Los resultados correspondientes al muestreo realizado a los 30, 60 y 75 días no se presentan en las tablas ya que no se observaron diferencias significativas entre los resultados de concentración obtenidos para este indicador bacteriano.

Desde el establecimiento de las parcelas hasta el muestreo final, los porcentajes de reducción total obtenidos para este indicador bacteriano presentaron valores del 81 % para T1, seguido por T2 con un valor de reducción del 80 % y finalmente para T3 del 63 %. En el caso de los controles, el

**Tabla 3. Resultados promedio de coliformes fecales en suelo de los diferentes tratamientos y controles de los muestreos de Septiembre 2005, Enero 2006, Mayo 2007 y Noviembre 2007**

n = 60				
COLIFORMES FECALES UFC/gST				
TRATAMIENTO	Septiembre 2005	Enero 2006	Mayo 2007	Noviembre 2007
T1	4.0 x 10 <sup>6</sup>	7.9 x 10 <sup>4</sup>	<1.7 x 10 <sup>1</sup> *	1.7 x 10 <sup>1</sup>
T2	3.2 x 10 <sup>6</sup>	2.0 x 10 <sup>4</sup>	2.7 x 10 <sup>2</sup>	2.1 x 10 <sup>1</sup>
T3	1.0 x 10 <sup>6</sup>	2.0 x 10 <sup>4</sup>	<1.9 x 10 <sup>1</sup> *	1.7 x 10 <sup>2</sup>
CS	3.6 x 10 <sup>2</sup>	1.3 x 10 <sup>1</sup>	<1.6 x 10 <sup>1</sup> *	<1.6 x 10 <sup>1</sup> *
CB	7.9 x 10 <sup>5</sup>	1.6 x 10 <sup>5</sup>	2.4 x 10 <sup>2</sup>	<2.6 x 10 <sup>1</sup> *

n = Número de muestras analizadas.  
 UFC/g ST: Unidades Formadoras de Colonia por gramo de Sólidos Totales.  
 \*: Límite de Detección de la técnica.

porcentaje de reducción total para el control biosólido fue de 76 %, mientras que para el control suelo fue de 53 %.

Se observa que la concentración final de coliformes fecales para el tratamiento 3 fue de  $1.7 \times 10^2$  UFC/g ST lo que evidencia el aumento de la población bacteriana en 1 unidad logarítmica. Este aumento se puede presentar debido al recrecimiento poblacional, el cual ocurre cuando algunos de los microorganismos después de un periodo de condiciones adversas se recuperan e inician de nuevo su reproducción. A pesar de que en el tratamiento 3, los coliformes fecales no se redujeron hasta la misma unidad logarítmica ( $10^1$  UFC/g ST) presentada en todos los demás tratamientos y en los controles, tuvieron la misma tendencia de reducción al disminuir más de 3 UL desde el establecimiento de las parcelas.

Las concentraciones finales encontradas para coliformes fecales en todos los tratamientos y controles cumplen con los requerimientos de un biosólido Clase A (Apartado 503 de la EPA, 2005), ya que el límite dado por esta normatividad es inferior a  $1.0 \times 10^3$  NMP o UFC/g ST de coliformes fecales, con lo cual se puede considerar que el riesgo sanitario por este tipo de microorganismos es mínimo.

La disminución en la concentración de microorganismos se presenta gracias a la acción de diversos factores ambientales como lluvia, luz solar, humedad y pH. Sin embargo, puede presentarse supervivencia mínima de algunas poblaciones que en este caso no sobrepasan el límite propuesto por la EPA para un biosólido clase A.

Estrada y otros (2004) mostraron que si existen condiciones ambientales favorables y hay disponibilidad de nutrientes provenientes del biosólido, las reducciones de pa-

tógenos son menores, especialmente cuando la cantidad de biosólido en relación al suelo es mayor.

La humedad influye directamente en la supervivencia de los coliformes, tal y como reporta Lang y otros (2003), quienes analizaron el comportamiento de *E.coli* como bacteria indicadora de contaminación fecal en suelos tratados con biosólidos. El suelo usado era ácido con textura arenosa y el biosólido utilizado había sido tratado mediante un proceso de digestión anaerobia. Se encontró que 56 días después de la aplicación, se presentaba una reducción de esta bacteria de 2-3 unidades logarítmicas (UL). La humedad cumplió un papel importante ya que cuando se encontraba cercana a la capacidad de campo, las poblaciones se mantenían constantes. Cuando este parámetro disminuía, la concentración de *E. coli* también lo hacía y cuando incrementaba por el efecto de las lluvias, estos microorganismos también aumentaban su concentración.

Gibbs y otros (1997) investigaron la supervivencia y el potencial de recrecimiento de microorganismos en mezclas de suelos arenosos con biosólido, encontrando que las concentraciones iniciales de coliformes fecales y estreptococos eran de  $10^4$  UFC/g. Luego de 12 semanas las concentraciones de ambos microorganismos descendieron a niveles por debajo del límite de detección, pero incrementaron a la semana 19 después de un evento de lluvia, el cual provocó un aumento en la humedad de 1 a 22 %.

En el presente estudio se observa que la concentración de coliformes fecales en los tratamientos y controles alcanzaron las concentraciones límite dadas por la normatividad y que aún bajo condiciones de humedad alta (entre 22 y 59 % para los tratamientos y entre 35 y 63 % para los controles), dichas concentraciones presentaron una disminución paulatina.

Por otra parte, no se debe dejar de lado la influencia de otros factores como los medio ambientales que limitan la supervivencia y desarrollo de los microorganismos en el suelo. Lang y otros (2003) indican que los microorganismos entéricos se adaptaban pobremente para sobrevivir en el ambiente y su supervivencia se ve alterada por muchos factores que incluyen la temperatura, lluvias y desecación por la luz solar.

El rango de temperatura del suelo durante los muestreos realizados al inicio del establecimiento de las parcelas desde el 2 de Septiembre de 2005 a Enero 2006 se encontró

entre 9 y 20 °C en los tratamientos y controles; estos valores corresponden a los rangos psicrófilo y mesófilo. Sin embargo, durante los muestreos realizados a partir de Mayo 2007 a Noviembre de 2007 la temperatura del suelo se mantuvo en un rango entre 11 y 13 °C; valores que se encuentran dentro del rango psicrófilo, en el cual se presenta limitación del desarrollo bacteriano.

La incidencia de las precipitaciones en la zona también es parámetro que influye en el mantenimiento de microorganismos en el suelo tratado con biosólido. Zaleski y otros (2005) encontraron que bajo condiciones de suelo favorables no limitadas para los microorganismos, algunas poblaciones de patógenos sobreviven y crecen luego de un evento de lluvia; en otros casos ocurre el evento de lluvia y la población de patógenos decrece por debajo del umbral crítico requerido para el recrecimiento, y por tanto la concentración no vuelve a aumentar. Finalmente, se puede dar el caso donde ocurre el evento lluvioso cuando la población inicialmente se encuentra en baja concentración, pero si esta concentración de microorganismos permanece todavía por encima del umbral crítico entonces da lugar al recrecimiento. Los datos de los eventos de lluvia se tomaron diariamente durante todo el tiempo de estudio. El promedio de lluvias durante el primer periodo de muestreo fue de 49 mm y en el segundo de 7.7 mm.

En época de verano se regaron las parcelas con agua que se captaba de un canal natural que lleva el agua de una fuente superficial cercana a la finca y se bombeaba hasta un tanque de almacenamiento. A esta fuente de agua se le realizó análisis microbiológico con el fin de descartar cualquier contaminación externa que pudiera entrar a las parcelas. Los resultados mostraron valores por debajo del límite de detección de la técnica lo que significa que no se presentaba riesgo de contaminación de origen fecal por el uso de este tipo de agua.

La desecación es otro factor de alta incidencia en la concentración de los microorganismos. Zaleski y otros (2004) indican que cuando se utilizan biosólidos con digestión aerobia que son sometidos a desecación y luego del proceso se evalúa la presencia de *E. coli* y coliformes fecales, se observa que ambos microorganismos disminuyen uniformemente a través del tiempo.

El tipo de suelo que ofrece una mayor supervivencia de bacterias es de textura fina y arenosa. Sin embargo, el descenso y muerte de estos microorganismos entéricos en cualquier tipo de suelo se ve favorecido por el estrés que reciben

al intervenir factores bióticos y abióticos como la presencia de microorganismos autóctonos del suelo que compiten por los nutrientes, temperatura, humedad, pH y alto contenido de arcillas. El suelo de la Estación Experimental en Cogua es de textura media a moderadamente fina por lo que se clasifica como un suelo franco arcilloso con pH ácido y por tanto ofrece una protección moderada a baja de las bacterias presentes en el mismo.

El análisis estadístico realizado a los tres tratamientos arrojó un valor de  $P > 0.05$  (0.9929); por tanto no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los 3 tratamientos, con una confiabilidad de 95 %. Esto significa que el comportamiento de los indicadores bacterianos es parecido en las tres mezclas analizadas y que estas proporciones no interfieren significativamente en la reducción de los microorganismos.

En la *Tabla 4* se presentan los resultados promedio de la concentración de fagos somáticos en los diferentes tra-

**Tabla 4. Resultados promedio de fagos somáticos en suelo de los diferentes tratamientos y controles de los muestreos de Septiembre 2005, Enero 2006, Mayo 2007 y Noviembre 2007**

n = 60				
FAGOS SOMÁTICOS PFP/4g ST				
TRATAMIENTO	Septiembre 2005	Enero 2006	Mayo 2007	Noviembre 2007
T1	1.0 x 10 <sup>6</sup>	4.0 x 10 <sup>3</sup>	< 7.0 x 10 <sup>1</sup> *	1.2 x 10 <sup>2</sup>
T2	1.0 x 10 <sup>5</sup>	4.0 x 10 <sup>2</sup>	< 7.2 x 10 <sup>1</sup> *	6.6 x 10 <sup>1</sup>
T3	4.0 x 10 <sup>5</sup>	4.0 x 10 <sup>2</sup>	< 7.7 x 10 <sup>1</sup> *	< 8.0 x 10 <sup>1</sup> *
CS	6.3 x 10 <sup>2</sup>	< 5.0 x 10 <sup>1</sup> *	1.1 x 10 <sup>2</sup>	< 6.6 x 10 <sup>1</sup> *
CB	6.3 x 10 <sup>5</sup>	3.2 x 10 <sup>3</sup>	7.9 x 10 <sup>2</sup>	< 1.0 x 10 <sup>2</sup> *

n = Número de muestras analizadas.  
PFP/4g ST: Partículas Formadoras de Placas por 4 gramos de Sólidos Totales.  
\* : Límite de Detección de la técnica.

**Tabla 5. Resultados promedio de huevos de helmintos viables en suelo de los diferentes tratamientos y controles de los muestreos de Septiembre 2005, Enero 2006, Mayo 2007 y Noviembre 2007**

n = 60				
HUEVOS DE HELMINTOS VIBLES HH VIBLES / 4 g ST				
TRATAMIENTO	Septiembre 2005	Enero 2006	Mayo 2007	Noviembre 2007
T1	1.46	9.46	1.46	1.20
T2	0.8	11.13	1.86	4.66
T3	1.20	21.73	5.33	4.26
CS	< 0.4 *	< 0.4 *	0.66	4.0
CB	< 0.4 *	11.06	0.80	13.73

n = Número de muestras analizadas.  
HHV/4 g ST: Huevos de helmintos viables en cuatro gramos de sólidos totales.  
\* : Límite de Detección de la técnica.

tamientos y controles. Los resultados de los muestreos realizados a los 30, 60 y 75 días no se presentan en las tablas ya que no se observaron diferencias significativas entre los resultados de concentración obtenidos para este indicador viral.

Desde el establecimiento de las parcelas hasta el muestreo final, los porcentajes de reducción total obtenidos presentaron valores del 66 % para T3, seguido por T1 con 65 % y finalmente para T2 del 64 %. En cuanto a los controles, el porcentaje de reducción fue del 35 % en ambos casos.

Las concentraciones encontradas en este último muestreo no cumplen con los requerimientos de un biosólido Clase A (Apartado 503 de la EPA, 2005), ya que según el límite dado por esta normatividad deben estar por debajo de 1 PFP/4g ST para enterovirus. Sin embargo están cerca del límite de detección de la técnica.

Aunque existen metodologías que detectan directamente la presencia de enterovirus en suelos, éstas suelen ser costosas y de difícil implementación. Actualmente se utilizan los fagos somáticos como indicadores de presencia de enterovirus no sólo en aguas sino también en muestras de lodo y biosólido, resultando ser buenos indicadores de la presencia de estos virus en matrices sólidas (Guzmán y otros, 2007; Mocé-Llivina y otros, 2003; Reynolds y otros, 2001).

Sobsey y otros (1980) encontraron que los suelos franco arcillosos y con pH tendientes a la acidez; que son las características que poseen los suelos de las parcelas evaluadas, contribuyen a una mayor capacidad de adsorción de los virus. Por tanto, se puede suponer que este contenido de arcillas, favorecido por el pH podría ayudar a la adsorción de los virus por más tiempo y ser una de las diversas causas por las cuales en este estudio la concentración de fagos somáticos no haya disminuido totalmente hasta alcanzar la concentración sugerida por la EPA. Los factores que influyen en la reducción de bacterias se aplican también a la reducción de virus en suelos.

El valor de P fue mayor a 0.05 (0.8970), lo que significa que el comportamiento de los indicadores virales es similar en las tres mezclas analizadas y que estas proporciones no interfieren significativamente en la reducción de los microorganismos.

En la *Tabla 5* se observa la concentración de huevos de helmintos en los diferentes tratamientos y controles. Los resultados de los muestreos realizados a los 30, 60 y 75 días no se presentan en las tablas ya que no se observaron diferen-

cias significativas entre los resultados obtenidos para este indicador parasitario.

La concentración de huevos de helmintos en todos los tratamientos y en el control biosólido estuvo en general, por encima de los valores reportados al inicio del estudio. Es posible que estos organismos no se encuentran distribuidos de manera homogénea en el suelo influyendo en la tasa de recuperación. Adicionalmente, las metodologías de análisis microbiológicos de muestras ambientales no garantizan una recuperación mayor del 50 %.

Los resultados obtenidos pueden estar relacionados con la textura, temperatura y humedad, ya que éstos influyen de manera importante en la supervivencia de estos organismos en el ambiente. Gaspard y otros (1997) encontraron que la supervivencia de huevos de helmintos podía estar entre 60-70 %, y era favorecida por la humedad de un suelo limoso que oscilaba entre 20-50 %.

La variación en los resultados de todos los muestreos puede explicarse también por la falta de homogenización completa de los diferentes tratamientos al realizar las mezclas y por la alta resistencia de los parásitos a los factores que normalmente afectan bacterias y virus.

Los porcentajes de humedad obtenidos durante este estudio oscilaron entre 22 y 59 % para los tratamientos y entre 35 y 63 % para los controles, rango en el cual se aumenta la posibilidad de supervivencia de los huevos de helmintos en las mezclas evaluadas.

Las concentraciones finales para este indicador parasitario no cumplen con los requerimientos de un biosólido Clase A (Apartado 503 de la EPA, 2005) ya que el límite dado por esta normatividad es de 1 Huevo de Helmintos Viable/4g ST. **Análisis microbiológico en pastos.** En la *Tabla 6* se observa la concentración promedio de coliformes fecales obtenida para las muestras de pasto en los diferentes tratamientos y controles. Desde el establecimiento de las parcelas hasta el muestreo final, las concentraciones permanecieron estables o en su defecto disminuyeron para este indicador bacteriano en todos los tratamientos, exceptuando T1 y el control Biosólido. Los valores obtenidos para este indicador no sobrepasan el valor de  $10^3$  UFC/30g PF, exceptuando T1. Estos valores se encuentran dentro del límite de referencia propuesto por la Comisión Internacional de Especificaciones Microbiológicas para Alimentos, que ha determinado que un alimento crudo puede ser consumido sin riesgo si contiene concentraciones de coliformes fecales



**Tabla 6. Resultados promedio de coliformes fecales en pasto de los diferentes tratamientos y controles de los muestreos de Septiembre 2005, Enero 2006, Mayo 2007 y Noviembre 2007**

TRATAMIENTO	UFC / g ST		UFC / 30 g PF	
	Septiembre 2005	Enero 2006	Mayo 2007	Noviembre 2007
T1	7.5 x 10 <sup>1</sup>	5.8 x 10 <sup>1</sup>	6.1 x 10 <sup>2</sup>	3.3 x 10 <sup>3</sup>
T2	2.5 x 10 <sup>2</sup>	2.4 x 10 <sup>0</sup>	< 1.0 x 10 <sup>1</sup> *	1.3 x 10 <sup>1</sup>
T3	2.9 x 10 <sup>2</sup>	6.0 x 10 <sup>0</sup>	4.7 x 10 <sup>1</sup>	4.4 x 10 <sup>2</sup>
CS	< 6.3 x 10 <sup>1</sup>	< 8.3 x 10 <sup>1</sup> *	5.1 x 10 <sup>2</sup>	< 1.0 x 10 <sup>1</sup> *
CB	1.2 x 10 <sup>2</sup>	2.3 x 10 <sup>2</sup>	1.0 x 10 <sup>1</sup>	9.4 x 10 <sup>2</sup>

n = Número de muestras analizadas.  
 UFC/g ST: Unidades Formadoras de Colonia por gramo de Sólidos Totales.  
 UFC/ 30g PF: Unidades Formadoras de Colonia por 30 gramos de Peso Fresco.  
 \* : Límite de Detección de la técnica.

Nota: Las técnicas utilizadas para el análisis de coliformes fecales, fagos somáticos y huevos de helmintos en pastos durante la segunda etapa de evaluación se cambiaron debido a que las nuevas metodologías empleadas permitían obtener mayores porcentajes de recuperación frente a las utilizadas en la primera fase de evaluación. Por tanto las unidades que se reportan varían al comparar un muestreo a otro, y a la vez corresponden a la metodología utilizada.

menores a 10<sup>3</sup> UFC/g de peso fresco (WHO, 2005). Este valor límite se ha tomado en cuenta debido a la ausencia de un número máximo de coliformes fecales permitidos en el forraje verde para el consumo del ganado vacuno.

En el caso de los fagos somáticos en pastos se puede observar en la *Tabla 7* la concentración promedio en los diferentes tratamientos y controles. Desde el establecimiento de las parcelas hasta el muestreo final, las concentraciones permanecieron estables para este indicador viral en todos los tratamientos y controles.

En general, los datos de concentración de fagos somáticos obtenidos a lo largo de la evaluación muestran homogeneidad con valores de concentración finales de 10<sup>1</sup> PFP/25g PF para todos los tratamientos y controles evaluados. Se supone en este caso que el riesgo sanitario por este tipo de microorganismos es menor, con lo cual se disminuye el riesgo de enfermedades gastrointestinales en el ganado vacuno lechero; siendo las más prevalentes aquellas causadas por

**Tabla 7. Resultados promedio de fagos somáticos en pasto de los diferentes tratamientos y controles de los muestreos de Septiembre 2005 Enero 2006, Mayo 2006 y Noviembre 2007.**

n = 60				
FAGOS SOMÁTICOS				
TRATAMIENTO	PFP / 4 g ST		PFP / 25 g PF	
	Septiembre 2005	Enero 2006	Mayo 2007	Noviembre 2007
T1	< 7.5 x 10 <sup>1</sup>	< 3.3 x 10 <sup>2</sup> *	< 5.0 x 10 <sup>1</sup> *	< 5.0 x 10 <sup>1</sup> *
T2	< 7.3 x 10 <sup>1</sup>	< 2.8 x 10 <sup>2</sup> *	< 5.0 x 10 <sup>1</sup> *	< 5.0 x 10 <sup>1</sup> *
T3	< 8.1 x 10 <sup>1</sup>	< 3.0 x 10 <sup>2</sup> *	8.3 x 10 <sup>1</sup>	8.3 x 10 <sup>1</sup>
CS	< 6.3 x 10 <sup>1</sup>	< 3.3 x 10 <sup>2</sup> *	2.5 x 10 <sup>2</sup>	< 5.0 x 10 <sup>1</sup> *
CB	< 7.4 x 10 <sup>1</sup>	< 2.7 x 10 <sup>2</sup> *	< 5.0 x 10 <sup>1</sup> *	6.7 x 10 <sup>1</sup>

n = Número de muestras analizadas.  
 PFP/4g ST: Partículas Formadoras de Placas por cuatro gramos de Sólidos Totales.  
 PFP/25g PF: Partículas Formadoras de Placas por 25 gramos de Peso Fresco.  
 \* : Límite de Detección de la técnica.

rotavirus y coronavirus, padecidas especialmente por terneros de menos de 14 días de nacidos (Kozan y otros, 2005; Rebhun, 1999).

Las concentraciones de huevos de helmintos en pastos de los diferentes tratamientos y controles se encuentran en la *Tabla 8*. Se observa que para el último muestreo, todos los datos obtenidos se encuentran por debajo del límite de detección de la técnica y por consiguiente se supone que es menor el riesgo para el ganado vacuno lechero de adquirir parásitos como *Ascaris spp*, *Trichuris spp* y *Fasciola spp.*, que son los parásitos más comunes que se reportan en casos de helmintiasis en esta clase de ganado (Rebhun, 1999).

Aunque la concentración de microorganismos indicadores encontrada en las mezclas de suelo y biosólido al final del estudio es menor y en cuanto a coliformes fecales se cumple con la normatividad, se recomienda no permitir el paso del ganado para evitar la contaminación del ganado por el pisoteo. En ese caso sería más adecuado realizar cortes, ya sea manualmente o por maquinaria, controlando al

**Tabla 8. Resultados promedio de huevos de helmintos viables en pasto de los diferentes tratamientos y controles de los muestreos Septiembre 2006, Enero 2006, Mayo 2006 y Noviembre 2007**

TRATAMIENTO	n = 60			
	HUEVOS DE HELMINTOS VIABLES			
	HHV / 4g ST		HHV / g PF	
	Septiembre 2005	Enero 2006	Mayo 2007	Noviembre 2007
T1	< 0.4 *	< 0.4 *	0.003	< 0.001*
T2	< 0.4 *	< 0.4 *	0.005	< 0.001*
T3	< 0.4 *	< 0.4 *	0.004	< 0.001*
CS	< 0.4 *	< 0.4 *	< 0.003*	< 0.001*
CB	< 0.4 *	< 0.4 *	0.006	0.006

n = Número de muestras analizadas.  
 HHV/4g ST: Huevos de helmintos viables por cuatro gramos de Sólidos Totales.  
 HHV/g PF: Huevos de helmintos viables por gramo de Peso Fresco.  
 \* : Límite de Detección de la técnica.

máximo la posible contaminación del forraje. **Análisis de los metales pesados en las mezclas suelo-biosólido y en los pastos.** Como se observa en la *Tabla 9*, la concentración de metales pesados en las mezclas suelo-biosólido se encontraron por debajo de los límites establecidos por la EPA, tanto en los tratamientos como en los controles para todos los muestreos realizados. En la *Tabla 10* se observan los resultados para pastos, los cuales se compararon con el rango citado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2007) para cultivos que van ser consumidos por el hombre o animales. Estos rangos son: 5 - 25 ppm para Cu, 0.1 - 0.2 ppm para Mo y 30 - 100 ppm para Zn.

**Tabla 9. Comparación de las concentraciones promedio de metales pesados en los diferentes tratamientos de los muestreos inicial y final (Septiembre de 2005 y Noviembre de 2007) con los valores máximos establecidos por el Apartado 503 de la norma 40 CFR de la EPA: Reglamento de Biosólidos**

TRATAMIENTOS Y CONTROLES - SUELO n= 30											
PARÁMETRO	T1		T2		T3		CS		CB		EPA
	Sept 2005	Nov 2007	Sept 2005	Nov 2007	Sept 2005	Nov 2007	Sept 2005	Nov 2007	Sept 2005	Nov 2007	
As (mg/Kg)	38.0	31.38	35.3	26.99	35.5	23.95	42.3	42.85	22.8	43.47	75
Cd (mg/Kg)	11.1	2.11	10.3	1.31	12.4	1.94	8.7	3.82	13.1	6.60	85
Cu (mg/Kg)	83.3	61.14	63.7	47.83	127.8	63.79	56.7	79.13	147.6	144.82	4300
Cr (mg/Kg)	100.9	45.46	105.4	42.81	112.1	42.83	122.6	66.39	89.3	137.76	3000
Hg (mg/Kg)	< 0.00025	1.41	< 0.00025	1.45	< 0.00025	1.57	< 0.00025	1.09	< 0.00025	1.54	57
Mo (mg/Kg)	11.6	3.28	12.9	2.66	12.5	2.16	14.0	6.77	10.0	6.79	75
Ni (mg/Kg)	33.3	82.29	34.3	29.70	43.4	39.70	39.2	29.72	37.2	88.28	420
Pb (mg/Kg)	119.2	46.11	116.0	35.55	126.8	41.37	127.1	66.79	113.7	97.74	840
Se (mg/Kg)	47.5	36.42	53.8	31.81	42.4	28.26	67.9	54.63	23.6	50.15	100
Zn (mg/Kg)	520.3	249.98	353.4	143.91	810.9	289.71	229.5	156.90	1010.7	580.47	7500

n : Número de muestras analizadas  
 ND: No Detectable

**Tabla 10. Comparación de las concentraciones promedio de metales pesados totales en las muestras de pasto de los diferentes tratamientos y controles de los muestreos de Mayo 2007 y Noviembre 2007.**

TRATAMIENTOS Y CONTROLES - PASTO n= 30											
PARÁMETRO	T1		T2		T3		CS		CB		
	May 2007	Nov 2007	May 2007	Nov 2007	May 2007	Nov 2007	May 2007	Nov 2007	May 2007	Nov 2007	
As (mg/Kg)	ND	17.06	ND	17.66	ND	19.24	ND	11.69	ND	17.44	
Cd (mg/Kg)	ND	0.001	ND	0.02	ND	0.01	ND	0.01	ND	0.01	
Cu (mg/Kg)	13.36	10.68	23.17	20.12	8.82	13.40	11.06	9.57	6.85	9.33	
Cr (mg/Kg)	< 6.6	1.48	10.53	3.90	3.02	4.30	< 43.51	3.87	< 4.09	3.89	
Hg (mg/Kg)	< 0.33	ND	0.13	ND	0.65	ND	1	ND	ND	ND	
Mo (mg/Kg)	< 1.52	ND	0.07	ND	ND	ND	3.29	ND	2.14	ND	
Ni (mg/Kg)	< 4.23	3.93	7.72	5.28	2.28	7.81	7.56	15.18	ND	7.5	
Pb (mg/Kg)	ND	0.39	ND	0.45	ND	0.66	ND	0.40	ND	0.56	
Se (mg/Kg)	ND	3.43	ND	3.68	ND	3.75	ND	1.65	ND	3.83	
Zn (mg/Kg)	28.23	18.34	46.06	21.67	18.79	22.22	32.67	11.64	20.9	16.53	

n : Número de muestras analizadas  
 ND: No Detectable

La variabilidad en los datos obtenidos en las mezclas pudo deberse a que cuando se realizan las mezclas de biosólido con suelo, es difícil lograr que sean completamente homogéneas lo que pudo influir en las concentraciones encontradas.

La actividad de los metales en los suelos evaluados pudo estar afectada por diversos factores químicos del suelo y de la naturaleza de cada metal; esto se refleja en las concentraciones obtenidas en los pastos que indican que los metales se encuentran en estado disponible para que la planta los tome.

La movilidad de los metales se ve limitada por factores como la capacidad de intercambio catiónico (CIC) ya que puede provocar que las cargas positivas de los metales se unan al suelo y permanezcan retenidos mientras exista este equilibrio. A este fenómeno se le suman otras características

y propiedades del suelo entre ellas el pH. La materia orgánica, parámetro que también tiene valores altos en el biosólido aplicado al suelo, afecta la biodisponibilidad de los metales ya que genera sitios adicionales para ser absorbidos en dicha matriz y de paso también se incrementa la CIC, favoreciendo la inmovilización de los metales. Ambos factores pueden incrementar la retención de metales en el suelo y por ende reducir su lixiviación (Moss y otros, 2002).

En general, la disminución en la concentración de los metales pesados encontrados en el suelo pudo haber ocurrido por la continua extracción por parte del pasto, a medida que estos elementos se hacían disponibles. El pasto ryegrass perenne tiene la capacidad de absorber mayor cantidad de elementos traza que otros cultivos (Maisonnaive y otros, 2001). **Análisis de la productividad del pasto.** Como se observa en la *Tabla 11*, los resultados obtenidos de la producción promedio de pasto ryegrass en los tratamien-

**Tabla 11. Producción promedio en peso fresco de pasto Ryegrass en los diferentes tratamientos y controles de los muestreos de Enero a Marzo 2006 y monitoreo realizado entre Abril y Noviembre de 2007.**

TRATAMIENTOS	n = 90					
	PRODUCCION TOTAL EN Ton/Ha					
	Enero 2006	Febrero 2006	Marzo 2006	Abril 2007	Mayo 2007	Junio 2007
T1	39.7	33.2	50.2	46.94	43.43	60.42
T2	45.9	36.3	58.7	62.36	60.63	67.08
T3	35.4	39.5	60.7	65.69	69.25	76.25
CS	14.3	8.4	14.4	4.86	5.5	6.94
CB	27	38.3	81.8	83.88	82	91.11

n = Número de muestras analizadas.

tos, mantuvieron una línea de tendencia ascendente en los muestreos realizados en el año 2006 cuyos valores oscilaron entre 33.2 y 60.7 ton/ha. En relación a los valores obtenidos en el año 2007, en general mantuvieron la tendencia similar a los reportados para el año anterior, con valores entre 43.43 y 76.25 ton/ha. La productividad del control suelo presentó valores entre 8.4 y 14.4 ton/ha en el año 2006 y entre 4.86 y 6.94 ton/ha en 2007. Los valores de productividad en el control biosólido para el año 2006 estuvieron entre 27 y 81.8 ton/ha y entre 82 y 91.11 ton/ha para el año 2007.

La *Fotografía 1* presenta la evolución de la producción del forraje de las parcelas a través del tiempo de estudio.

En Colombia la producción de ryegrass en materia fresca puede alcanzar entre 7 y 21 ton/ha en condiciones favorables (Mila y otros, 1993). En el caso del control suelo, los valores de productividad obtenidos a lo largo de todo el estudio (entre 4.86 y 14.4 ton/ha) se encuentran dentro del rango reportado por dicho estudio. Por otro lado, la producción de pasto en los tratamientos con biosólido se encontró entre 33.2 y 76.25 ton/ha, lo que indica que la productividad en las mezclas de suelo y biosólido fue mucho más alta que la reportada a nivel nacional.

El valor de P fue superior a 0.05 (0.8960); lo cual indica que no existe una diferencia estadísticamente significativa en la producción de pastos en los 3 tratamientos. **Análisis fisicoquímicos y agronómicos de las mezclas suelo-biosólido.** Los resultados de los análisis adicionales que se realizaron a las mezclas de suelo-biosólido y a los controles (datos sin publicar) determinan que son suelos con pH ácido, textura y estructura típica de suelos franco-arcillosos, con deficiente drenaje y nivel freático alto en algunas épocas del año, debido a las altas precipitaciones. Los suelos a los cuales se les adicionaron diferentes proporciones de biosólidos, tanto en el control como en los tratamientos, presentaron cambios en la textura y estructura del suelo, capacidad de intercambio catiónico y bases presentes.

Se observa un incremento en los nutrientes, lo cual favorece mayor actividad biológica y a mediano plazo mejora las características físicas y nutricionales de los suelos. De igual forma la adición de materia orgánica favorece la retención de nutrientes y una mayor disponibilidad para micro y macro organismos. **Análisis foliar y bromatológico de los pastos.** Las características nutricionales de los pastos (datos sin publicar), cultivados en el control suelo presentaron bajos contenidos de macronutrientes reflejando una baja productividad. En las plantas cultivadas en los tres tratamientos y en el control biosólido, se observó un incremento en la concentración de macro y micro nutrientes. De igual forma se observó una mejora sustancial en el desarrollo de las plantas presentando una mayor producción de biomasa.

Un valor agregado es la disminución del tiempo entre cada corte; normalmente es de 45 días y, debido a la alta producción del pasto, cada 30 días se podía cosechar sin que disminuyera la productividad.

Se deduce, por los resultados de laboratorio, que se aumenta la digestibilidad de los pastos, lo cual incide en un incremento en el consumo de pasto que se puede ver reflejado en una posible mejora de la dieta, la nutrición y la productividad de los rumiantes.

**Fotografía 1. Evolución general del forraje de las parcelas a través del periodo de estudio**



Cárdenas, 2006; Los autores.

## Conclusiones

La concentración final de coliformes fecales en suelos se encontró por debajo de los límites sugeridos por la EPA. Para indicadores virales, los tratamientos 1 y 2 fueron los únicos que se encontraron por debajo del límite dado por esta normatividad.

La concentración de huevos de helmintos se encontró por encima del límite establecido por la normatividad, lo cual indica que aún se deben tomar precauciones para evitar riesgo sanitario por el contacto de las personas o animales con estos suelos.

Las concentraciones de coliformes fecales, fagos y huevos de helmintos en los pastos no representan riesgo sanitario para el ganado que lo consuma.

La concentración de metales pesados en las mezclas suelo-biosólido se encontraron por debajo de los límites establecidos por la EPA, tanto en los tratamientos como en los controles para todos los muestreos realizados. De la misma manera se encontró que éstas cumplen con el rango propuesto por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) para cultivos que van a ser consumidos por el ser humano.

Los valores de producción de pasto ryegrass obtenidos en todos los tratamientos y el control biosólido mantuvieron una tendencia ascendente durante el tiempo de estudio.

Los análisis agronómicos de las mezclas de suelo-biosólido reflejan una mejora en las características fisicoquímicas del suelo de la estación experimental; principalmente se logró un incremento promedio de 0.5 en el pH inicial y una

mejora sustancial en la disponibilidad de nutrientes para las plantas. La adición de biosólido en el suelo incrementa los valores del porcentaje de carbono orgánico y del nitrógeno total, capacidad de intercambio catiónico, bases totales y el porcentaje de saturación de bases en razón a una mayor cantidad de nutrientes disponibles para las plantas.

En relación a los análisis bromatológicos en pastos, se puede concluir que la adición de biosólidos al suelo incrementa la producción y la productividad de los cultivos, aumenta la digestibilidad y por tanto los animales que consuman estos pastos pueden mejorar su nutrición y su producción.

No se observan diferencias estadísticamente significativas entre los diferentes tratamientos que permitan recomendar uno de ellos específicamente. Sin embargo se sugiere trabajar en futuros estudios con la aplicación de biosólidos según tasa agronómica.

Los resultados obtenidos en el presente estudio muestran las ventajas de la aplicación de biosólidos en el cultivo de pasto ryegrass, si se toman las medidas necesarias para evitar el contacto del ganado con el suelo hasta lograr la disminución de patógenos sugerida por la norma.

## Agradecimientos

A la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB). Dirección de Ingeniería Especializada (Área de Aguas y Saneamiento Básico) y Dirección de Servicios Técnicos (Laboratorio de Aguas) y a COLCIENCIAS mediante su programa de jóvenes investigadores por su aporte financiero para la realización del presente estudio.

## Referencias Bibliográficas

- \* ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie), 2001. Le boues D'épuration municipales. Los biosólidos del tratamiento de las aguas residuales municipales y su utilización en la agricultura, publicado por la Agencia del Medio Ambiente y de la Energía de Francia, traducción realizada por Bogotana de Aguas y Saneamiento - BAS. 165 p.
- \* Cárdenas, 2006. "Evaluación del Comportamiento de Indicadores de Contaminación Fecal (Coliformes fecales, Fagos somáticos y Huevos de helmintos) en Mezclas de Biosólido y Suelo utilizadas para el cultivo de Pasto Ryegrass". Tesis de Maestría. Departamento de Microbiología, Facultad de Ciencias. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá. 120p.
- \* CIAA- Centro de Investigación y Asesorías Agropecuarias. Universidad Jorge Tadeo
- Lozano, 2006. Instructivo de Toma de Muestras para Tejido Vegetal del Laboratorio de Fertilidad en Suelos, Foliar y Aguas. 4p.
- \* Cox, Caroline, 1995. Glyphosate, Part 2: Human exposure and ecological effects. En: Journal of Pesticides Reform. 15:4:1-14. Northwest Coalition for Alternatives to Pesticides, Eugene, OR. USA. Documento obtenido por Internet, Enero de 2009.
- \* Dubois, E.; Hennechart, C.; Deboosere, N.; Merle, G.; Legeay, O.; Burger, C.; Le Calvé, M.; Lombard, B.; Ferré, V.; & Traeré, O., 2006. Intra-laboratory validation of a concentration method adapted for the enumeration of infectious F-specific RNA coliphage, and hepatitis A virus from inoculated leaves of salad vegetables. International Journal of Food Microbiology 108:2:164-171.
- \* Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá - EAAB, 2006 - 2007. Base de Datos sobre parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del Biosólido de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales El Salitre. COMUNICACIÓN PERSONAL.
- \* Environmental Protection Agency (EPA), 2003. Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge. EPA/625/R-92/103. United States. 177 p.
- \* Environmental Protection Agency (EPA), 2005. Biosolids generation, use, and disposal in the United States. EPA 503-R-99-009. United States. 74p.
- \* EPA. Technical Fact Sheets on: Glyphosate. National Primary Drinking Water Regulations. Documento obte-

- nido por Internet, Diciembre de 2008.
- \* Estrada, J., 2001. Plan de Manejo Ambiental para la Rehabilitación de Suelos de Canteras y Control de la Erosión Aprovechando los Biosólidos generados por la Plantas de Tratamiento.
  - \* Estrada, I.; Aller, A.; Aller, F.; Gómez, X.; & Morán, A., 2004. The survival of *Escherichia coli*, faecal coliforms and enterobacteriaceae in general in soil treated with sludge from wastewater treatment plants. *Bioresource Technology*. 93:2:191-198.
  - \* García, C., 2001. Nuevos usos para el reciclado en el suelo de residuos urbanos: Biocontrol en Agricultura Sostenible y Recuperación de suelos Degradados. Departamento de Conservación de Suelos y Aguas, y Manejo de Residuos Orgánicos. Campus Universitario Espinado. Murcia. España. 7p.
  - \* Gaspard, P.G.; Schwartzbrod, J.; Wiart, J.; Galvez, L.; & Dumoutier, N., 1997. Parasitological Risks Associated with the Use of Biosolids in Agriculture: Nematode Egg Survival on Grass, Vegetables and Within Soils. Beneficial Reuse of Water and Biosolids, Marbella, España, Water Environment Federation. 17-27 p.
  - \* Gibbs, R.A.; Hu C.J.; Ho, G.E.; & Unkovich, I., 1997. Regrowth of faecal coliformes and Salmonellae in stored biosolids and soil amended with biosolids. *Water Science and Technology*. 35:11-12:269-275.
  - \* Guzmán, C.; Jofre, J.; Blanch A.R.; & Lucena, F., 2007. Development of a feasible method to extract somatic coliphages from sludge, soil and treated biowaste. *Journal of Virological Methods*. 144:1-2:41-48.
  - \* Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC., 2000. Departamento de Cundinamarca. Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras. Tomo II. Bogotá, Colombia. 412 p.
  - \* Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC., 2007. Departamento de Cundinamarca. Manual de Métodos Analíticos: Instructivo para Toma de Muestras de Suelo del Laboratorio Central de Análisis de Suelos. 4p.
  - \* International Standard Organization - ISO., 1999. Water Quality - Detection and enumeration of Bacteriophages. Part 2: Enumeration of Somatic Coliphages. ISO 10705-2. 17 p.
  - \* Kozan, E.; Gonenc, B.; Sarimehmetoglu, O.; & Aycicek, H., 2005. Prevalence of helminth eggs on raw vegetables used for salads. *Food Control* 16: 239 - 242.
  - \* Lang, N. L.; Smith, S.R.; Bellett-Travers, D.M.; Pike, E.B.; & Rowlands, C.L., 2003. Decay of *Escherichia coli* in soil following the application of biosolids to agricultural land. *Water Environment Management Journal*. 17:1: 23-28.
  - \* Lasobras, J.; Dellunde, J.; Jofre, J.; & Lucena, F., 1999. Occurrence and levels of phages proposed as surrogate indicators viruses in different types of sludges. *Journal of Applied Microbiology* 86:723-729.
  - \* León-Zapata, M.A.; y Trejos, J.D., 2005. Comportamiento de los fagos somáticos en mezclas de biosólido y áridos utilizados para la restauración ecológica de la cantera Soratama, Localidad de Usaquén, Bogotá. D.C. Trabajo de Grado. Departamento de Microbiología, Facultad de Ciencias. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.
  - \* Luna, N.; y Rojas, K., 2004. "Evaluación de Indicadores de Contaminación Fecal (Coliformes fecales, Fagos somáticos y Fagos F específicos) en diferentes Mezclas de Biósólido y Suelo en un cultivo de Rábano (*Raphanus sativus*)". Tesis de Pregrado. Departamento de Microbiología, Facultad de Ciencias. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.
  - \* Maisonnave, V.; Montréjaud - Vignoles, M.; & Bonnin, C., 2001. Biosolids land application in France: a comparative study with fertilisers for the effect on plants and soils. *WEFTEC*: 16 p.
  - \* Mila, A., 1993. Suelos, pastos y forrajes. Unisur - Ministerio de Educación. Bogotá, Colombia. 267 p.
  - \* Mocé-Llivina, L.; Muniesa, M.; Pimienta-Vale, H.; Lucena, F.; & Jofre, J., 2003. Survival of Bacterial Indicator Species and Bacteriophages after Thermal Treatment of Sludge and Sewage. *Applied and Environmental Microbiology* 69:3:1452-1456.
  - \* Moss, L.H.; Epstein, E.; & Logan, T., 2002. Evaluating risks and benefits of soil amendments used in agriculture. Water Environment Research Foundation and IWA publishing. U.S.A. Sections 1-5.
  - \* National Research Council., 2002. *Biosolids Applied to Land: Advancing Standards and Practices*. Washington D.C., United States. 345 p.
  - \* Norma Oficial Mexicana., 2002. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. NOM-004-ECOL-2002. 61 p.
  - \* Pacheco, L.F.; Patiño, M., 2003. Evaluación de la aplicación de biosólidos producidas en la Planta de Tratamiento de aguas Residuales El Salitre en la revegetación del relleno sanitario Doña Juana. Trabajo de Grado. Departamento de Microbiología. Facultad de Ciencias. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.
  - \* Rebhun, W., 1999. Enfermedades del ganado vacuno lechero. Editorial Acribia. Zaragoza, España. 666 p.
  - \* Reynolds, K.A.; Yerba, C.P.; Abbaszadegan, M.; & Pepper, I.L., 2001. ICC/PCR detection of enteroviruses and hepatitis A virus in environmental samples. *Canadian Journal of Microbiology* 47:2:153-157.
  - \* Sobsey, M.D.; Dean, C.H.; Knuckles, M.E.; & Wagner, R.A., 1980. Interactions and survival of enteric viruses in soil materials. *Applied and Environmental Microbiology*. 40:1:92-101.
  - \* Water Environment Federation and American Water Works Association (WEF/AWWA). *Biosolids Fact Sheet Project Biosolids: A Short Explanation and Discussion*. Joint Residuals and Biosolids Management Conference. 1999.
  - \* World Health Organization - WHO, 2005. Guidelines for the safe use of wastewater in agriculture. Water Sanitation and Health Protection of The Human Environment Department. Geneva. 172 p.
  - \* Zaleski, K.; Josephson, K.; Gerba, C.; & Pepper I., 2004. Survival, Growth, and Regrowth of Enteric Indicator and Pathogenic Bacteria in Biosolids, Compost, Soil, and Land Applied Biosolids. *Journal of Residuals Science & Technology*. 2:1:49-63.
  - \* Zaleski, K., Josephson K., Gerba C. and Pepper I., 2005. Survival, Growth, and Regrowth of Enteric Indicator and Pathogenic Bacteria in Biosolids, Compost, Soil, and Land Applied Biosolids. *Journal of Residuals Science & Technology*. 2 (1): 49-63.

# RELEVANCIA AMBIENTAL DEL SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO: BOGOTÁ COMO CASO DE ESTUDIO

**Eduardo Behrentz.** Director del Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional (SUR) de la Universidad de los Andes.

**Magdalena Fandiño.** Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional de la Universidad de los Andes.  
Dirección: Carrera 1 Este # 19 A – 40. Bogotá, Colombia. AA 4976.  
Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.  
+(57-1) 339.4949; Fax: +(57-1) 332.4313.  
ebehrent@uniandes.edu.co

## ***Abstract***

*This research summarizes the findings of previous studies conducted in Bogota, in which the impact of the mobile sources has been documented. The methodology includes analyses of the records generated by the air quality monitoring network, results of the local emissions inventory and personal exposure measurements. The collected evidence demonstrates the main air pollution problem in Bogota is related to its high particulate matter atmospheric concentrations. Although such pollution is produced by different sources, the vehicle fleet (in particular the conventional transit buses) is responsible for a significant portion of the problem. To cope with this situation the city must continue and expand its policies regarding fuel quality and mass transportation systems. It is equally important to mandate the use of emission control technologies in diesel-powered vehicles.*

## ***Resumen***

*En este trabajo se presentan resultados de investigaciones desarrolladas en Bogotá, a través de las cuales se ha documentado el impacto que las fuentes móviles tienen sobre la calidad del aire en la ciudad. La documentación técnica del problema incluye análisis de los registros de la red de monitoreo de la calidad del aire, resultados del inventario de emisiones y mediciones de exposición personal. La evidencia recolectada permite concluir que el principal problema de contaminación en la ciudad tiene que ver con las elevadas concentraciones de material particulado. Si bien dicha contaminación es generada por diferentes fuentes, el impacto de la flota vehicular (en especial los buses de transporte público colectivo) es el más significativo de todos. Para hacer frente a esta situación se debe continuar con las políticas de mejoramiento de combustibles en combinación con la expansión del sistema de transporte masivo. Es igualmente necesario hacer obligatorio el uso de sistemas de control de emisiones para vehículos diésel.*

**Keywords:** *Mobile sources, air quality policies, personal exposure.*

**Palabras Clave:** *Fuentes móviles, políticas de calidad del aire, exposición personal.*

## **Introducción**

Durante las últimas décadas, al igual que muchos de los grandes centros urbanos de América Latina, Bogotá ha experimentado un intenso y acelerado proceso de expansión y desarrollo con el consecuente aumento en la demanda de servicios y en la presión ejercida sobre la infraestructura básica. Este fenómeno se ha presentado de forma desordenada y en ausencia de una planificación centralizada e integral. Una de las más notables consecuencias de esta situación es el incremento en los niveles de contaminación del aire, los cuales a su vez se encuentran relacionados con problemas de carácter social y económico. Asimismo, se encuentra ampliamente documentado que mayores concentraciones de contaminantes del aire se encuentran relacionadas con efectos negativos en la salud de la población, especialmente en lo que se refiere al incremento de las tasas de morbilidad y mortalidad que tienen que ver con enfermedades respiratorias y cardiovasculares.

Según los registros de la Secretaría Distrital de Salud de Bogotá, la enfermedad respiratoria es la principal causa de mortalidad infantil en Bogotá. Al mismo tiempo, se conoce que la capital de Colombia es una de las ciudades de América Latina con los más altos índices de contaminación por material particulado. Esto es de particular importancia dado que la evidencia consignada en la literatura científica demuestra (de forma inequívoca) que existe una relación directa entre enfermedad respiratoria y niveles de contaminación por material particulado, especialmente en lo que se refiere a la fracción fina del mismo ( $PM_{2.5}$ ). La mayor incidencia de este tipo de enfermedades genera importantes pérdidas económicas dadas las grandes cantidades de recursos que deben usarse para hacer frente a las mismas así como teniendo en cuenta las pérdidas en productividad y competitividad que se derivan de ellas.

El deterioro de la calidad del aire en Bogotá (y su relación con problemas de salud respiratoria y cardíaca) ha generado preocupación e interés por parte de autoridades ambientales y de salud. Este interés se ha visto reflejado en la realización de estudios e investigaciones que pretenden cuantificar y entender el problema de mejor manera así como en una serie de acciones encaminadas a mejorar las condiciones ambientales de la ciudad. Sin embargo, muchos de los esfuerzos hasta ahora implementados han resultado insuficientes (la contaminación del aire sigue siendo severa e incluso se ha incrementado en algunas zonas de la ciudad) y por lo mismo se requiere de un fortalecimiento de las acciones y de las instituciones a cargo de las mismas.

En este punto es necesario resaltar que la tendencia al alza en los niveles de contaminación atmosférica se explica en parte por el crecimiento económico que la ciudad ha experimentado en años recientes. Esto se debe a que una economía más vibrante se encuentra asociada con una mayor demanda de energía, un mayor consumo de combustibles fósiles y una mayor demanda para la totalidad de los modos de transporte. Esto a su vez genera mayores descargas de contaminantes a la atmósfera. Esto significa que las políticas de mejoramiento de la calidad del aire deben ser lo suficientemente ambiciosas para no sólo revertir la situación actual de contaminación, sino también para contrarrestar el efecto del crecimiento económico.

Según estudios recientes del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) la principal fuente de contaminación en las ciudades de América Latina es el sector transporte. Esto se debe, entre otras cosas, a factores como el mal estado de las vías, la obsolescencia tecnológica de la flota vehicular y el uso de combustibles de baja calidad. Asimismo, desde la perspectiva de la exposición personal a contaminantes del aire, se sabe que las fuentes vehiculares (dada su mayor cercanía e interacción) son de mayor importancia que las fuentes industriales.

Durante el desarrollo del trabajo aquí presentado se pretendió determinar la relevancia, en términos ambientales, del sistema de transporte público de una ciudad (tomando como caso de estudio a Bogotá). Esto se logró a través del análisis de información generada en diversos proyectos adelantados por el Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional (SUR) de la Universidad de los Andes. Como parte de los análisis realizados en este trabajo se identificaron estrategias y políticas que podrían implementarse para lograr un mejor control de las emisiones de contaminantes del aire derivadas del sistema de transporte público de una ciudad.

## **Metodología y Fuentes de Información**

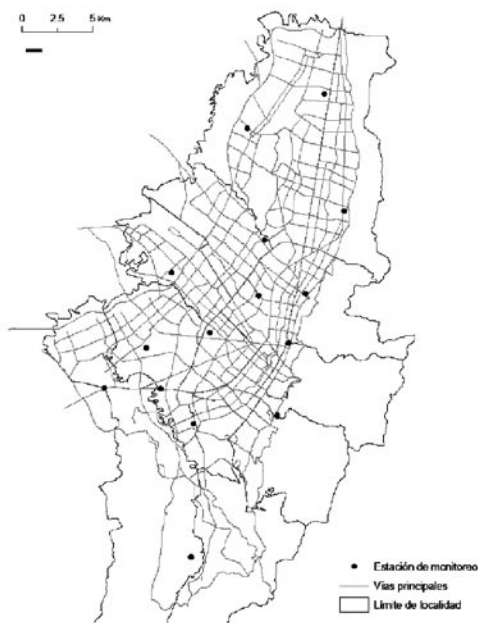
La metodología utilizada en el presente estudio comprende las siguientes cuatro etapas: 1) Diagnóstico del problema de calidad del aire en Bogotá; 2) Identificación de las fuentes causantes del problema de calidad de aire en la ciudad; 3) Evaluación de exposición personal como criterio de priorización; 4) Análisis de estrategias y políticas a implementar.

Diagnóstico de la situación actual. El diagnóstico del problema actual de contaminación se llevó a cabo con base en los registros de la Red de Monitoreo de la Calidad del



Aire de Bogotá (RMCAB), una moderna red de estaciones (ver Figura 1) provista de sofisticados equipos que opera la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) de Bogotá. Dichos equipos permiten cuantificar en tiempo real las más importantes variables meteorológicas (velocidad y dirección del viento, precipitación, intensidad lumínica, temperatura y humedad relativa, entre otras) así como la determinación de las concentraciones de los principales contaminantes del aire, incluyendo monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), ozono (O<sub>3</sub>) y material particulado (PM).

Figura 1. Ubicación de las estaciones de la red de monitoreo de la calidad del aire de Bogotá.



Para documentar y resumir el problema de contaminación a escala de toda la ciudad se utilizó el denominado Índice Porcentual de Excedencias (IPE – ver Gaitán et. al., 2007). Este indicador (ver Ecuación 1) compara los datos disponibles de la RMCAB con la norma nacional de calidad del aire (MAVDT, 2006) y cuantifica el nivel de incumplimiento de la misma.

$$IPE = \sum_I \left( \frac{N_E}{N_D} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

En donde N<sub>E</sub> es el número de veces en que los datos de calidad del aire (v.g., promedios horarios, promedios diarios) exceden la norma usada como referencia (v.g., norma anual, norma diaria) y N<sub>D</sub> es el número total de datos disponibles para cada una de las estaciones (i) de la red.

Identificación de las fuentes de emisión. Durante esta parte del trabajo se utilizó como referencia el inventario actualizado de emisiones de fuentes móviles para Bogotá, el cual fue determinado en una investigación desarrollado de forma conjunta entre la SDA y el Grupo SUR de la Universidad de los Andes (Behrentz et. al., 2009). En dicho estudio se recopiló información existente referente al tamaño y distribución de la flota vehicular así como de sus niveles de actividad. Adicionalmente se realizó una masiva campaña de campo en la que se llevaron a cabo centenares de mediciones directas de emisiones, utilizando técnicas en tiempo real y bajo condiciones reales de operación de los vehículos. Como resultado de este esfuerzo se determinaron los factores de emisión de las diferentes categorías vehiculares y se estimó el inventario total de emisiones de la flota de la ciudad para los más importantes contaminantes del aire.

Para los análisis que serán presentados más adelante también se utilizó como referencia el trabajo desarrollado por Sepúlveda & Behrentz (2006) en donde se determinó el aporte de la flota de transporte público al inventario de emisiones de toda la ciudad. En dicho estudio se generaron diferentes escenarios de emisiones en función de la implementación gradual del sistema de transporte masivo (Transmilenio – TM), la adopción de tecnologías de control de emisiones (v.g., filtros de partículas) y la utilización de combustibles de mejor calidad (e.d., ACPM con bajo contenido de azufre).

Exposición personal como criterio de decisión. Si bien el problema de contaminación del aire en Bogotá y otras ciudades similares se encuentra relativamente bien documentado, un fenómeno para el cual no se cuenta con la información apropiada tiene que ver con los niveles de exposición a los que se encuentra sujeta la población en los diferentes microambientes en los que pasamos la mayoría de nuestro tiempo (v.g., espacios intramurales como viviendas y oficinas, cabinas de vehículos de transporte individual y cabinas de vehículos de transporte público).

Esta información es fundamental dado que se cuenta con evidencia que demuestra que las redes fijas de monitoreo no necesariamente son representativas de las condiciones reales de exposición (a contaminantes del aire) de la población. De esta forma, para contar con un análisis más completo e integral, en este trabajo se consideraron los resultados de investigaciones realizadas en Bogotá encaminadas a cuantificar no sólo la contaminación del aire ambiente y las emisiones causantes de dicha contaminación sino también los niveles de exposición personal de la población.

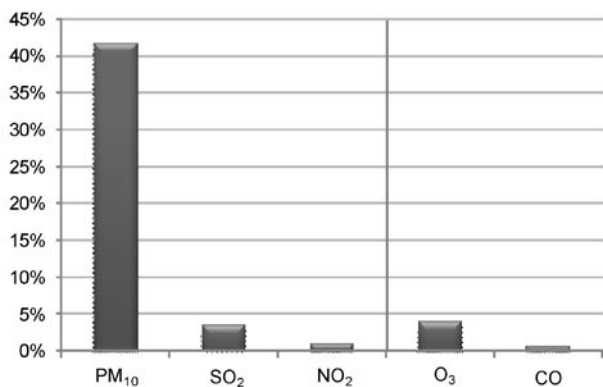
A partir de uno de estos estudios, realizado por el Grupo SUR de la Universidad de los Andes, gracias a la financiación de la SDA y la Corporación Ambiental Empresarial de la Cámara de Comercio de Bogotá (ver Behrentz et. al., 2006), se lograron documentar los niveles de exposición en varios corredores viales de Bogotá (Avenida Carrera Séptima y Avenida NQS) en los que se hace uso de diferentes sistemas de transporte público (transporte público colectivo y transporte masivo, respectivamente). Los resultados de dicho trabajo permiten entender, tal y como será discutido más adelante, los beneficios asociados con un sistema de transporte ordenado y eficiente.

Un segundo estudio (Espinosa et. al., 2007) al que se hará referencia en la sección de resultados de este documento permitió conocer los niveles de exposición personal en microambientes urbanos (de la ciudad de Bogotá) tan variados como residencias privadas, oficinas, estaciones del sistema de transporte público colectivo (TPC), estaciones del sistema TM, el interior de vehículos de carga liviana de servicio público y privado, y el interior de buses de la flota de TPC así como de la flota de TM.

## Resultados

**Material particulado: el principal problema de contaminación en Bogotá.** La Figura 2 muestra el IPE para todo Bogotá y para los principales contaminantes criterio utilizando mediciones de la RMCAB desde 1997 hasta 2008. Estos resultados demuestran de forma bastante contundente que el principal problema de contaminación que enfrenta la ciudad tiene que ver con el material particulado. Para este parámetro se reporta un nivel de incumplimiento del 40% al comparar la norma de larga duración (norma anual) con los

Figura 2. Índice de porcentaje de excedencia de la norma de calidad del aire para CO, PM<sub>10</sub>, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> entre 1997 y 2008 para todo Bogotá (Para PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub>, los valores hacen referencia a la comparación entre promedios diarios y la norma anual. Para el caso de O<sub>3</sub> y CO, la comparación se realiza con base en promedios horarios y la norma octohoraria).

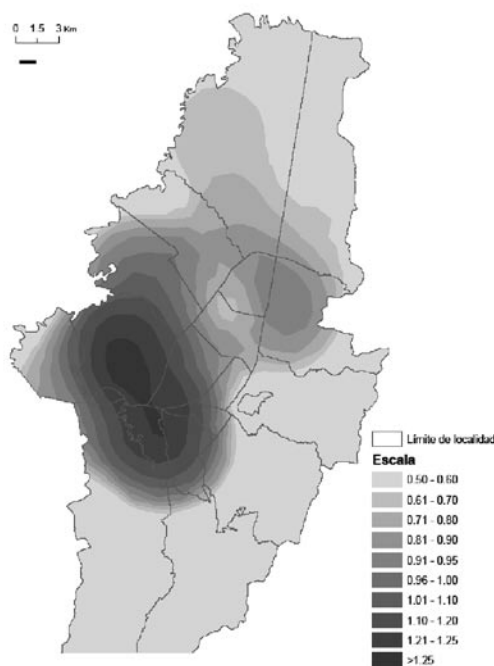


promedios diarios generados por todas las estaciones que se encuentran en capacidad de medir dicho contaminante. Este valor es significativamente más alto que el observado para el contaminante que le sigue en nivel de incumplimiento de la norma de calidad del aire (el ozono).

Otra implicación de estos resultados es que durante una proporción significativa del tiempo, los habitantes de la ciudad se encuentran expuestos a niveles de contaminación por material particulado que son considerados como inadecuados por entidades como la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) y la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Esto mismo puede apreciarse en la Figura 3, en donde se muestra la distribución geográfica del nivel de incumplimiento de la norma nacional de calidad del aire vigente en Colombia. Estos resultados demuestran que no sólo se presentan violaciones a la norma durante un alto porcentaje del tiempo sino también para una fracción significativa del perímetro urbano de Bogotá. Adicionalmente, la figura en referencia muestra que la zona centro-occidental de la ciudad (en donde se encuentra concentrada la actividad industrial) padece de un problema particularmente crítico de contaminación con respecto a lo observado en el resto de la ciudad. En dicha zona es común que más del 90% de los

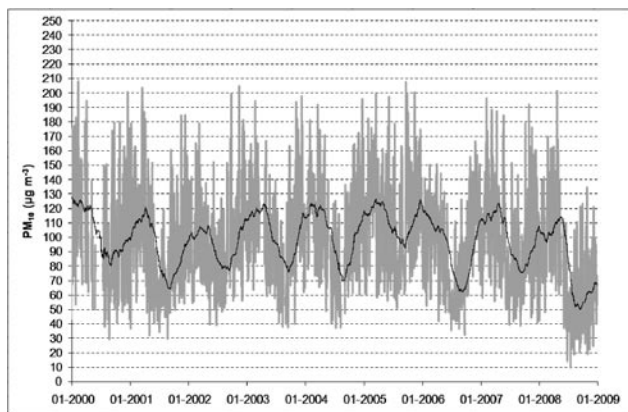
Figura 3. Mapa de iso-concentraciones de PM<sub>10</sub> en Bogotá para el año 2008. La escala de grises representa el nivel de cumplimiento/ incumplimiento de la norma anual (1.0 significa que el promedio anual fue equivalente al valor de la norma anual).



días del año se presenten valores superiores a lo estipulado en las normas vigentes (Gaitán et al., 2007).

La Figura 4 muestra una media móvil (periodo = 90) de las concentraciones medias diarias de PM<sub>10</sub> registradas en la estación localizada en la zona industrial de Bogotá. Estos resultados muestran la dinámica altamente variable en el tiempo que caracteriza a las concentraciones de los contaminantes del aire. Dichas concentraciones suben y bajan dependiendo de la época del año y en función de condiciones tales como la precipitación y los regímenes de viento.

Figura 4. Media móvil (periodo = 90) de las concentraciones atmosféricas de material particulado en la zona industrial de Bogotá.

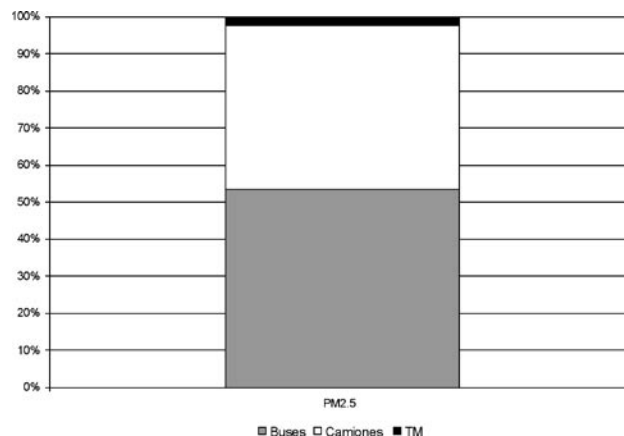


Esta misma figura muestra una tendencia al alza entre los años 2001 y 2005 así como una disminución de la contaminación a partir del segundo semestre del año 2008. Esto último, si bien requiere de análisis más sofisticados para su comprobación, puede estar relacionado con la distribución de combustibles diésel de mejor calidad (e.d, de bajo nivel de azufre) como consecuencia de la entrada en rigor de la Ley 1205 de 2008<sup>1</sup>.

**Fuentes de emisión en Bogotá.** Según el inventario oficial de emisiones, la flota vehicular de la ciudad emite cerca de 1,000 toneladas al año de material particulado mientras que el aporte del sector industrial para este mismo contaminante se acerca a las 1,500 toneladas anuales. Para el caso del sector vehicular, es de resaltar que la gran mayoría de dichas emisiones provienen de los buses de servicio público colectivo.

La Figura 5 muestra la contribución relativa al inventario de emisiones de material particulado por parte de la flota vehicular de la ciudad que opera con ACPM. Estos resultados indican que más del 50% de las emisiones de dicha flota provienen de buses del TPC mientras que menos del 5% de

Figura 5. Contribución de las categorías vehiculares al inventario de emisiones provenientes de vehículos de carga pesada de Bogotá (fuente: Behrentz et al., 2009).

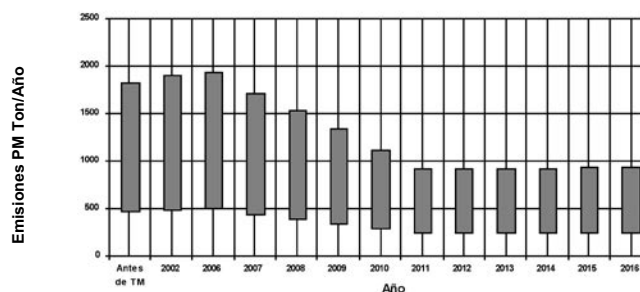


Nota: Buses incluye buses, busetas, microbuses y alimentadores del sistema Transmilenio; TM corresponde a la flota de vehículos articulados del sistema de transporte masivo de la ciudad.

las mismas provienen de los buses de TM. Estas diferencias obedecen no sólo al tamaño de las flotas en referencia sino también a las condiciones de operación y mantenimiento de las mismas.

**Beneficios del sistema de transporte masivo.** La Figura 6 muestra la evolución del inventario de emisiones de PM asociado con las fuentes vehiculares de la ciudad como consecuencia de la implementación gradual de TM. Estos resultados<sup>2</sup> corresponden a un escenario en el que no se mejora la calidad del combustible (como era el caso hasta el año 2008) y en donde no se hace obligatorio el uso de tecnologías de control de emisiones (como es el caso actual). Esto significa que la reducción en emisiones que se observa en la figura en referencia (que es del orden del 50% en un horizonte de 16 años) es resultado exclusivo del reemplazo de la flota de TPC por TM.

Figura 6. Trayectoria esperada para las emisiones de material particulado provenientes de fuentes vehiculares en Bogotá como consecuencia de la implementación progresiva del sistema Transmilenio (fuente: Sepúlveda, 2006).

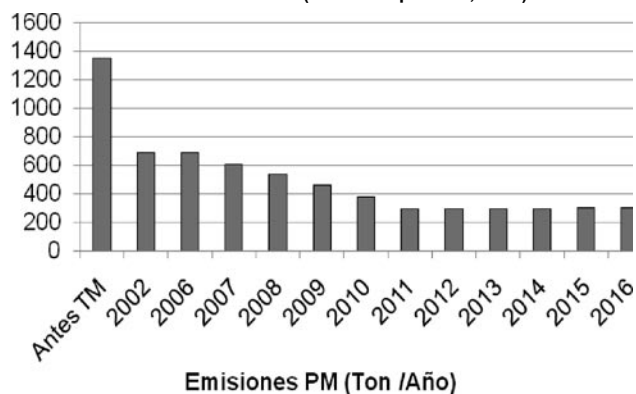


1 Ley 1205 de 2008. También conocida como la Ley del Diésel. A través de este acto legislativo se establecieron los límites máximos de contenido de azufre (y el cronograma de implementación de los mismos) para el ACPM que se distribuye en Colombia.

2 El tamaño de las barras en la figura corresponde al nivel de incertidumbre de los cálculos.

Si además de continuar con la expansión de TM (tal y como se tiene planeado en el actual proyecto de implementación del sistema integrado de transporte público de Bogotá), se logra una mejora incremental en la calidad del ACPM (en concordancia con la Ley 1205) y se desarrolla una norma de emisiones que haga obligatorio el uso de filtros de partículas, la reducción de emisiones de material particulado de la flota de Bogotá (en el mismo escenario de 16 años contados a partir del inicio de la operación de TM) sería superior al 80% (ver Figura 7).

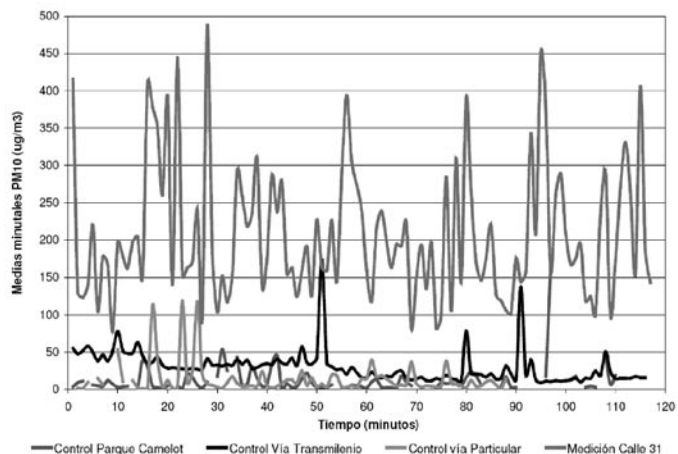
**Figura 7. Trayectoria esperada para las emisiones de material particulado provenientes de fuentes vehiculares en Bogotá como consecuencia de la implementación progresiva del sistema Transmilenio en combinación con políticas de mejora de combustibles y de uso de tecnologías de control de emisiones (fuente: Sepúlveda, 2006).**



En este sentido es pertinente aclarar que las metas de reducción de emisiones deben ser ambiciosas y deberían ser de magnitudes como la anteriormente enunciada. Esto se debe a que, tal y como fue explicado en secciones anteriores de este documento, el crecimiento económico de la ciudad se verá reflejado en mayores emisiones de contaminantes y por lo mismo las políticas de control de emisiones deben tener como meta no sólo mejorar la situación actual sino contrarrestar el efecto y las externalidades de dicho crecimiento.

**Necesidad de evaluar los microambientes específicos.** La Figura 8 muestra una comparación de los niveles de  $PM_{10}$  encontrados en el estudio en el que se llevaron a cabo mediciones en las inmediaciones (sobre la acera) de la Carrera Séptima (en donde se sigue utilizando la flota de buses convencionales) así como en la Avenida NQS (troncal del sistema TM). Estos resultados ilustran que las concentraciones de  $PM_{10}$  en la troncal de TM son superiores a las encontradas en los dos experimentos de control que hicieron parte del estudio (llevados a cabo en vías y en zonas de baja contaminación). Este resultado era esperado ya que la flota de TM y la flota de TPC funcionan con el mismo tipo de combustible. De la figura en referencia es igualmente claro que las concentraciones de  $PM_{10}$  en la troncal de TM son

**Figura 8. Comparación de las concentraciones de  $PM_{10}$  encontradas en las aceras aledañas a la Carrera Séptima y a la Avenida NQS en Bogotá (fuente: Behrentz et al., 2006).**



significativamente inferiores a las concentraciones de  $PM_{10}$  encontradas en la Carrera Séptima<sup>3</sup>.

Según lo documentado en el estudio bajo consideración, estas diferencias se encuentran relacionadas con la naturaleza de la operación de la troncal de TM, la cual es bastante más ordenada y logra mover una mayor cantidad de pasajeros (cerca del triple de los pasajeros movilizadas por la Carrera Séptima) haciendo uso de un menor número de buses. Adicionalmente, los buses que operan por las troncales de TM se detienen (y reinician su marcha) un menor número de veces por unidad de distancia recorrida. Esto último es de particular importancia dado que los motores diésel tienden a producir grandes emisiones de material particulado cuando son sometidos a cargas importantes, tal como es el caso de su puesta en marcha.

Estos resultados implican que, no obstante la discusión presentada en la sección anterior, la estrategia única de organizar y optimizar el sistema de transporte público de la ciudad (e.d, sin incluir mejoras en combustibles o en tecnologías) conlleva a notables beneficios ambientales en lo que se refiere a la calidad del aire en los corredores viales de la ciudad.

**Contaminación en las cabinas de los vehículos.** Una última consideración que debe tenerse en cuenta tiene que ver con la denominada auto-contaminación, fenómeno que se refiere a la infiltración en la cabina del vehículo de una porción de los gases de escape que se producen en el motor

<sup>3</sup> Es importante resaltar que estos resultados hacen referencia a la peor condición encontrada en la Carrera Séptima durante el desarrollo del proyecto. Esto significa que esta discusión no necesariamente aplica para todas las vías de TPC sino para aquellas en donde se presenten las condiciones más críticas: alto flujo vehicular (especialmente de TPC) y condiciones desfavorables para la dispersión de los contaminantes (calles tipo cañón urbano).

como consecuencia de la combustión. Dicho fenómeno, que es virtualmente imposible de evitar en su totalidad, se ve incrementado por variables tales como la configuración de la cabina y el chasis, el estado general de mantenimiento de los vehículos, la ubicación del motor (adelante vs. atrás) y la posición del tubo de escape (arriba vs. abajo).

La *Tabla 1* resume los resultados del estudio de Espinosa et al., (2007) en donde se llevaron a cabo mediciones de concentraciones de CO y material particulado (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub>) en el interior de las cabinas de diferentes tipos de vehículos. Si bien estos resultados corresponden a un esfuerzo piloto que no pretende ser representativo de toda la flota vehicular de Bogotá, los valores indicados representan una evidencia preliminar de la situación de la ciudad.

**Tabla 1. Concentración de contaminantes al interior de las cabinas de los vehículos (media e intervalo de confianza para el 95%) (Fuente: Espinosa et al., 2007).**

Categoría	Ensayo	Concentraciones Medias		
		PM <sub>2,5</sub> (µg m <sup>-3</sup> )	PM <sub>10</sub> (µg m <sup>-3</sup> )	CO (ppm)
TPC	1	210 ± 10	380 ± 14	10 ± 1
	2	95 ± 6	140 ± 7	6 ± 1
	3	60 ± 3	105 ± 6	6 ± 1
	Todos	125 ± 5	210 ± 7	7 ± 1
Taxi	1	140 ± 17	180 ± 14	30 ± 1
	2	150 ± 4	210 ± 7	65 ± 1
	Todos	145 ± 8	200 ± 8	50 ± 1
VP	1	200 ± 7	300 ± 7	55 ± 1
	2	110 ± 5	150 ± 7	15 ± 1
	3	100 ± 9	130 ± 7	10 ± 1
	4	120 ± 13	150 ± 7	10 ± 1
	5	130 ± 6	180 ± 7	10 ± 1
	Todos	130 ± 4	175 ± 7	20 ± 1
TM	1	270 ± 18	320 ± 7	6 ± 1
	2	50 ± 4	70 ± 7	4 ± 1
	3	95 ± 10	120 ± 7	4 ± 1
	4	140 ± 10	180 ± 7	4 ± 1
	Todos	140 ± 7	175 ± 7	4 ± 1

TPC: Buses de transporte público colectivo. VP: Vehículo particular de carga liviana. TM: Buses de Transmilenio. Todos: Media de todos los ensayos para cada categoría.

En el interior de las cabinas de la gran mayoría de los vehículos evaluados (incluyendo buses de TCP y de TM, taxis y vehículos particulares) se encontraron concentraciones de material particulado que se consideran elevadas y que según la OMS se encuentran asociadas con efectos negativos en la salud de las personas expuestas. En el peor de los casos, se encontraron concentraciones medias de PM<sub>2,5</sub> que

superaron los 200 µg m<sup>-3</sup>, valor que excede en cerca de un orden de magnitud las recomendaciones de la OMS. Para el caso del CO las condiciones resultaron ser más críticas en los vehículos particulares y taxis.

El análisis de las tendencias en los niveles de contaminación en las cabinas por material particulado y CO permiten concluir que dichos niveles se encuentran asociados con mecanismos y procesos distintos para los vehículos de gasolina (taxis y vehículos particulares), en comparación con los vehículos de ACPM (buses). Dichos niveles son el resultado no sólo de la auto-contaminación sino también de la intrusión de los gases de escape producidos por los vehículos que transitan en los alrededores.

Los vehículos de ACPM se caracterizan por elevadas emisiones de partículas así como por bajas emisiones de CO. El caso contrario es cierto para los vehículos de gasolina. Estos últimos generan mayores cantidades de CO (en comparación con los motores diésel) pero menores cantidades de partículas. Esto significa que la contaminación en las cabinas de los buses de TPC y TM (elevados niveles de partículas y bajos niveles de CO) se explica mayoritariamente por la auto-contaminación. Por su parte, en los vehículos particulares y los taxis, la contaminación observada es la combinación de los dos efectos enunciados: auto-contaminación + impacto de la flota circundante.

Estos resultados significan que el impacto de la flota de transporte público sobre las condiciones ambientales de la ciudad no se limita a su aporte al problema general de contaminación del aire sino que se extiende a un deterioro de la calidad ambiental en los corredores viales, en las cabinas de los propios buses y en las cabinas de los vehículos que circulan en carriles alledaños.

Al mismo tiempo, estos resultados indican que es necesario hacer esfuerzos para disminuir los efectos de la auto-contaminación en la flota de Transmilenio. Si bien estos buses han demostrado sus beneficios en términos de emisiones (ver *Figura 5*) y calidad del aire en los corredores viales (ver *Figura 8*), este no es el caso para las condiciones al interior de sus cabinas (ver *Tabla 1*).

Esto último puede deberse no sólo a fallas en el aislamiento entre el habitáculo del motor y la cabina de los buses sino también por la posición frontal del motor de muchos de los buses de TM así como por la característica común a toda la flota de buses articulados en la que el tubo de escape se encuentra en la defensa posterior del vehículo (es decir muy

cerca del nivel de la superficie de la vía). Las dos últimas condiciones se encuentran documentadas en la literatura científica internacional como promotoras de auto-contaminación.

### Conclusiones y expectativas

Durante gran parte de la década actual se ha presentado una tendencia al alza en las concentraciones atmosféricas de material particulado en Bogotá. Este efecto se ha sentido de mayor manera en algunas localidades tales como Puente Aranda (zona industrial) y Kennedy (ubicada en el centro occidente de la ciudad). A partir del segundo semestre de 2008 se ha hecho manifiesta una tendencia distinta en la que empieza a evidenciarse una disminución en la contaminación de la ciudad. Dicha condición, si bien requiere de mayores análisis, podría estar relacionada con la comercialización de combustibles de mejor calidad en Bogotá (específicamente ACPM con bajo contenido de azufre).

En este sentido debemos seguir vigilantes del cumplimiento de las normas y los compromisos establecidos por Ecopepetrol<sup>4</sup> no sólo en términos de la calidad del combustible que actualmente se distribuye en la ciudad sino también en lo que se refiere a las metas futuras que permitan que todo el país se ponga a tono con los estándares internacionales en esta materia.

En este mismo tema, dada la calidad del combustible con la que se cuenta actualmente, es necesario dar el paso siguiente y sacar adelante la normativa que haga obligatorio el uso de sistemas de control de emisiones<sup>5</sup>. La implementación de estas tecnologías es un paso necesario y urgente para lograr revertir de forma definitiva las tendencias de contaminación del aire en Bogotá (en lo que se refiere a material particulado). En este punto es fundamental resaltar que no existe sustituto alguno para estas estrategias. Ni siquiera la entrada masiva de combustibles alternativos, tales como el biodiesel, logra una reducción de emisiones en las magnitudes que se alcanzan con los filtros de partículas y otros sistemas similares.

Finalmente, si se continua con las políticas de mejora de calidad de combustibles, se logra sacar adelante una norma de emisiones que obligue al uso de tecnologías de control de emisiones a los vehículos diésel y se complementan estas medidas con estrategias enfocadas al sector industrial (tales como la promoción del uso masivo de gas natural en la industria) se puede decir que el panorama para el problema de calidad del aire en la ciudad es esperanzador. Esto es especialmente cierto si logramos ser exitosos en los proyectos de ampliación de los sistemas de transporte masivo así como en la implementación del sistema integrado de transporte público.

Lo anterior, claro está, sin olvidar que hoy en día la ciudad padece de un severo problema de contaminación del aire que la hace una de las grandes urbes más contaminadas de América Latina y en donde se presentan índices de morbilidad infantil (asociada con enfermedad respiratoria) que exceden los niveles de ciudades con características socio-económicas similares.

4 Empresa mixta (de mayoría estatal) que tiene el monopolio en Colombia de la refinación y distribución de los combustibles derivados del petróleo.

5 Esta opción no era posible con el combustible anterior dado que la mayoría de las tecnologías disponibles comercialmente cuentan con requerimientos de calidad en relación al contenido máximo de azufre.

## Referencias Bibliográficas

Behrentz, E., Osorio, D.M., Uscátegui, N.A. 2006. Concentraciones de material particulado respirable suspendido en el aire en inmediaciones de una vía de transporte público colectivo (Contrato CC1160-490-2006). Corporación Ambiental Empresarial de la Cámara de Comercio de Bogotá, Universidad de los Andes.

Behrentz, E., Sánchez, N., Rodríguez, P. 2009. Definición de elementos técnicos para la formulación de políticas distritales encaminadas al mejoramiento de la calidad del aire en Bogotá - Inventario de emisiones provenientes de fuentes fijas y móviles

(Contrato de Ciencia y Tecnología # 347 del 24 de Noviembre de 2006). Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, Universidad de los Andes. ISBN: 978-958-695-442-6.

Espinosa, M., Maldonado, A., Behrentz, E. 2007. Contaminación en microambientes urbanos: caso de estudio en Bogotá, Colombia. Publicado en las memorias del Quinto Congreso Interamericano de la Calidad del Aire – AIDIS. Santiago de Chile, Chile.

Gaitán M., Cancino, J., Behrentz, E. 2007. Análisis del estado de la calidad del aire en Bo-

gotá. Revista de Ingeniería de la Universidad de los Andes. Volumen 26, Páginas 81 a 92.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT). Decreto 979 y Resolución 601 de 2006.

Sepúlveda, A.M. & E. Behrentz (director de tesis). 2006. Análisis del beneficio ambiental asociado con la implementación del sistema Transmilenio en Bogotá. Tesis de grado en Ingeniería Ambiental – Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes.

# LA INFLUENCIA DE LOS PATRONES DE FLUJO EN LAS ESTRUCTURAS DE ALMACENAMIENTO EN SISTEMAS URBANOS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA

Muriel<sup>1</sup>, D., Garzon<sup>2</sup>, F., y Mosquera<sup>3</sup>, C.  
Pontificia Universidad Javeriana, Cali.  
Grupo de investigación en Gestión Avanzada del  
Agua Urbana. Calle 18 No. 118-250 Cali, Colombia.

## **Abstract.**

*The hydraulic behavior of clearwell chambers and storage tanks has been neglected over the years in Colombia. The use of simplified or “black-box” models has created a gap between the real hydrodynamic behavior and the behavior assumed by designers. The use of idealized models does not allow the optimization of processes such as disinfection and storage, and consequently, enormous amounts of money are invested in order to maintain water quality in water distribution systems. A computational fluid dynamic approach is undertaken in this study to improve the hydraulic efficiency in two case studies: a chlorine contact tank and a storage tank. For the clearwell, an alternative to increase the contact time in 40% was found. For the storage tank, the best and the worst operative scheme were found by analyzing the existence of recirculation and dead zones. This approach could be use in both contact and storage tanks, providing highly accurate results in short time and low cost.*

## **Resumen.**

*El comportamiento hidráulico de los tanques de contacto y almacenamiento en sistemas de distribución de agua potable ha jugado un papel secundario a través de los años en Colombia. El uso de modelos simplificados o “cajas negras” ha creado una brecha de conocimiento entre el comportamiento hidrodinámico real y el asumido por los diseñadores para estas estructuras. El empleo de modelos ideales no permite la optimización de procesos como la desinfección y el almacenamiento, y como consecuencia, se invierten enormes cantidades de dinero para asegurar la calidad del agua en el sistema. Este estudio presenta un acercamiento al problema basándose en la dinámica de fluidos computacional con el fin de aumentar la eficiencia de dos estructuras: un tanque de contacto de cloro y un tanque de almacenamiento. Para el tanque de contacto se encontró una alternativa para aumentar el tiempo de contacto en un 40%; mientras que para el tanque de almacenamiento, se determinaron el mejor y el peor esquema operativo resultado del análisis de la presencia de zonas de recirculación. De esta experiencia es claro que esta aproximación puede ser usada en tanques de contacto y almacenamiento, proporcionando resultados altamente confiables en corto tiempo y a bajo costo.*

---

<sup>1</sup> Investigador, dfmuriel@javerianacali.edu.co;  
<sup>2</sup> Profesor asistente, fgarzon@javerianacali.edu.co;  
<sup>3</sup> Asistente de investigación, cmo@javerianacali.edu.co.

**Key words:** Computational fluid dynamics, storage tanks, clear well chambers

**Palabras clave:** Dinámica de fluidos computacional, tanques de almacenamiento, tanques de contacto



## 1. Introducción

Tanto los tanques de almacenamiento (TA) como los tanques de contacto de cloro (TCC) son estructuras que influyen de manera importante en la calidad del agua de los sistemas de distribución de agua potable (Grayman y otros, 2000; Crozes y otros, 1998). Por ejemplo, los TA pueden presentar hasta 50% de reducción en los niveles de desinfectante residual, lo que constituye un gran problema para el mantenimiento de la calidad a través del sistema de distribución. Por otro lado, los TCC pueden presentar tiempos de contacto (TC) tan bajos como 5 minutos, lo cual obliga a los operadores de dichas estructuras a aumentar la dosificación de desinfectante, y así cumplir con los niveles de cloro residual requeridos a la salida de las plantas de tratamiento. La influencia de estas estructuras en los problemas de calidad del agua es visible, pero el origen aún no es claro en la profesión colombiana.

En general, estos problemas son atribuidos al complejo comportamiento hidrodinámico del agua en estas estructuras (Shiono y Teixeira, 2000; Grayman y otros, 2004). Por ejemplo, debido a los grandes volúmenes almacenados en los TA, se puede presentar la interacción de diversas zonas caracterizadas por comportamientos diferentes. De estas, las más problemáticas son las zonas muertas o de estancamiento y las zonas de recirculación, que se originan debido a la baja energía de mezcla proporcionada por el chorro de entrada, y las bajas velocidades de flujo. Las consecuencias inmediatas de esta situación son el aumento del tiempo de detención y la reducción de los niveles de desinfectante residual.

Por su parte, los TCC también pueden presentar zonas de recirculación y estancamiento, pero la situación más problemática es el corto circuito que los aleja del flujo tipo pistón, que es la condición de flujo ideal para este tipo de estructuras. Esta condición hidráulica propicia que una o varias partículas tengan un TC inferior al tiempo de detención teórico (TDT), resultado este de dividir el volumen del tanque sobre el caudal de flujo, provocando que el TC atribuido a la estructura para desinfección sea mucho menor al TDT. Así, un TCC con marcadas zonas muertas y de recirculación, y problemas de corto circuito constantes, puede presentar TC tan bajos como el 10% del TDT.

No es extraño encontrar en nuestro medio TA construidos y diseñados para almacenar volúmenes de agua exagerados en situaciones de demanda muy bajas, provocando tiempos de detención que pueden fácilmente superar las semanas.

Tampoco es extraño encontrar TCC que no proveen flujo pistón, y que sin la presencia de caminos serpenteantes a su interior, no garantizan un TC óptimo. Y aún más preocupante para esta última estructura, no es para nada extraño encontrar diseños que consideren el TC exactamente igual al TDT, lo cual constituye una concepción errónea que afecta gravemente el proceso de desinfección.

La influencia de estos fenómenos en la calidad del agua es fácilmente predecible siempre y cuando se conozca la hidrodinámica del agua en estas estructuras, y es aquí donde la profesión debe apoyarse en las herramientas ya existentes. El estudio en profundidad de la hidráulica de estas estructuras permite evitar muchos de los problemas de calidad antes mencionados, que son el reflejo de modelos simplificados de diseño con una visión parcial del problema que representan. Es así que la profesión hoy debe estar en la capacidad de encontrar y describir zonas estancas, zonas de recirculación y eventos de corto circuito para TA y TCC, en cualquier situación operativa en la que se encuentren estas estructuras, pero además debe emplear metodologías que le permitan implementar medidas de control a estas situaciones indeseables.

Para lograr esto, la profesión cuenta con herramientas modernas como: la modelación física a escala, los modelos sistémicos, los estudios de trazadores a escala real, y la modelación numérica. Por un lado, los modelos a escala son la representación de una estructura existente o a construir a una escala física reducida. Con el apoyo de cámaras de video y trazadores químicos fluorescentes, es posible describir el comportamiento hidrodinámico de la estructura en estudio. Por otro lado, los estudios de trazadores a escala real, son el análisis de la hidráulica de estructuras ya construidas con el apoyo de trazadores químicos. Por su parte, la modelación numérica o dinámica de fluidos computacional (DFC) es el estudio de la hidrodinámica de estructuras construidas o por construir, basado en la representación del movimiento de fluidos por medio de las ecuaciones de Navier-Stokes (conservación de masa, energía, y cantidad de movimiento) para cada uno de los elementos en los que se ha discretizado el volumen de control del problema. Como resultado, la DFC provee la magnitud de los vectores de velocidad en función del espacio y del tiempo, garantizando una descripción robusta de la hidráulica de las estructuras en estudio.

En el caso de los TA, varios trabajos han estudiado la pertinencia de las diferentes metodologías aplicándolas a varios casos de estudio, destacándose entre ellas la DFC. Es

así como Grayman y otros (1996) aplicaron y discutieron las ventajas y desventajas de la modelación física a escala, la dinámica de fluidos computacional (DFC), y los modelos sistémicos, en la predicción de la calidad del agua en TA en función de su forma geométrica, recomendando el uso de la DFC. Luego, Grayman y otros (2004) basados en las anteriores experiencias desarrollaron una serie de recomendaciones relacionadas con el diseño, reconfiguración, y operación de los TA, con aproximaciones diferentes para el monitoreo (parámetros de calidad de agua, parámetros hidrodinámicos, y temperatura) y la modelación (física a escala, modelos sistémicos, y DFC). Finalmente, Mahmood y otros (2005) aplicaron y demostraron que la DFC asociada con mediciones de temperatura del agua y de niveles de cloro residual es una herramienta poderosa para la predicción de los patrones hidrodinámicos de la mezcla en TA.

De otra parte, para el análisis de los patrones de flujo en TCC, se ha demostrado que la dinámica de fluidos computacional (DFC) es la metodología más adecuada. Es así como, Hannoun y Boulos (1997) demostraron que, basados en pruebas y comparaciones de modelos hidrodinámicos computacionales y datos de monitoreo en estructuras en operación, la DFC es una herramienta confiable en la definición del comportamiento del agua en los TCC. Hannoun y otros (1998) posteriormente emplearon estos mismos modelos basados en DFC para optimizar el rendimiento hidráulico y eficiencia de los TCC, demostrando su aplicabilidad en estructuras tanto circulares como rectangulares. Pero tal vez lo más interesante para nuestra profesión es como Stamou (2008) demostró que la DFC es una herramienta de gran versatilidad que permite el análisis rápido y a bajo costo de las modificaciones de la geometría del TCC con el objeto de mejorar su eficiencia, esto antes de llegar a la fase de construcción.

A pesar de las ventajas y la existencia de diversos estudios de DFC en TA y TCC a nivel internacional, son pocas las aplicaciones reportadas de esta metodología en la industria del agua colombiana (Muriel, 2008; Mosquera, 2009). En general, este tipo de estructuras está sujeto a diferentes simplificaciones. Los TA son considerados como modelos de "cajas negras", donde el agua se analiza a la entrada y a la salida, sin repercusión alguna de la hidráulica interna. Por otro lado, en algunos casos se consideran los TCC como estructuras con regímenes perfectos, y como consecuencia, se recomienda tomar el valor del TC igual a la magnitud del TDT (Arboleda, 2000). Sea cual fuere la estructura en estudio, la repercusión de los patrones de flujo está siendo ignorada por la profesión.

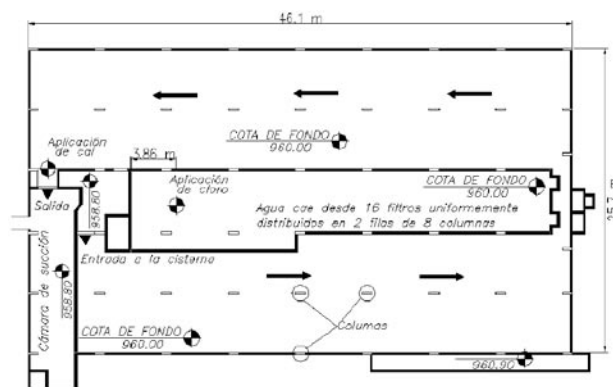
Como consecuencia, este estudio presenta el análisis hidrodinámico basado en la DFC de dos casos de estudio: un TA y un TCC. Para el TA se presentan los resultados obtenidos para diferentes esquemas de operación; mientras que para el TCC se analizan diversas alternativas de configuración geométrica que permitan mejorar la eficiencia del proceso de desinfección. La metodología empleada, considerando las dos estructuras estudiadas, es práctica, de fácil acceso, y de bajo costo, aplicable a cualquier tipo de estructura bajo diversas condiciones. Por estas razones, se puede plantear que, para nuestras condiciones, se debería considerar esta herramienta como la metodología óptima para el análisis y la optimización hidráulica de este tipo de estructuras.

## 2. Casos de estudio

El tanque de almacenamiento estudiado es una estructura circular en concreto reforzado de 45 m de diámetro y 9.5 m de altura útil de almacenamiento, en donde se estaban presentando pérdidas importantes en los niveles de desinfectante residual de hasta el 50% con relación al nivel de entrada (Muriel, 2008). El interés fundamental de este caso de estudio era establecer si la energía del chorro generado por la tubería de 24 pulgadas a la entrada del tanque era suficiente para asegurar una mezcla adecuada del agua en la estructura, y si se formaban o no zonas de estancamiento permanente que pudiesen ser las causantes de la pérdida de desinfectante.

Por su parte, el tanque de contacto de cloro en estudio, como muchos tanques en Colombia, no era propiamente un TCC (Figura 1). De acuerdo a su configuración geométrica, esta estructura era considerada una cisterna, a la cual se le asocian bajas eficiencias en el proceso de inactivación de la carga contaminante, debido a que no proporcionaba un camino serpenteante, presentaba grandes zonas muertas, zonas de recirculación, y corto circuito constante. Debido

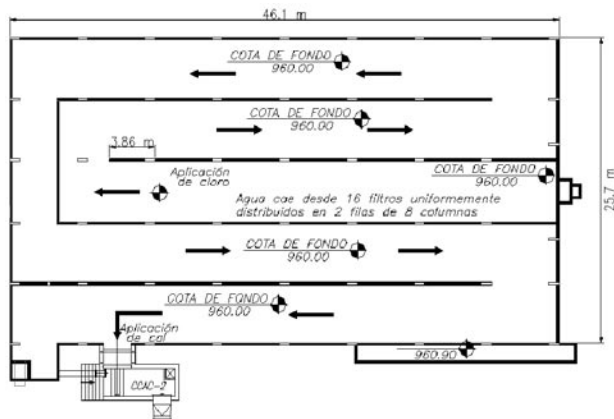
Figura 1. Configuración inicial del TCC en estudio



a un pobre diseño hidráulico (USEPA, 1991), se consideró que el TC se encontraba entre un 20% y 30% del TDT. Con base en datos operacionales del año 2008 (1.0 m<sup>3</sup>/s y 1.2 m de lámina de agua), el TC se encontraba entre 3.4 minutos y 4.1 minutos, muy lejos del estándar requerido por la norma (RAS, 2000) de aproximadamente 30 minutos.

Esta situación requería una optimización urgente. La baja eficiencia hidráulica provocaba gran consumo de desinfectante, en este caso cloro gaseoso, para cumplir con los estándares de calidad colombianos. El operador encargado de la estructura, consiente de este hecho, decidió plantear la reconfiguración de la cisterna y adecuarla como un tanque de contacto. Para inicios del año 2009, la reconfiguración (Figura 2) estaba lista para su construcción, sin embargo, análisis de la hidrodinámica de esta estructura no se encontraban disponibles, y por lo tanto, el diseño planteado como reconfiguración no estaba listo para considerarse óptimo.

Figura 2. Reconfiguración propuesta del TCC en estudio



### 3. Metodología

La metodología empleada para el estudio de las dos estructuras descritas anteriormente es similar puesto que se basa en el desarrollo de un modelo numérico, lo cual considera una fase inicial de discretización del volumen de control y definición de las condiciones de frontera, seguida esta por el procesamiento propiamente dicho de la simulación, para finalizar en el análisis de los resultados o pos-procesamiento de estos. A continuación se presentan los aspectos a destacar durante la realización de estos análisis.

#### 2.1. Modelos computacionales empleados

Para lograr una interpretación de los fenómenos hidrodinámicos complejos presentes en los TCC y TA, se requiere una técnica que, con la mayor veracidad posible, represente la hidráulica interna de estas estructuras. Para este estudio, se empleó la dinámica de fluidos computacional (DFC) como

metodología para la descripción de la hidrodinámica y localización de los fenómenos asociados.

La DFC es la representación del flujo de fluidos basado en las ecuaciones de Navier-Stokes (Anderson, 1995). Esto es, la representación matemática de la conservación de masa, energía, y cantidad de movimiento. Por medio de la solución de estas ecuaciones, es posible conocer la magnitud y dirección de los vectores de velocidad en función del espacio y tiempo en un volumen de control cierto.

Por su parte, un modelo computacional basado en la DFC se define con la selección del volumen en estudio y la representación matemática (ecuaciones de Navier-Stokes) del comportamiento del fluido. El volumen de estudio lo comprenden la geometría detallada y el mallado de la misma. La representación matemática se efectúa al seleccionar el modelo de turbulencia, el método de solución de las ecuaciones, y el criterio de convergencia.

Dados los recursos computacionales disponibles a la fecha, resultado de impresionantes avances tecnológicos ocurridos en las últimas décadas, la DFC se ha convertido en la metodología predilecta para el análisis de diversos procesos que involucran el movimiento de fluidos. La industria aeroespacial, automotriz, y recientemente la medioambiental, hacen uso de las modelaciones computacionales para explicar fenómenos que, antes de la modelación hidrodinámica computacional, eran imposibles de explicar debido a la complejidad y cantidad de información a manejar.

De igual forma, el surgimiento de paquetes comerciales (Fluent®, Ansys CFX®, Flow 3D, entre otros) han influido fuertemente en la utilización de esta metodología. Al reducir la complejidad asociada en la simulación, estos paquetes asisten al usuario en el proceso, reduciendo de manera importante el tiempo de modelación requerido.

Por un lado, el software seleccionado para la modelación del TA fue HydroTank®. Este software, resultado de un proyecto de investigación (Grayman y otros, 2000) de la Water Reseach Foundation (antes American Water Works Association Research Foundation), disminuyendo en gran medida la complejidad asociada en el proceso de simulación. Ya que fue producido para un solo propósito, la modelación de estructuras de almacenamiento, no requiere mayor control sobre la geometría en estudio, selección del mallado, o modelos de turbulencia. Ya que es un programa diseñado para asistir al usuario, sólo emplea la descripción geométrica del volumen en estudio (diámetro del tanque, diámetro y loca-

lización de la tubería de entrada, lámina de agua). Dada la simplicidad geométrica del volumen de estudio, este software es considerado adecuado para la modelación hidrodinámica de los TA (Grayman y otros, 2000).

Por su parte, para el TCC el software seleccionado fue Fluent 12<sup>®</sup> desarrollado por Fluent Inc. Ya que el programa empleado no está orientado a una aplicación específica, permitió la descripción total y detallada de la geometría y del volumen en estudio.

En general, la DFC como metodología sigue tres pasos: pre-procesamiento, procesamiento, y pos-procesamiento, y para cada paso se contó con un software asociado. HydroTank<sup>®</sup> y Fluent 12<sup>®</sup> son los software encargados del procesamiento, Gambit<sup>®</sup> (desarrollado por Fluent Inc.) es el encargado del pre-procesamiento en el TCC, y Tecplot<sup>®</sup> el encargado del pos-procesamiento.

El pre-procesamiento es la definición del volumen en estudio, esto es, la definición del volumen de agua al interior del TA o TCC. Para delimitar este, es necesario establecer la geometría de las estructuras y las condiciones de frontera, o en otras palabras, definir dimensiones y localización de: entrada a los tanques, salidas, columnas, piso, y techo. Finalmente, una vez definido el volumen en estudio y las condiciones de frontera, se discretiza el volumen general en elementos o volúmenes de control para conformar una malla. Para el TCC se analizaron mallas que contenían entre cien mil y seis cientos mil elementos o volúmenes de control, lo cual garantizó el cubrimiento de la sensibilidad de los resultados a estas resoluciones de mallado. Para el TA se analizaron mallas semi-finas ente cien y ciento cincuenta mil elementos.

Un criterio importante a tener en cuenta es la forma de los elementos, tanto para el TA como el TCC los volúmenes de control fueron hexagonales. Una malla con este tipo de elementos entrega resultados más precisos con la misma cantidad de nodos comparada con mallas tetraedrales. De igual forma, la representación seleccionada para los elementos de la malla, facilita la convergencia de las ecuaciones de conservación.

El procesamiento se inicia una vez establecido el volumen de estudio y la malla. Se selecciona entonces el tipo de fluido en estudio, el modelo de turbulencia, el método de solución de las ecuaciones de Navier-Stokes que representan las variables asociadas a la conservación de masa, energía y cantidad de movimiento.

Para el TCC se seleccionó el modelo de turbulencia  $\kappa\text{-}\epsilon$ , y un método para la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes de primer orden, aplicados a un estado permanente. De acuerdo a Hannoun y Boulos (1997), Wang y otros (2003), y Khan y otros (2006), las simulaciones en TCC basadas en el modelo de turbulencia  $\kappa\text{-}\epsilon$  y un método de solución matemático de primer orden presenta una buena aproximación a los aspectos de generación de turbulencia que se pueden presentar en los TCC, como lo son la turbulencia generada por la energía de entrada y por los cambios de geometría que modifiquen el flujo de agua. Para el TA no se contó con el control de estos aspectos.

Finalmente, y antes de iniciar el procesamiento computacional, se establece el criterio de convergencia. Este paso, ya que permite establecer el criterio de validez de los resultados, es uno de los más importantes de toda la DFC. Para este estudio por ejemplo, se estableció que las ecuaciones convergen cuando dos residuales consecutivos asociados a ellas difieren en menos de  $1 \times 10^{-4}$  es su magnitud.

Una vez el procesamiento converja y por tanto finalice, se inicia el pos-procesamiento de la información. Ya que se cuenta con cantidades de información importantes, una herramienta que permita el manejo efectivo de los resultados es fundamental. Si se toma por ejemplo la magnitud de la velocidad, los resultados de ésta variable estarán en función de tres variables adicionales en espacio ( $x,y,z$ ), y si la modelación es en estado no permanente, interviene una variable adicional, tiempo ( $t$ ). Esto quiere decir que, por ejemplo para la magnitud de la velocidad, es posible obtener cualquier valor en función del espacio y tiempo, lo cual representa una cantidad de datos difícilmente manejable. Así, Tecplot<sup>®</sup> permite el estudio detallado basado en la representación gráfica de los resultados en una escala de colores, evitando el manejo de gráficas en dos dimensiones que constituirían cantidades inmanejables.

## 2.2 Escenarios

La *Tabla 1* presenta los escenarios seleccionados para la simulación del TA, estos datos corresponden a los parámetros máximos y mínimos registrados durante el año 2006,

Tabla 1. Escenarios para el TA en estudio

Escenario	Caudal [m <sup>3</sup> /s]	Lámina de agua [m]
1. Flujo máximo y lámina de agua mínima	1.55	1.00
2. Flujo mínimo y lámina de agua mínima	0.05	1.00
3. Flujo máximo y lámina de agua máxima	1.55	5.00
4. Flujo mínimo y lámina de agua máxima	0.05	5.00

lo cual garantiza el análisis de los escenarios críticos. Debe tenerse en cuenta que el análisis de este tipo de estructura se realiza sólo para el ciclo de llenado. Esto se debe a que esta estructura debe operar en régimen de flujo completamente mezclado para reducir las pérdidas en los niveles de desinfectante residual (Grayman, 2000), y la única fuente de energía para el mezclado proviene del chorro de entrada en los ciclos de llenado.

En cuanto a la cisterna, la *Tabla 2* presenta los escenarios analizados para la cisterna en estudio. De igual forma que en el TA, los escenarios críticos son resultado de parámetros máximos y mínimos registrados por el operador, en este caso, el año 2008. Debe recordarse que los fenómenos hidrodinámicos asociados se acentúan en los límites de las condiciones hidráulicas de las estructuras. Por ejemplo, si una estructura presenta zonas muertas o de recirculación en condiciones promedio de operación, el tamaño de estas zonas aumentará a medida que los niveles de agua se hagan más bajos o más altos (Mosquera, 2009).

**Tabla 2. Escenarios para la cisterna en estudio**

Escenarios	Caudal [m <sup>3</sup> /s]	Lámina de agua [m]
1. Flujo máximo y lámina de agua mínima	1.03	1.14
2. Flujo mínimo y lámina de agua mínima	0.84	1.14
3. Flujo máximo y lámina de agua máxima	1.03	2.03
4. Flujo mínimo y lámina de agua máxima	0.84	2.03

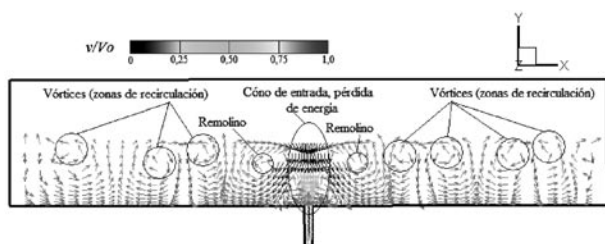
Por otro lado, el TCC fue analizado al caudal de diseño (1.25 m<sup>3</sup>/s) y la lámina de agua de diseño (2.15 m).

### 3. Resultados

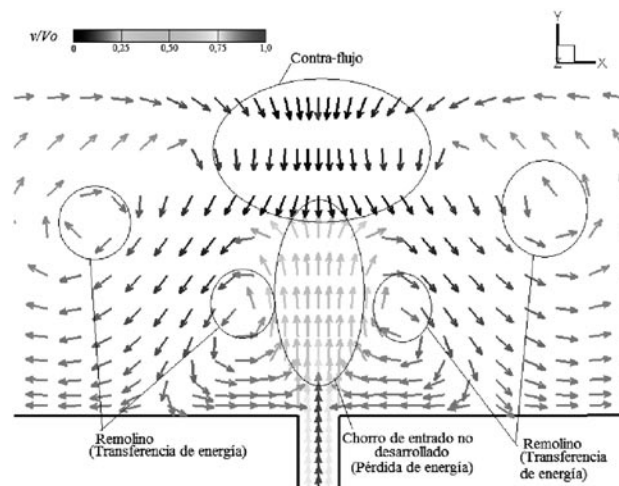
#### 3.1 Tanque de almacenamiento (TA)

Para el tanque de almacenamiento, la situación más crítica se presentó al caudal de entrada mínimo (0,05 m<sup>3</sup>/s) y la lámina de agua máxima (5,0 m). Este caso representa la energía mínima disponible para mover y mezclar la mayor masa de agua almacenada. Como consecuencia de un mecanismo de mezcla insuficiente, son identificables (*Figura 3*) 7 vórtices o zonas de recirculación en el tercio superior del agua

**Figura 3. Presencia de vórtices, remolinos de transferencia y contra flujo en el tanque de almacenamiento**



**Figura 4. Chorro de entrada y efecto de contra-flujo**



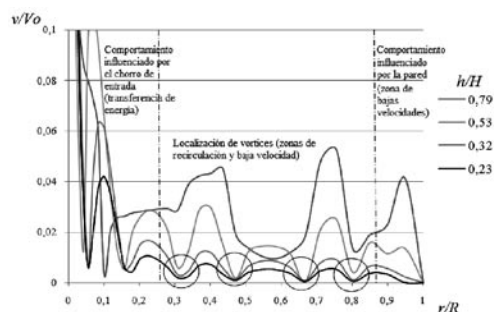
almacenada, dos pequeños mecanismos de transferencia de energía o remolinos localizados en cercanías del chorro de entrada, y un contra-flujo en el cono de entrada que evidencia la pérdida de energía.

Debido a la baja energía de entrada, el chorro no se desarrolla completamente (*Figura 4*), reduciendo la cantidad de energía disponible para la transferencia desde el chorro hacia la masa de agua que lo rodea. Adicionalmente, se presenta un efecto de contra-flujo, lo cual reduce aún más la disponibilidad de energía a transferir.

En general, fueron identificados tres comportamientos que permiten concluir que, para el tanque en estudio, deben ser evitados ciclos de llenado con caudales bajos. La *Figura 5* presenta cuatro series de velocidades ( $v$ ) correspondientes a cuatro alturas diferentes ( $h$ ), las cuales van desde el 23% de la lámina de agua hasta 79% de la misma. Estas series son graficadas desde el centro geométrico del TA hasta el radio ( $R$ ) de la estructura.

La primera zona presentada en la *Figura 5* exhibe un comportamiento influenciado por el chorro de entrada. En esta área se presenta la transferencia de energía. La zona intermedia presenta un comportamiento influenciado por las bajas velocidades, y a causa de esto, se originan zonas de

**Figura 5. Chorro de entrada y efecto de contra-flujo**



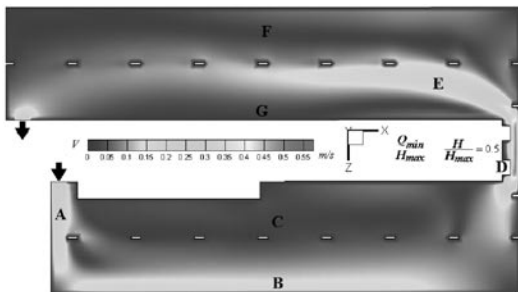
recirculación. El análisis de la convergencia de las series presentadas en la *Figura 5* (círculos) permite la localización de los vórtices de agua estancada, los cuales provocarán parcelas de agua con altos tiempos de detención y bajos niveles de desinfectante residual. Una de las principales razones para evitar caudales tan bajos en esta estructura, son estos vórtices de aguas estancadas. Una vez el esquema de operación entre al ciclo de vaciado, los volúmenes de agua con bajos contenido de desinfectante residual entrarán rápidamente al sistema de distribución.

Finalmente, la tercera zona presenta bajas velocidades sin mayor influencia en la zona media. Este comportamiento se atribuye al esfuerzo cortante asociado a la pared lateral.

### 3.2 Cisterna y tanque de contacto (TCC)

Para los cuatro escenarios estudiados en la cisterna, el comportamiento de los patrones de flujo fue recurrente. Mosquera (2009) estableció que, dada una lámina de agua constante no importa que caudal se utilice, el comportamiento hidrodinámico será siempre el mismo. A manera de ilustración en la *Figura 6* se presenta el resultado del escenario 4 (flujo mínimo y lámina de agua máxima) para la cisterna en estudio.

Figura 6. Zonas de isovelocidades para el Escenario 4 en la cisterna



El primer patrón de flujo identificable es el chorro de entrada golpeando una columna (A). Ya que la disipación de la energía de entrada es ineficiente, provoca una estratificación importante en la cámara inferior. Son identificables un chorro en corto circuito (B) y una gran zona de recirculación (C) que se extienden desde la entrada a la estructura hasta la contracción del área de flujo (D). Una vez se sobrepasa la contracción, es identificable un nuevo chorro en corto circuito (E) en la cámara superior. A causa de este chorro, provocado por la disminución del área de flujo resultado de la contracción de área (D), se presentan dos zonas de recirculación adicionales (F y G). Finalmente, es importante resaltar el efecto de las columnas. Tanto en la cámara superior como en la inferior constituyen una línea clara de división

del flujo. Debido a las bajas velocidades y a las estelas que se originan cuando el flujo rodea las columnas, estas se convierten en barreras de separación del flujo.

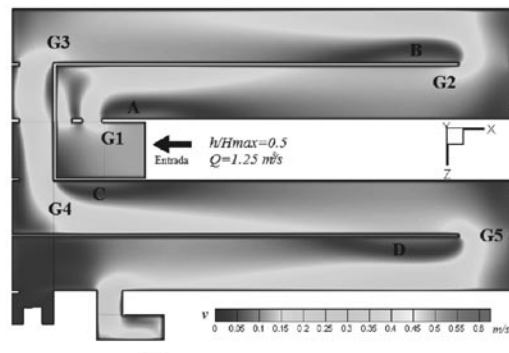
Es claro que, con base en estos resultados, la cisterna no presenta flujo pistón. La influencia de los patrones de flujo en la hidráulica es negativa, provocando chorros en corto circuito, zonas muertas, y zonas de recirculación. Una vez analizados estos resultados, se determinó que el TC no superaba el 20% del TDT, lo que correspondía a un valor de 0.2 para el factor de bafleado de acuerdo a metodología empleada por la EPA (USEPA, 1991) contenida también en el Reglamento del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS (Min. Desarrollo, 2000).

De acuerdo a la hidrodinámica obtenida, el máximo tiempo de contacto que se podía esperar eran 3.4 minutos en el caso más crítico (máximo caudal y lámina de agua mínima) lo que obligaba al empleo de altas dosis de cloro para contrarrestar los bajos tiempos de contacto proporcionados por la estructura. Situación esta que ya había sido identificada por el operador, quien consideró necesaria la reconfiguración interna de esta estructura.

La *Figura 7* presenta el resultado de la simulación para la reconfiguración planteada en la *Figura 2*. El objetivo de ésta, por medio de la inclusión de baffles internos, era mejorar la hidráulica interna del tanque de contacto, y con ello, aumentar el TC proporcionado por la estructura. De la figura se observa que efectivamente la inclusión de los baffles mejora la hidráulica y convierten la estructura en un TCC. El aumento del recorrido del agua, el cual involucra la disminución de chorros en corto circuito, permite que el TC se incremente comparado con el tiempo proporcionado por la cisterna; pero el patrón de flujo aun no se acerca al de un flujo pistón.

Se debe destacar que con esta reconfiguración no hay disi-

Figura 7. Hidrodinámica del TC en las condiciones de diseño

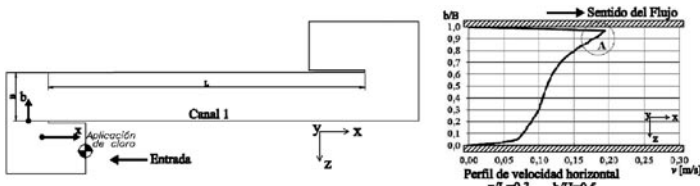


pación de la energía cinética en la entrada al tanque, lo que combinado con la existencia de una columna en el medio del primer giro de ciento ochenta grados con respecto a la entrada (G1), provoca una fuerte perturbación de las trazas de flujo, generando la primera zona de recirculación o estancamiento.

En total existen 4 zonas de recirculación (A, B, C, y D) notorias después de cada giro excepto el primer giro de noventa grados (G3). Estas generan un perfil de velocidad que se aleja del perfil uniforme esperado del flujo pistón. Como se observa en la *Figura 8*, recorrido el 30% de la longitud del canal inicial del TCC se presenta comportamiento triangular en el perfil de velocidades, lo cual corrobora que existe corto circuito en la zona de máxima velocidad (A). La uniformidad del flujo sólo se recupera al final de cada canal siempre y cuando este tenga la longitud suficiente para permitir el desarrollo del perfil de velocidad requerido.

Con base en los resultados, se estima que este TCC no supera un factor de bafleado de 0.5, proporcionando un TC máximo de 13.9 minutos al caudal y lámina de diseño, aún lejos del estándar deseado.

Figura 8. Perfil de velocidad recorrido el 30% de la longitud interna del canal



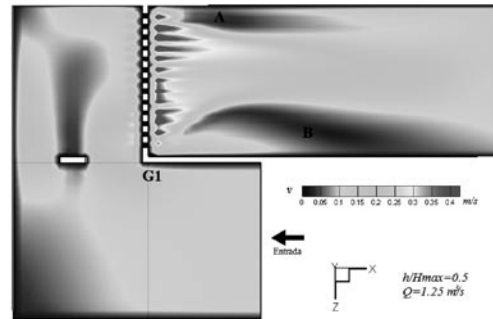
Así entonces y dada la necesidad de una reconfiguración inmediata, era necesario encontrar a bajo costo una modificación adicional que permitiera aumentar la eficiencia hidráulica. Los patrones de flujo indicaron ser influyentes en la eficiencia del TCC, y debían ser mejorados. Las zonas muertas o de recirculación debían ser reducidas en tamaño, y en lo posible, la energía cinética proveniente de la entrada debía ser disipada de manera significativa.

Es importante recordar que el operador contaba con el rediseño y adjudicación de la construcción del TCC, por lo que las restricciones presupuestales no permitían cambios mayores al proyecto inicial. Teniendo esto en cuenta, se decidió proporcionar modificaciones tendientes a reducir los fenómenos hidrodinámicos que perjudicaban la eficiencia del TCC, y en este caso, el primer aspecto a contrarrestar era la energía proveniente de la entrada de agua.

Para tal efecto, se planteó la inclusión de una cortina perforada con 78 orificios circulares de 6 pulgadas de diámetro distribuidos uniformemente en toda su área (13 columnas por 6 filas). La cortina se orientó en sentido transversal al flujo, con el objetivo de eliminar la energía proveniente de la entrada y al tiempo, aumentar la uniformidad del flujo aguas abajo de esta.

En el primer análisis, la cortina perforada se localizó exactamente en el giro G1. Como se observa en la *Figura 9*, la primera localización no presentaba mejoras en el patrón de flujo, lo cual se debe a la presencia inmediata de la cortina

Figura 9. Hidrodinámica del TC resultado de la inclusión de una cortina perforada en el giro G1



perforada y la perturbación ocasionada por el giro y la columna existente, las líneas de flujo no se logran uniformizar.

La consecuencia inmediata es la presencia de una zona de bajas velocidades (A) en la pared superior después de la cortina perforada, y una zona de recirculación en la pared inferior después de la cortina (B). Se concluyó que la cortina localizada después del primer giro de ciento ochenta grados (G1), no mejoraba la hidráulica y por lo tanto, no se podía considerar adecuado.

Se resolvió entonces desplazar la cortina hacia aguas abajo, antes de la generación del "ojo" de la zona de recirculación. Con base en la *Figura 10* se decide ubicar el inicio de la cortina perforada a dos metros del borde del giro G1.

Figura 10. Localización del centro del vórtice en el giro G1

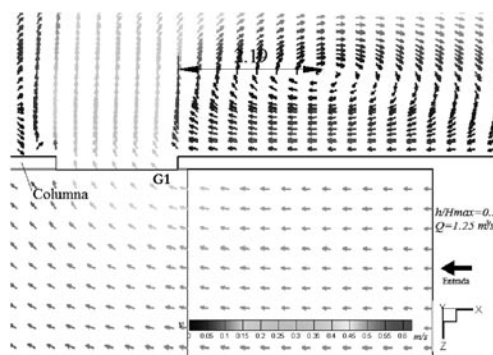
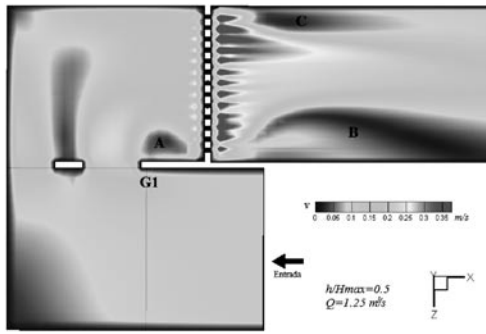




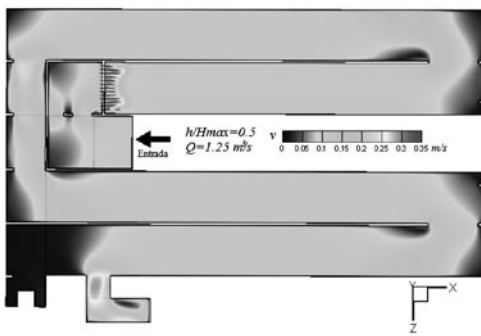
Figura 11. Hidrodinámica del TC resultado de la inclusión de una cortina perforada a dos metros del giro G1



La Figura 11 muestra como el desplazamiento de la cortina perforada a 2 metros del giro también resulto inefectivo. La distancia entre el giro y la pantalla permite que se genere una zona de recirculación (A) en la pared inferior antes de la cortina. Como consecuencia de esta perturbación, en la pared inferior después de la cortina perforada, se presenta una zona muerta con velocidades bajas (B). De igual forma, se puede identificar en la pared superior después de la cortina, una zona de bajas velocidades (C).

Como consecuencia de los resultados del desplazamiento de la cortina a dos metros del giro G1, se decidió localizar la cortina perforada a un metro del giro, entrando en el área de recirculación referida como A en la Figura 11. La Figura 12 presenta el resultado de la inclusión de la cortina perforada en la localización mencionada, lo cual permite mejorar notablemente la hidrodinámica en la estructura, y por lo tanto, incrementar la eficiencia del TCC.

Figura 12. Hidrodinámica del TC resultado de la inclusión de una cortina perforada a un metro del giro G1



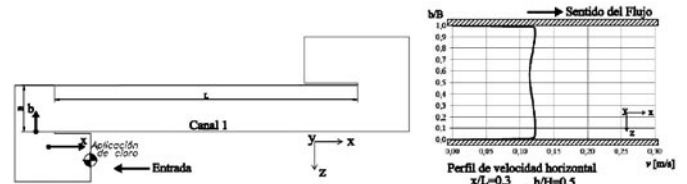
Para esta alternativa, al mismo tiempo que la energía cinética de entrada es disipada, la perturbación en el flujo originada por el primer giro es corregida por la cortina. Una vez el flujo se encuentra con la cortina perforada, es forzado a pasar por un arreglo de orificios uniformes que provocan un perfil de velocidad cuasi-uniforme (Figura 13).

Gracias al aumento de la uniformidad en el primer canal, se origina el comportamiento de flujo pistón en todo el tanque

de contacto. Esto se evidencia por un color casi uniforme en los canales del tanque de contacto (Figura 12) que representa un nivel de aproximadamente 0.12 m/s, corroborado por el perfil de velocidad de la Figura 13.

El comportamiento hidrodinámico de todo el volumen de estudio es modificado por la inclusión de una cortina perforada localizada correctamente. Las zonas de recirculación, comparadas con los resultados presentados en la Figura 7, se reducen a menos de un tercio de su tamaño, y el corto circuito evidenciado en la Figura 8 ya no se presenta en la Figura 13.

Figura 13. Perfil de velocidad recorrido el 30% de la longitud interna del canal



Se estima que el factor de bafleado para el TCC con la cortina perforada se encuentra alrededor de 0.7. Por un lado se puede esperar un TC máximo de 19.4 minutos al caudal y lámina de agua de diseño. Por otro, y ya que el TCC operará durante los 5 años posteriores a su construcción bombeando a la red de distribución 0.8 m³/s (64% del caudal de diseño), el TC esperado será de 30.3 minutos.

#### 4. Conclusiones

Conocer la influencia de los patrones de flujo en las estructuras de almacenamiento es fundamental. La presencia de zonas de recirculación y corto circuito pueden afectar negativamente la eficiencia de los procesos que se llevan a cabo en estas estructuras. La preservación de la calidad del agua dependerá, en el medio colombiano, de la nueva perspectiva con que se analicen los TA y TCC.

La DFC como metodología provee información relacionada con la formación y ubicación de zonas de recirculación y corto circuito. Basado en estos datos, es posible identificar las causas principales de la pérdida de desinfectante residual en tanques de almacenamiento y los bajos tiempos de detención en tanques de contacto.

Los modelos presentados se consideran adecuados para el análisis de los patrones de flujo y por tanto validos. Además de los diferentes estudios en el ámbito internacional que demuestran la aplicabilidad de la tecnología en TA y TCC, en este estudio se estableció un criterio de convergen-

cia estricto para los valores residuales asociados al método de solución de primer orden.

Para el tanque de almacenamiento estudiado, 7 zonas de recirculación provocaban pérdida significativa de desinfectante residual en los ciclos de llenado a caudales bajos. Igualmente fue identificado un efecto de contra flujo en el cono de entrada, lo que evidenció la pérdida de energía del chorro de entrada.

La cisterna, dada la configuración geométrica, no presentaba flujo pistón. Los patrones de flujo exhibieron grandes zonas de recirculación e importantes chorros de corto circuito. En este caso de estudio, el TC estimado fue 3.4 minutos.

La configuración geométrica del TCC presentó grandes mejoras en la hidráulica. Los patrones de flujo indicaron que, a diferencia de la cisterna, las grandes zonas de recirculación y corto circuito ya no se presentaban. En este caso, se encontraron zonas de recirculación y corto circuito después de cada giro de ciento ochenta grados. Ya que este caso de estudio no se podía considerar óptimo, se estimó un TC máximo de 13.9 minutos al caudal y lámina de agua de diseño.

La inclusión de una cortina perforada demostró ser un mecanismo efectivo para aumentar la eficiencia hidráulica del TCC. Redujo efectivamente la energía cinética de entrada y las zonas de recirculación. Con base en la uniformidad del flujo se estimó que el TC máximo esperado es de 19.4 minutos al caudal y lámina de agua de diseño, lo que representa un aumento del 40% comparado con el TC del diseño del TCC sin cortina.

En general, la DFC ha probado ser una metodología flexible, que a bajo costo y con inversiones mínimas de tiempo, provee datos fundamentales para la optimización de procesos como el almacenamiento y la desinfección. De igual forma, la mayor eficiencia obtenida de las modelaciones computacionales, permite reducir ostensiblemente los costos operacionales de estas estructuras.

### *Agradecimientos*

A la Pontificia Universidad Javeriana Cali, por haber financiado el proyecto de investigación titulado "Modelación hidráulica en tanques" del cual este trabajo es parte, y a EM-CALI EICE ESP, por facilitar la información requerida para las simulaciones.

## Referencias Bibliográficas

Anderson, J.D. Computational Fluid Dynamics: the basics with applications. 1st ed. Singapore: McGraw Hill, 1995.

Arboleda, J. Teoría y práctica de la purificación del agua. 3ra ed. Vol. 2. Colombia: McGraw Hill, 2000.

Crozes, G.F.; Hagstrom, J.P.; Clark, M.M.; Ducoste, J.; Burns, C. Improving Clearwell Design for Ct Compliance. Denver: American Water Works Association Research Foundation, 1998.

Grayman, W.M.; Deininger, R.A.; Green, A.; Boulos, P.F.; Bowcock, R.W.; Godwin, C.C.(1996). Water quality and mixing models for tanks and reservoirs. Journal of American Water Works Association. 1996, 88 (7): 70-83.

Grayman, W.M.; Rossman, L.A.; Arnold, C.; Deininger, R.A.; Smith, C.H.; Smith, J.F.; Schnipke, R. Water quality modeling of distribution system storage facilities. Denver: American Water Works Association Research Foundation, 2000.

Grayman, W.M.; Rossman, L.A.; Deininger, R.A.; Smith, C.D.; Arnold, C.N.; Smith, J.F. Mixing and aging of water in distribution system storage facilities. Journal of American Water Works Association. 2004, 96 (9): 77-87.

Hannoun, I.A.; Boulos, P.F. Optimizing distribution storage water quality: a hydrodynamic approach. Journal of Applied

Mathematical Modelling. 1997, 21: 495-502.

Hannoun, I.A.; Boulos, P.F.; List, E.J. Using hydraulic modelling to optimize contact time. Journal of American Water Works Association. 1998, 90 (8): 77-87.

Khan, L.; Wicklein, E.; Teixeira, E.C. Validation of a three-dimensional computational fluid dynamics model of a contact tank. Journal of hydraulic engineering ASCE. 2006, 132 (7): 741-746.

Mahmood, F.; Pimblett, J.G.; Grace, N.O.; Grayman, W.M. Evaluation of water mixing characteristics in distribution system storage tanks. Journal of American Water Works Association. 2005, 97 (3): 74-88.

Ministerio de Desarrollo Económico. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS. Colombia: Ministerio de Desarrollo Económico, 2000.

Mosquera Ospina, C. Modelación hidráulica computacional del tanque de contacto de cloro de la planta de tratamiento de agua potable Río Cauca. Director: Fabio H. Garzón Contreras, tesis de pregrado. Cali: Pontificia Universidad Javeriana Cali, Departamento de Ingeniería Civil, 2009.

Muriel Delgado, D. F. Empleo de modelos matemáticos basados en parámetros geométricos e hidráulicos para evaluar la

posibilidad del deterioro de la calidad del agua potable en tanques de almacenamiento o compensación de la ciudad de Cali. Director: Fabio H. Garzón Contreras, tesis de pregrado. Cali: Pontificia Universidad Javeriana Cali, Departamento de Ingeniería Civil, 2008.

Shiono, K.; Teixeira, E.C. Turbulent characteristics in a baffled contact tank. Journal of Hydraulic Research. 2000, 38 (4): 271-278.

Stamou, A.I. Improving the hydraulic efficiency of water process tanks using CFD models. Journal of Chemical Engineering and Processing. 2008, 47: 1179-1189.

United States Environmental Protection Agency. Guidance manual for compliance with the filtration and disinfection requirements for public water systems using surface water. Washington: United States Environmental Protection Agency, 1991.

Wang, H.; Falconer, R.A. Simulation disinfection processes in chlorine contact tanks using various turbulence models and high-order accurate difference schemes. Journal of Water Research. 1998, 32 (5): 1529-1543.

Wang, H.; Shao, X.; Falconer, R.A. Flow and transport simulation models for prediction of chlorine contact tank flow-through curves. Journal of Water Environment Research. 2003, 75 (5): 455-471.

# APLICACIÓN DE UN ALGORITMO GENÉTICO ASEXUAL AL DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE TUBERÍAS

## ASEXUAL GENETIC ALGORITHM APPLIED TO THE OPTIMAL DESIGN OF NETWORKS

### RAMIRO MARBELLO PÉREZ

Profesor Asociado, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente  
Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín  
rvmarbel@unalmed.edu.co

### JAIME PATIÑO MÁRQUEZ

Ingeniero Civil. Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín

### JUAN PABLO VILLA ROLDÁN

Ingeniero Civil. Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín

#### **Resumen:**

*El presente trabajo aporta la formulación, programación y aplicación de un algoritmo genético asexual al diseño óptimo de redes de tubería, basado en los principios fundamentales de la hidráulica de conductos a presión. El algoritmo opera con variables de tipo discreto, presenta rápida convergencia hacia la mejor solución y ha sido programado en Visual Basic.*

*Tres tipos de redes de tuberías pueden optimizarse con este algoritmo: redes interiores de suministro de agua en edificios, redes ramificadas abastecidas a través de un único nodo de entrada, y redes malladas puras.*

*Producto del presente trabajo, se ha desarrollado una aplicación para computador, que permite la búsqueda de la red óptima, basándose en el costo de la misma y en el cumplimiento de restricciones hidráulicas, tales como valores máximos y mínimos de presiones en los nudos, y de velocidades del flujo en los tramos.*

*El modelo se ha aplicado y comparado con la solución de dos problemas reportados por otros autores, encontrándose excelentes resultados, y evidenciando reducciones en el costo de las redes, del orden del 14%, con tiempos de cómputo relativamente bajos.*

#### **Abstract:**

*An asexual genetic algorithm to find the optimal design of pipe networks has been formulated and programmed in this paper. This algorithm is based on the fundamental principles of hydraulics of pressurized conduits, uses discreet variables, presents fast convergence toward the best solution, and has been programmed in the Visual Basic Programming Language.*

*Three particular kinds of pipe networks can be optimized with this algorithm: Water supply internal networks in buildings; branched networks supplied through one joint, and; looped networks.*

*Minimum and maximum values of pressure in joints, and flow velocities in the conduits are the main constraints of this model.*

*A computer application has been developed for this algorithm, which allows the finding of an optimal solution for water supply network problems, according to the cost and constraints. The successful use of this algorithm as an effective method of optimization demonstrated in the solution of two specific problems found in the reviewed specialized literature.*

**Keywords:** optimization, pipe networks, optimal design, genetic algorithm, hydraulics, water distribution systems.

**Palabras clave:** optimización, redes de tuberías, diseño óptimo, algoritmo genético, hidráulica, sistemas de distribución de agua.

## **1. Introducción.**

Al abordar un problema de diseño de una red de tuberías, de topología definida, se persigue la determinación de los diámetros de las tuberías que deberán conducir el fluido, desde los puntos de alimentación, hasta cada uno de los puntos de consumo, de tal forma que se garanticen los caudales demandados, y que las velocidades del flujo en los conductos, y las presiones en los nudos queden comprendidos en los respectivos rangos de valores permisibles.

Se habla de diseño óptimo de una red cuando, a los requerimientos de demanda y presión, se añade algún criterio de optimización establecido previamente. El criterio más común suele ser el de minimización del costo total de la red.

De manera intuitiva, tal costo podría reducirse seleccionando diámetros pequeños para todas las tuberías que componen la misma. Sin embargo, esto no siempre es factible, si se tiene en cuenta que es poco probable que, con tal configuración, todos los consumos sean satisfechos, y los límites máximo y mínimo, para las presiones en los nudos, y para las velocidades en los tramos, sean respetados. En este caso, el diseño óptimo consiste en determinar la combinación de diámetros más pequeños posibles, vigilando el cumplimiento de las restricciones hidráulicas. Meta ésta no tan fácil de alcanzar, sobretodo cuando la topología de la red considerada presenta una relativa complejidad.

Por otra parte, la aplicación de los principios fundamentales de la hidráulica (el principio de conservación de la masa y el principio de conservación de la energía), junto con el uso de expresiones de tipo teórico, empírico o semi-empírico, para la estimación de las pérdidas de carga, proporciona sistemas de ecuaciones altamente no lineales, para los que no se ha establecido un método que permita conocer de manera certera la mejor solución o la solución óptima.

Adicionalmente, debido a que los diámetros sólo pueden tomar valores de un listado de diámetros comercialmente disponibles, el sistema se convierte en un problema de variables discretas.

Actualmente, existen numerosos métodos de diseño óptimo de redes hidráulicas que procuran encontrar la solución más cercana posible a la solución óptima de una red, enfrentando cada uno, a su manera, las restricciones y los inconvenientes arriba mencionados.

El presente trabajo se basa en uno de estos métodos de diseño óptimo de redes: el algoritmo genético asexual, cuya formulación, programación y aplicación a dos tipos de redes, una ramificada, y otra mallada, y la comparación de los resultados hallados, con los respectivos resultados reportados por sendos autores, representan el aporte más relevante del mismo.

Este trabajo se estructura presentando breves síntesis de los métodos de optimización de redes hidráulicas reportados en la literatura técnica especializada, y del algoritmo genético propuesto, seguidas de la presentación de dos ejemplos de aplicación, la discusión de los resultados, y las conclusiones del mismo. Finalmente, se listan las referencias bibliográficas consultadas.

## **2. Métodos de optimización de redes hidráulicas.**

Se pueden diferenciar dos grupos básicos en el que se clasifican las técnicas que, a lo largo de los años, se han empleado para resolver el problema de diseño óptimo de redes hidráulicas. Ellos son: las técnicas tradicionales y las técnicas heurísticas.

Las técnicas tradicionales se caracterizan por involucrar, en alguna etapa del proceso de optimización, técnicas de programación matemática, como lo es, por ejemplo, la Programación Lineal. Las técnicas heurísticas, aunque parten de una formulación del problema común a todos los problemas de optimización (función objetivo y restricciones), se caracterizan por emplear métodos de solución no muy rigurosos, desde el punto de vista matemático, que caen dentro del campo de lo aleatorio, sin dejar de lado los principios hidráulicos fundamentales.

Dentro de los trabajos que emplean técnicas tradicionales, cabe resaltar el desarrollado en 1977 por Alperovits y Shamir. Ellos utilizaron un método conocido como Programación Lineal por Gradiente (LPG), dividiendo el problema en dos sub-problemas: el primero, lo obtenían mediante una conveniente concepción del mismo, en el que suponían que cada tramo podía estar conformado por varios sub-tramos, cuyas longitudes se convertían en las variables a determinar, volviéndolo un problema lineal que resolvían por Programación Lineal; en el segundo subproblema, con los resultados del primero, calculaban una nueva distribución de flujos, de tal forma que el gradiente del costo total de la red, con respecto a tales cambios, fuera negativo. De este modo, la red resultante disminuiría su valor en cada iteración.

Posteriormente, Gessler (1985) desarrolló un método basado en enumeración selectiva. Consistía en un proceso enumerativo (que estudia todas las soluciones posibles), al que agregaron algunas pautas para depurar el espacio de búsqueda, de tal modo que no fuera necesario evaluar todas las soluciones, y el proceso se volviera más eficiente.

Una década después, Loganathan et al (1995) utilizaron la descomposición del método LPG de Alperovits y Shamir, pero resolvieron el segundo sub-problema por medio de la técnica heurística conocida como Temple Simulado.

En el campo de los métodos heurísticos desarrollados, vale la pena mencionar los trabajos de Carrillo et al (1998). Su método determinaba dos límites para el costo,  $C$ , de la red: un  $C_{\min}$ , que resulta de asignar a todas las tuberías el menor diámetro de los disponibles, y un  $C_{\max}$ , que resulta de asignar a todas la tuberías el diámetro para el que todas las restricciones hidráulicas fueran cumplidas. Posteriormente, calculaban un costo  $C_p$  entre  $C_{\min}$  y  $C_{\max}$ , empleando la Serie de Fibonacci, y evaluaban hidráulicamente todas las combinaciones posibles de diámetros, con tal que la red tuviera un costo cercano a  $C_p$ . Si se cumplían las condiciones, podrían reducir  $C_p$ ; de lo contrario, deberían aumentarlo.

En 1996, Savic y Walters emplearon Algoritmos Genéticos, método basado en la Teoría de la Evolución de las Especies, de Darwin, tanto en la determinación óptima de los diámetros de las tuberías, como en el establecimiento de la topología de la red. Galeano (1999) empleó también esta técnica, pero únicamente para la selección de los diámetros.

Sanvicente y Frausto (2000) resolvieron el problema, empleando Temple Simulado, un algoritmo que se basa en una analogía con el proceso de fundición y el posterior enfriamiento de materiales.

### **3. El algoritmo genético.**

Creado a mediados del siglo XX por Jhon Holland, el Algoritmo Genético (A.G.) es un método heurístico de optimización que emplea la búsqueda estocástica (aleatoria) para determinar la mejor solución de un problema. Se basa en una analogía con la Teoría de la Evolución de las Especies, de Darwin, en la que se destacan los mecanismos de selección natural (supervivencia del más fuerte), cruce (reproducción para perpetuar la especie) y mutación (modificación de algunas características para adaptarse al medio).

Sus parámetros fundamentales son el número de individuos de la especie y el número de generaciones en las que

ésta evolucionará: el primero representa el número de soluciones que el algoritmo estudiará en cada iteración del mismo, y sobre las que aplicará los tres mecanismos evolutivos; el segundo es el número de iteraciones del que dispondrá el algoritmo para encontrar al mejor individuo o solución óptima. Cada individuo, a su vez, posee un código genético que consiste en un vector que guarda los valores de todos los parámetros (variables) que tiene asignados en cada momento del proceso; y una aptitud, que depende de dos parámetros: el valor de la función objetivo, evaluada en los valores almacenados en su código, y de la función de penalización que refleja el cumplimiento de las restricciones del problema.

El mecanismo de selección opera comparando las aptitudes de los individuos y eligiendo a los mejores para combinar sus códigos genéticos mediante el mecanismo de cruce, y crear la siguiente generación. Finalmente, sobre los nuevos individuos se opera el mecanismo de mutación, que consiste en cambiar aleatoriamente algunos de los valores almacenados en sus códigos, con base en una probabilidad de mutación dada. Este proceso se lleva a cabo tantas veces como generaciones se especifiquen, tras lo cual se espera haber encontrado el individuo óptimo, o, por lo menos, uno muy cercano a éste.

Una formulación más reciente del A.G. (González, 1997) elimina el mecanismo de cruce como elemento fundamental del mismo, dejando en la mutación toda la responsabilidad del mejoramiento de la especie; tal formulación se conoce con el nombre de Algoritmo Genético Asexual, y presenta una convergencia más rápida que la formulación tradicional.

La gran diversidad de problemas de optimización que pueden ser abordados por medio del A.G. lo convierten en un método altamente flexible. Problemas de diseño óptimo de estructuras, electrificación rural, explotación de yacimientos de gas, diseño de vías, asignación de recursos y diseño de redes hidráulicas, entre otros, son algunos de los problemas que han sido afrontados por este método.

Dentro de las ventajas que posee el A.G., una de las más relevantes es la de revisar varias posibles soluciones del problema de forma simultánea, lo que le permite explorar varias regiones del espacio de búsqueda al mismo tiempo. Asimismo, permite trabajar con variables discretas, cuyos valores puede tomar de una lista predefinida.

#### 4. Método propuesto: algoritmo genético asexual.

Se presenta un método para el diseño óptimo de redes hidráulicas que aplica la técnica del Algoritmo Genético Asexual, para lo cual deben conocerse la topología de la red, el material de las tuberías y su respectivo coeficiente de rugosidad, y la serie de diámetros comerciales disponibles. Además, se deben conocer los consumos localizados en los nudos o especificar una distribución inicial de caudales en los tramos que los considere. Finalmente, deben especificarse el número de individuos a considerar en la especie, y el número de generaciones a desarrollar. La primera generación se crea aleatoriamente.

##### 4.1. Código genético.

El código genético de cada individuo corresponde a un vector que posee tantas entradas como tramos tenga la red a optimizar. En cada una de sus entradas se almacena un número entero que está asociado a un diámetro de la lista de diámetros comerciales especificada. Dicho código es el que identifica a cada uno de los individuos de la especie, con base en el cual se calculan sus características, y sobre el cual operan los mecanismos evolutivos del algoritmo.

##### 4.2. Función objetivo.

El proceso de optimización busca determinar los diámetros para cada una de las tuberías de la red, de tal forma que se minimice el costo total de la misma. Cada diámetro disponible tiene asociado un costo particular  $C_i$ , cuyo valor está dado por unidad de longitud de tubería. De esta forma, el costo total (CT) de la red se calcula con la siguiente expresión:

$$CT = \sum_{i=1}^{NT} C_i L_i \quad (1)$$

donde  $C_i$  es el costo por unidad de longitud de la tubería con diámetro comercial  $D_i$ ,  $L_i$  es la longitud de la tubería  $i$ , y  $NT$  es el número de tuberías que conforman la red.

##### 4.3. Función de penalización.

La función de penalización, también conocida como factor de penalización, mide el cumplimiento de las restricciones hidráulicas impuestas al problema para que el sistema funcione adecuadamente. Así por ejemplo, las presiones desarrolladas en los nudos deben ser superiores a un valor dado de presión mínima que garantice que el líquido llegue a todos los puntos de consumo, e inferiores a una presión

máxima, para evitar la rotura de las tuberías. La velocidad de flujo es otro aspecto importante, y debe limitarse a un valor máximo que impida el desgaste excesivo del interior de las tuberías y que reduzca el efecto de fenómenos como el golpe de ariete o la cavitación, y debe superar un valor mínimo que garantice el arrastre de pequeñas partículas en suspensión. En atención a estas consideraciones, se calcula la función de penalización, empleando la siguiente expresión:

$$FP = \sum_{i=1}^{NN} \left| \frac{P_i - P_{m\acute{a}x}}{P_{m\acute{a}x}} \right| + \sum_{i=1}^{NN} \left| \frac{P_i - P_{m\acute{i}n}}{P_{m\acute{i}n}} \right| + \sum_{j=1}^{NT} \left| \frac{V_j - V_{m\acute{a}x}}{V_{m\acute{a}x}} \right| + \sum_{j=1}^{NT} \left| \frac{V_j - V_{m\acute{i}n}}{V_{m\acute{i}n}} \right| \quad (2)$$

donde  $P_i$  es la presión en el nudo  $i$ ,  $P_{m\acute{a}x}$  y  $P_{m\acute{i}n}$  son las presiones máxima y mínima admisibles en los nudos respectivamente,  $V_j$  es la velocidad de flujo en el tramo  $j$ ,  $V_{m\acute{a}x}$  y  $V_{m\acute{i}n}$  son las velocidades de flujo máxima y mínima tolerables en los tramos,  $NN$  es número total de nudos, y  $NT$  es el número total de tramos.

##### 4.4. Función de aptitud.

La aptitud de cada individuo depende de los valores que este tenga de la función objetivo y de la función de penalización, y debe ser más alta, cuanto más apto sea el individuo estudiado. En este sentido se define la aptitud con la siguiente expresión:

$$A_i = K - CT_i \cdot FP_i \quad (3)$$

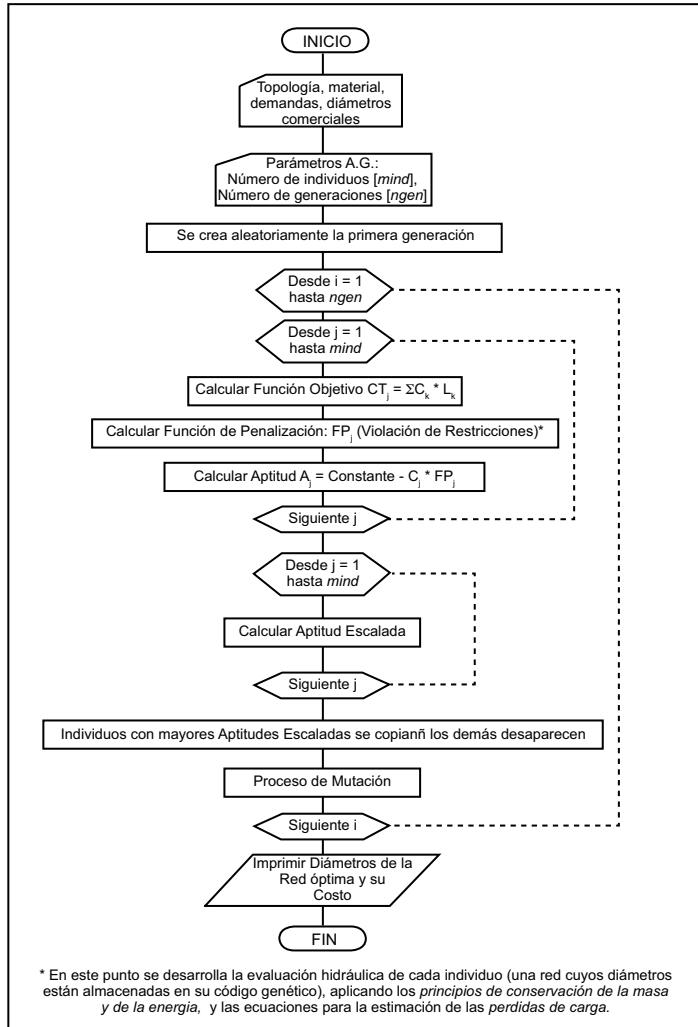
donde  $CT_i$  es el costo total o función objetivo del individuo  $i$ ,  $FP_i$  es la función de penalización del individuo  $i$ , y  $K$  es una constante, tan grande como para garantizar que la aptitud de ningún individuo sea negativa. Con esta definición de aptitud, se garantiza que, cuanto más bajos sean el costo y la penalización de un individuo, más apto será y tendrá mayor probabilidad de pasar a la siguiente generación.

##### 4.5. Selección y mutación.

Una vez calculadas las aptitudes, se inicia un proceso que tiene como fin favorecer aún más a los individuos más aptos, y, por consiguiente, acelerar la convergencia del método. Por medio de éste, se determinan unas aptitudes escaladas para cada individuo, cuyo valor depende de las aptitudes promedio y máxima obtenidas en cada generación evaluada. El mecanismo de selección compara tales aptitudes para elegir a los pocos individuos que pasarán a la siguiente instancia del proceso, copiándose tantas veces como sea necesario, hasta reemplazar a los individuos no aptos. En ese momento se inicia el proceso de mutación, el cual modifica

aleatoriamente el código genético de los nuevos individuos. Para ello, se definió una probabilidad de mutación del 1% (es decir, se muta un parámetro de cien), o de  $1/NP$ , donde  $NP$  es el número de parámetros de un individuo, si este tiene menos de cien parámetros.

#### 4.6. Diagrama de flujo del método del AG Asexual.



## 5. Ejemplos de aplicación.

### 5.1. Red ramificada.

#### 5.1.1. Descripción del problema.

En la figura 2 se presenta un ejemplo de una red abierta o ramificada, en el que se especifican los consumos requeridos en los nudos, y el nivel piezométrico del tanque de abastecimiento, así como las alturas piezométricas mínimas ( $H_{mín}$ ) necesarias en los nudos finales. Se aplicará el método propuesto para determinar los diámetros de las tuberías, de tal forma que se cumplan tales requerimientos y que, además, el costo total de la red sea mínimo.

Este problema fue resuelto por Pérez (1993), quién usó un método de optimización análogo al de Alperovits y Shamir, basado en Programación Lineal, con la limitante de que tomó las variables de forma continua y no discreta, hecho que se evidencia en los resultados obtenidos y que se reportan en la Tabla 1. Por igual motivo, Pérez usó una expresión matemática que relacionaba diámetros con costos ( $C[\$/m] = 50574 \times (D[m])^{1.54}$ ). La expresión usada para estimar las pérdidas de carga fue la ecuación de Darcy-Weisbach, en combinación con la ecuación de Colebrook-White, con una rugosidad absoluta de las tuberías  $\epsilon = 0.007$  mm.

Figura 2. Esquema de la red abierta a optimizar.

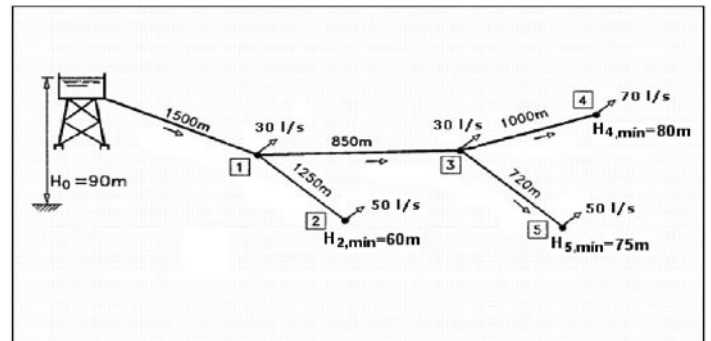


Tabla 1. Resultados obtenidos por Pérez, aplicando programación lineal.

Tramo (i - j)	0 - 1	1 - 2	1 - 3	3 - 4	3 - 5
Diámetro (mm)	451	173	394	307	199
<b>Costo Total Red = \$ 48'150.226</b>					

Para aplicar el método propuesto, se ha construido la Tabla 2, que presenta una lista de diez diámetros disponibles con su respectivo costo por unidad de longitud, calculado con la expresión de Pérez.

Tabla 2. Diámetros disponibles y su costo por unidad de longitud.

Diámetro [mm]	100	150	175	200	250	300	350	400	450	500
Costo [ $\times 103$ \$/m]	1.5	2.7	3.5	4.2	6.0	7.9	10.0	12.3	14.8	17.4

Se ejecutó el método propuesto en dos oportunidades, variando en cada una de ellas los parámetros propios del algoritmo genético, es decir, el número de individuos y el número de generaciones. Los diámetros obtenidos, así como el costo total de la red obtenida, se muestran en la Tabla 3. Adicionalmente, se reportan las velocidades de flujo, las pérdidas unitarias de carga, las pérdidas de carga y las alturas piezométricas en los nudos. La última columna corresponde a la altura mínima que debía conseguirse en los nudos finales.

**Tabla 3. Resultados del AG Asexual para la red de Pérez, obtenidos en dos ejecuciones diferentes.**

Ejecución 1. Número de individuos: 15 ; Número de Generaciones : 50						
Tramo i - j	Diámetro [mm]	Velocidad [m/s]	Ji - j [m/m]	hf i-j [m]	Hj [m c.a.]	Hj, mín [m c.a.]
0 - 1	450	1.45	0.0032	4.76	85.24	-
1 - 2	175	2.08	0.0189	23.57	61.67	60
1 - 3	350	1.56	0.0049	4.17	81.07	-
3 - 4	300	0.99	0.0026	2.59	78.48	80
3 - 5	200	1.59	0.0099	7.14	73.93	75
<b>Costo Total de la red = \$ 45'999.000</b>						

Ejecución 2. Número de individuos: 20 ; Número de Generaciones : 70						
Tramo i - j	Diámetro [mm]	Velocidad [m/s]	Ji - j [m/m]	hf i-j [m]	Hj [m c.a.]	Hj, mín [m c.a.]
0 - 1	450	1.45	0.0032	4.76	85.24	-
1 - 2	175	2.08	0.0189	23.57	61.67	60
1 - 3	400	1.19	0.0026	2.19	83.04	-
3 - 4	300	0.99	0.0026	2.59	78.48	80
3 - 5	200	1.59	0.0099	7.14	73.93	75
<b>Costo Total de la red = \$ 47'954.000</b>						

5.1.2. Análisis de resultados.

Para efectos de comparación de resultados, se presenta la Tabla 4, en la que se reportan los diámetros obtenidos por Pérez y por el algoritmo genético asexual, luego de realizar dos ejecuciones del mismo.

**Tabla 4. Comparación de resultados para una red abierta.**

Método de optimización	Diámetro [mm]					Costo total de la red
	Tramo 0-1	Tramo 1-2	Tramo 1-3	Tramo 3-4	Tramo 3-5	
Pérez	451	173	394	307	199	\$ 48'150.226
AG Ejecución 1	450	175	350	300	200	\$ 45'999.000
AG Ejecución 2	450	175	400	300	200	\$ 47'954.000

Como puede observarse, el costo total determinado por el método del algoritmo genético asexual es menor, en ambos casos, al calculado por el procedimiento de Pérez. Por otra parte, es una gran ventaja trabajar con la lista de valores discretos de los diámetros, pues se evita un posterior proceso de refinamiento de la solución, que podría afectar la optimización.

En cuanto a las dos soluciones obtenidas por el AG Asexual, se puede decir que, aunque en la primera de ellas se obtuvo un costo total de la red inferior al de la segunda, se incumplen, por algo más de 1.00 m c.a., las alturas piezométricas mínimas especificadas para los nudos 4 y 5. En ambos casos, se emplearon diferentes valores para el número de individuos y número de generaciones; sin embargo, no existen pautas que determinen el valor apropiado de tales parámetros en función de la magnitud o complejidad del problema.

Por tal razón, es recomendable correr el algoritmo, variando dichos valores entre cada ejecución; de esta forma, se puede tener mayor certeza de encontrar una solución muy aproximada a la óptima. Eventualmente, puede ser útil indicar los valores límites de las restricciones hidráulicas, con pequeñas holguras, de modo que no suceda lo ocurrido en la primera ejecución del ejemplo.

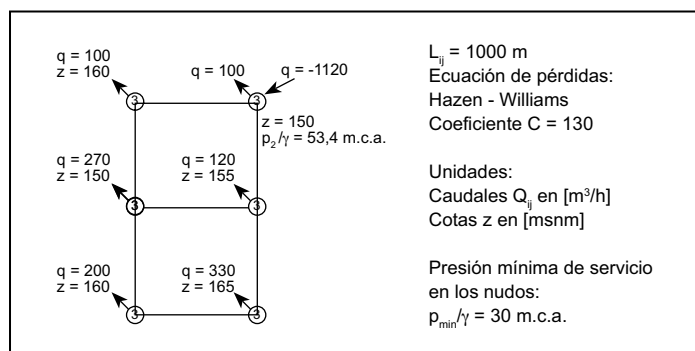
5.2. Red cerrada.

5.2.1. Descripción del problema.

La Figura 3 presenta un ejemplo de una red cerrada o mallada. Allí se indica, para cada nudo, su cota y la demanda requerida; se especifica también la presión de entrada para el nudo de abastecimiento, así como la presión mínima necesaria en todos los nudos del sistema. Nuevamente, se aplicará el método del algoritmo genético asexual para determinar los diámetros de las tuberías de tal forma que se cumplan tales requerimientos, y que, además, el costo total de la red sea mínimo. El método empleado para la determinación de los caudales en redes cerradas es el de balance de pérdidas de carga ó método de Cross.

Este problema fue resuelto por Alperovits y Shamir (1977), usando programación lineal por gradiente (LPG)<sup>1</sup> y los resultados se muestran en la Tabla 5. El sistema original contaba con un tramo adicional, el cual conectaba las mallas con un tanque de abastecimiento; este tramo fue remplazado, para la aplicación del método propuesto, por un caudal de entrada y una presión conocida en el nudo 2. La expresión usada para estimar las pérdidas de carga fue la ecuación de Hazen-Williams, con un coeficiente CHW = 130. La lista de diámetros disponibles empleada por los autores se muestra en la Tabla 6, en la cual, también, se muestran los respectivos costos unitarios.

**Figura 3. Esquema de la red cerrada a optimizar.**



1 La técnica LPG empleada por Alperovits y Shamir supone un tramo compuesto por varios segmentos de tubería de diferente diámetro. Por ello, para algunos tramos, se reportan dos diámetros con sus respectivas longitudes.



Tabla 5. Resultados obtenidos por Alperovits y Shamir aplicando LPG.

Tramo (i - j)	2 - 3	2 - 4	4 - 5	4 - 6	6 - 7	3 - 5	5 - 7
Diámetro (pulg)	10 - 8	18	6 - 8	16	12 - 10	6	6 - 4
Longitud (m)	3.6 - 996.4	1000	680.6 - 319.4	1000	785 - 215	1000	991 - 9
<b>Costo Total Red = \$ 339.285</b>							

Tabla 6. Lista de diámetros disponibles y costos unitarios.

Diámetro [pulg.]	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Costo [\$ /m]	8.0	11.0	16.0	23.0	32.0	50.0	60.0	90.0	130.0	170.0

En la *Tabla 7*, se presentan los resultados obtenidos para dos ejecuciones diferentes del AG Asexual. En ella se indican los diámetros asignados a cada tramo, así como las velocidades de flujo, pérdidas unitarias de carga y pérdidas totales de carga desarrolladas en ellos. Para los nudos, se reporta el valor de la presión de servicio.

Tabla 7. Resultados del AG Asexual, para la red de Alperovits y Shamir, en dos ejecuciones diferentes.

<b>Ejecución 1</b>						
Número de individuos: 15 ; Número de Generaciones : 100						
Tramo i - j	Diámetro [pulg]	Caudal [m³/h]	Velocidad [m/s]	J [m/m]	h <sub>f</sub> [m]	Presión de servicio nudo j [m c.a.]
2-3	10	-293.3	-1.61	-0.0086	-8.6	34.8
4-2	16	726.7	1.56	0.0047	4.7	53.4
5-4	8	155.7	1.34	0.0079	7.9	43.7
6-4	14	451.0	1.26	0.0037	3.7	43.7
7-6	8	121.0	1.04	0.0050	5.0	30.0
3-5	10	-193.3	-1.06	-0.0040	-4.0	40.8
5-7	10	-79.0	-0.43	-0.0008	-0.8	30.0
<b>Costo Total de la red = \$ 292.000</b>						
<b>Ejecución 2</b>						
Número de individuos: 20 ; Número de Generaciones : 500						
Tramo i - j	Diámetro [pulg]	Caudal [m³/h]	Velocidad [m/s]	J [m/m]	h <sub>f</sub> [m]	Presión de servicio nudo j [m c.a.]
2-3	14	-384.9	-1.08	-0.0032	-3.2	40.2
4-2	16	635.1	1.36	0.0042	4.2	53.4
5-4	6	70.0	1.07	0.0084	8.4	44.2
6-4	14	445.2	1.25	0.0042	4.2	44.2
7-6	8	115.2	0.99	0.0052	5.2	30.0
3-5	10	-284.9	-1.56	-0.0094	-9.4	40.8
5-7	10	-84.8	-0.47	-0.0010	-1.0	29.8
<b>Costo Total de la red = \$ 313.000</b>						

### 5.2.2. Análisis de resultados.

En la *Tabla 8*, se presenta un resumen de los diámetros y costos totales obtenidos por Alperovits y Shamir, y por el algoritmo genético asexual, luego de dos ejecuciones del mismo.

Tabla 8. Comparación de resultados para una red cerrada.

Método de optimización	Diámetro [mm]							Costo total de la red
	Tramo 2-3	Tramo 4-2	Tramo 5-4	Tramo 6-4	Tramo 7-6	Tramo 3-5	Tramo 5-7	
Alperovits-Shamir	10 y 8	18	6 y 8	16	12 y 10	6	6 y 4	\$ 339.285
AG ejecución 1	10	16	8	14	8	10	10	\$ 292.000
AG ejecución 2	14	16	6	14	8	10	10	\$ 313.000

Como puede observarse, aplicando el AG asexual, logró reducirse, en ambos casos, el costo total de la red determinado por los autores que aplicaron el proceso de LPG. Adicionalmente, el método propuesto asigna una única tubería a cada tramo, lo cual no se logra empleando la técnica de Alperovits y Shamir.

De las dos soluciones obtenidas por el AG, el resultado logrado en la primera ejecución supera ampliamente al de la segunda, aún cuando se empleó un número menor de individuos y de generaciones en ella. Esto se debe al carácter aleatorio de una parte del proceso de búsqueda del algoritmo genético. Además, es importante resaltar que, en la primera solución, todas las restricciones de presión de servicio mínima en los nudos fueron satisfechas, en tanto que, en la segunda, la presión del nudo 7 es inferior en 0.20 m.c.a., en relación con la mínima especificada.

## 6. Conclusiones.

El método propuesto para el diseño óptimo de redes hidráulicas permite determinar el conjunto de diámetros para los tramos, de tal forma que se logre el costo mínimo de la red, cumpliendo con todos los requerimientos de tipo hidráulico impuestos sobre el sistema.

Este método presenta la ventaja de asignar los diámetros de una lista predefinida de diámetros elegibles, evitando el empleo de técnicas de refinamiento requeridas por métodos que usan variables continuas en el proceso de diseño.

Otra ventaja que posee es la de evaluar simultáneamente varias posibles soluciones del sistema, en cada iteración, en lugar de considerar una sola, lo cual garantiza una búsqueda amplia en el espacio de soluciones.

Con las herramientas computacionales existentes en la actualidad, el problema de resolver sistemas grandes y complejos por medio del algoritmo genético ha desaparecido prácticamente. Este factor también se ha contrarrestado con

la adopción de la formulación asexual del mismo, que reduce el tiempo de cómputo requerido por la formulación tradicional, al acelerar ampliamente su convergencia.

El método aquí propuesto ha demostrado ser competente en la solución de sistemas de redes, tanto ramificadas, como cerradas puras, proporcionando mejores soluciones, en relación con las determinadas por otros métodos de diseño óptimo existentes, para dos casos específicos de diseño.

Aunque no existe una pauta que permita predecir el número de individuos y el número de generaciones apropiados, en función de la magnitud o de la complejidad del sistema estudiado, la aplicación del método, con el uso de computador, facilita la obtención de varias soluciones, variando dichos parámetros, de tal forma que pueda elegirse la mejor solución.

Lastimosamente, no fue posible hacer una comparación relativa a los tiempos computacionales empleados por los distintos métodos referidos y el propuesto en este trabajo, por falta de información de los primeros.

No obstante lo anterior, sí se pudieron comparar los números de especies y de generaciones empleados en el trabajo de Galeano (50 y 500, respectivamente), frente a 15 especies y 100 generaciones empleadas por el presente algoritmo, hecho que evidencia una relativa gran convergencia.

Tal como lo recomienda González (1997), el presente trabajo demostró que es preferible operar el algoritmo con un bajo número de individuos por generación, combinado con un número grande de generaciones.

## Referencias Bibliográficas

**Alperovits, E., Shamir, U., 1977.** Design of optimal water distribution systems. *Water Resources Research*, Vol. 13, No. 6, p. 885-900.

**Carrillo, S.J., et al, 1998.** Selección de las tuberías de una red de distribución de agua potable para que sea eficiente y económica. XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Oaxaca, México.

**Galeano, H., 1999.** Estudio e implementación de un prototipo de un sistema de optimización para el dimensionamiento de redes hidráulicas. Trabajo de grado de Maestría en Ingeniería de Sistemas. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Santa Fé de Bogotá. 194 p.

**Gessler, J, 1985.** Pipe network optimization by enumeration. *Computer Applications in Water Resources*, ASCE, New York, N.Y., p. 572-581.

**González, C., 1997.** Una nueva formulación del algoritmo genético, aplicado al diseño óptimo de estructuras. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Medellín.

**Holland, J. H., 1992.** Algoritmos genéticos. *Investigación y Ciencia*. Sept. 1992. Barcelona. España. p. 38 - 45.

**Keedwell, E.C., Khu, S.T., 2004.** A novel cellular automata approach to optimal water distribution network design. *Journal of Computing in Civil Engineering*.

**Keedwell, E.C., Khu, S.T., 2005.** A hybridgenetic algorithm for the design of water distribution networks. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Volume 18, Issue 4, June 2005, Pages 461-472.

**Loganathan, G.V., Greene, J.J., Ahn, T.J., 1995.** Design heuristic for globally minimum cost water-distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol. 121, No. 2, p. 182 - 192.

**Pérez, R, 1993.** Dimensionado óptimo de redes de distribución de agua ramificadas, considerando los elementos de regulación. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de

Valencia. Facultad de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Valencia. España. 587 p.

**Sanvicente, S. H., Frausto, J., 2000.** Determinación óptima de diámetros en redes de distribución de agua, con algoritmos de búsqueda estocástica. XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Córdoba, Argentina.

**Sanvicente, S. H., Frausto, J., 2003.** Optimización de diámetros de las tuberías de una red de distribución de aguas, mediante algoritmos de recocido simulado. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XVIII, No. 1, p. 105-118.

**Savic, D.A., Walters, G.A., 1996.** Stochastic optimization techniques in hydraulic engineering and management. *Seventh IAHR International Symposium*, Mackay, Australia.

1 La técnica LPG empleada por Alperovits y Shamir supone un tramo compuesto por varios segmentos de tubería de diferente diámetro. Por ello, para algunos tramos, se reportan dos diámetros con sus respectivas longitudes.

# LA IMPORTANCIA DE LA PREVENCIÓN DEL DETERIORO AMBIENTAL SIGNIFICATIVO EN LATINOAMERICA.

Sosa Echeverría Rodolfo, Bravo Álvarez Humberto, Sánchez Álvarez Pablo  
Sección de contaminación Ambiental, Centro de Ciencias de la Atmósfera,  
UNAM. Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, Coyoacán, D.F., México.  
C.P. 04510. Tel. 5616 0701, Fax: 5622 4052, e-mail: rodsosa@servidor.  
unam.mx.

## **Abstract**

*In the regions where air quality is not deteriorated (attainment areas), that is air quality standards are in compliment, it is necessary to work in order to conserve this quality. It is in this situation when prevention measures are necessities and it is possible the application of the Prevention of Significant Deterioration (PSD) program.*

*In Latinoamerican areas where the air quality is deteriorated, of course, it is necessary to develop programs in order to reduce the atmospheric pollutant levels. However, and it is the purpose of this article, areas with a satisfactory air quality must be protected applying the PSD. In this study the PSD is considered to be the implemented in the designated areas by the United Nations Educational Scientific and Cultural Organization (UNESCO) as "World Heritage List". Latin America has 35 sites classified as natural properties and 80 as cultural properties.*

## **Resumen**

*En las regiones en donde existe una calidad del aire satisfactoria, es decir que no se rebasa alguna de las normas de calidad del aire, es necesario trabajar para que precisamente se conserve esta calidad. Es en esta situación cuando las medidas preventivas son las necesarias, y es posible la aplicación del programa para la "Prevención del Deterioro Significativo" (PSD).*

*En áreas latinoamericanas donde la calidad del aire no sea satisfactoria, sin duda habrá que realizar programas para reducir los niveles de contaminantes atmosféricos. Sin embargo, y es el propósito de este artículo, se deben proteger aquellas áreas en donde todavía no se presente este problema tomando las medidas necesarias a través de la aplicación del PSD. Se plantea considerar para este fin las regiones que son consideradas por la UNESCO como Patrimonio de la Humanidad, teniéndose en Latinoamérica 35 regiones clasificadas como patrimonio natural y 80 como patrimonio cultural.*

**Keywords:** Prevention of Significant Deterioration, Air Quality, Environmental Impact

**Palabras clave:** Prevención del Deterioro Significativo, Calidad del Aire, Impacto Ambiental.

## **1.- Introducción**

La necesidad de proteger las regiones en donde la calidad del aire y de una manera más general la calidad ambiental no ha sido afectada, es factible la aplicación del programa para la Prevención del Deterioro Significativo (PSD). En las regiones en donde las concentraciones de contaminantes medidas sean inferiores a las normas vigentes de calidad del aire, se deben usar metodologías como el "PSD" para mantener la calidad del aire existente y evitar su deterioro.

El PSD tiene como meta permitir el crecimiento urbano-industrial manteniendo los niveles de calidad ambiental adecuados para proteger la salud de la población y su bienestar, así como para proteger los recursos naturales.

La prevención para evitar el deterioro ambiental significativo debe contemplar varios objetivos:

- 1.- Producir y usar las herramientas ingenieriles y metodologías que sean aplicables a los sectores económicos como agricultura, transporte, energía, construcción, social y otros.
- 2.- Desarrollar y transferir tecnologías apropiadas que pueden ser aplicadas por los distintos sectores económicos
- 3.- Verificar el desempeño de productos y tecnologías más limpias en los diferentes sectores: industriales, servicios, agropecuario y otros.
- 4.- Conducir investigación dirigida a los sectores económico, social, y educacional en relación a la prevención y control de la contaminación ambiental.
- 5.- Desarrollar interrelaciones entre el crecimiento económico y la calidad del ambiente y más específicamente de la calidad del aire.
- 6.- Apoyar un Federalismo claro y preciso entre los diferentes niveles de gobierno en lo relativo al medio ambiente, procurando que todos los niveles cuenten con los recursos suficientes para poder cumplir con sus obligaciones para proteger el medio ambiente.

Para poder identificar si las diferentes áreas en una región dada (Por ejemplo Latinoamérica) rebasan las normas de calidad del aire, es necesario establecer un sistema de indicadores ambientales en todo el territorio del mismo con el propósito de clasificar las diferentes áreas, por ejemplo:

1. Zonas que rebasen las normas de calidad del aire (una o más)
2. Zonas que no rebasen alguna norma de calidad del aire.

En el caso específico del PSD que tiene como principio un carácter preventivo solamente el punto 2 aplica. A su vez estas zonas en donde se cumpla con las normas de calidad del aire correspondientes se clasifican de acuerdo a diferentes niveles de concentración de contaminantes atmosféricos.

A partir de la clasificación de las diferentes áreas para la aplicación del PSD, las fuentes de contaminación atmosférica nuevas deberán cumplir distintos requerimientos en cuanto a sus emisiones dependiendo del sitio en donde se vayan a localizar.

Actualmente Latinoamérica cuenta con treinta y cinco áreas naturales consideradas por la UNESCO como patrimonio de la humanidad. En dichas áreas se presupone que su calidad del aire es adecuada. Además se tiene el honor de contar con ochenta sitios designados por la UNESCO como Patrimonio Cultural de la Humanidad. Es importante considerar el concepto de PSD en los sitios designados por la UNESCO debido no solamente al impacto sobre los ecosistemas, sino también el deterioro potencial que la contaminación atmosférica pudiera causar en los sitios culturales (monumentos) (Sosa y otros, 2007).

## **2.- Metodología para la aplicación del PSD a contaminación atmosférica.**

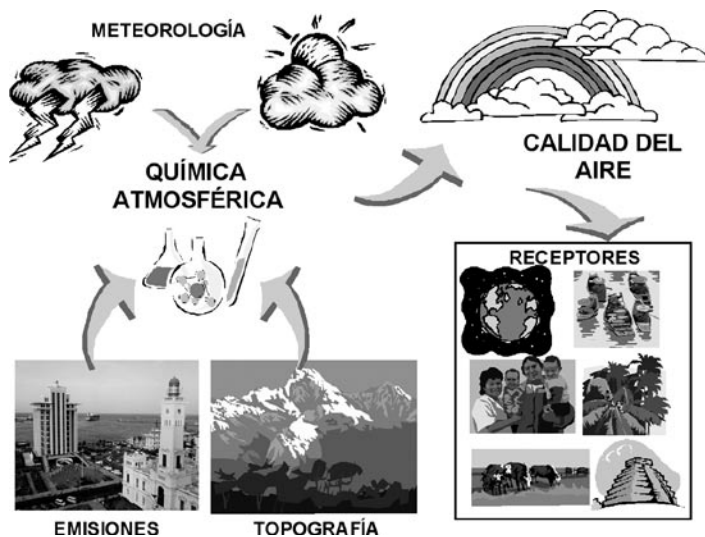
La solución a problemas de contaminación atmosférica requiere de atenderla de una manera integral, por lo cual deberá considerarse la parte de evaluación o diagnóstico, tanto en lo que respecta a la calidad del aire como a las emisiones a la atmósfera. Una vez que se ha realizado una evaluación adecuada viene la etapa de aplicar medidas correctivas, que van desde minimizar la generación de los contaminantes atmosféricos de interés, y en caso necesario el uso de equipos de control. Se presentan en esta sección conceptos de contaminación atmosférica, estimación de emisiones y de concentraciones de contaminantes atmosféricos y por último, medidas de control con el propósito de integrarlos al PSD.

Para una correcta evaluación de la calidad del aire y de las emisiones a la atmósfera se requiere emplear métodos certificados y de esta manera los resultados podrán ser comparables y de utilidad para cumplir con los objetivos del monitoreo. Los objetivos principales del monitoreo de la calidad del aire son vigilar el cumplimiento de las normas de calidad del aire, evaluar los resultados de estrategias de control y activar planes de contingencias; mientras que para el monitoreo en fuente estos objetivos son: evaluar el cumpli-

miento de las normas de emisión, apoyar la selección y evaluar la eficiencia de los equipos de control, entre otros.

La interrelación de las fuentes de contaminación atmosférica con la meteorología y la química atmosférica dando como resultado una determinada calidad del aire y proporcionando efectos negativos sobre diferentes receptores, se presenta en la *figura 1*. Los niveles de concentración que servirán de

Figura 1.- Factores que influyen en la calidad del aire



referencia serán las normas de calidad del aire y los niveles establecidos por el PSD.

Para cumplir con el PSD se requiere llevar a cabo una evaluación del impacto en la calidad del aire asociado con la construcción y operación de una fuente nueva o modificación de alguna ya existente. El propósito principal de la evaluación de la calidad del aire es demostrar que las nuevas emisiones generadas en conjunto con otras emisiones ya existentes en el sitio de interés, no causaran o contribuirán a la violación de cualquier norma aplicable o los límites establecidos en el programa PSD. También pueden ser evaluados contaminantes atmosféricos no considerados criterio.

Cada evaluación de la calidad del aire será única, debido a la variedad de fuentes de contaminación, así como a las distintas condiciones meteorológicas y topográficas que pueden estar involucradas.

Generalmente esta evaluación considerará:

- 1.- Una evaluación de la calidad del aire existente, la cual podrá involucrar monitoreo ambiental y la aplicación de modelos de dispersión.
- 2.- Predicciones de las concentraciones de contaminantes

atmosféricos que resulten por la operación de nuevos proyectos o por la ampliación de los ya existentes, mediante el empleo de modelos de dispersión.

El análisis de la calidad del aire está diseñado para proteger o cumplir con las Normas Nacionales de Calidad del Aire (NNCA) e incrementos de concentración preestablecidos en el PSD. Las NNCA serán las concentraciones máximas (techo), medidas en termino de la concentración total de un contaminante en la atmósfera. Para una fuente nueva o modificación de la misma, el cumplimiento con cualquier NNCA se basa en la calidad del aire total estimada, la cual es la suma del resultado de la estimación de las fuentes de contaminación atmosférica existentes (impacto estimado aplicando modelos de dispersión a las distintas fuentes más la concentración de fondo) y el impacto estimado mediante modelos de dispersión de la nueva fuente propuesta.

Un incremento PSD es el máximo aumento de la concentración que es permitido que ocurra sobre un valor de concentración considerado como base para un contaminante dado. La concentración base es definida para cada contaminante y en general, es la concentración ambiental existente en el momento en que el primer permiso PSD afectando el área de interés fue solicitado. El deterioro significativo ocurrirá cuando las nuevas emisiones ocasionen que se exceda el incremento PSD aplicable.

#### Clasificación de áreas e incrementos del PSD

Los requerimientos del PSD proveen un sistema de clasificación de áreas, el cual proporciona a los Estados una oportunidad de identificar metas locales para el uso de suelo. Existen tres clasificaciones de área. Cada clasificación difiere en términos de la cantidad de crecimiento que será permitida antes que un deterioro significativo en la calidad del aire pudiera ocurrir. Las áreas clase I tienen los incrementos menores y por lo tanto permiten solamente un pequeño grado de deterioro de la calidad del aire. Las áreas clase II pueden permitir un crecimiento industrial debidamente controlado. Las áreas clase III tienen los mayores incrementos y por lo tanto permiten una mayor cantidad de desarrollo que las áreas correspondientes a las clases I y II.

El Gobierno de los Estados Unidos ha establecido que las áreas protegidas y parques nacionales queden identificadas como clase I. Estas áreas no podrán ser designadas posteriormente con otra clasificación. Los incrementos del PSD para los tres tipos de áreas se presentan en la *tabla 1* (USEPA, 1990).

Tabla 1. Incrementos del PSD ((g/m3)

	Clase I	Clase II	Clase III
Bióxido de azufre			
SO <sub>2</sub> Anual	2	20	40
SO <sub>2</sub> 24 horas	5	91	182
SO <sub>2</sub> 3 horas	25	512	700
Partículas			
PST Anual	5	19	37
PST 24 horas	10	37	75
Bióxido de Nitrógeno			
NO <sub>2</sub> Anual	2.5	25	50

### Determinación de emisiones a la atmósfera

Las emisiones a la atmósfera pueden ser “medidas” o “estimadas”.

I. Medidas mediante un monitoreo y II. Estimadas mediante su cálculo

FUENTES NUEVAS	FUENTES EXISTENTES
Estudios de Impacto Ambiental.	Auditorías Ambientales Monitoreos en Fuente
Estimación	Solamente el monitoreo es válido para fines legales,

Es necesaria la elaboración de un inventario de emisiones en toda región que se pretenda estudiar. Un “inventario de emisiones” nos proporciona un listado de la cantidad de contaminantes que son enviados a la atmósfera durante un periodo de tiempo determinado. Los límites del área a considerar para conocer las fuentes responsables de las emisiones de contaminantes deben ser establecidos (Sosa y otros, 2005).

Los inventarios de emisiones son muy útiles tanto para las agencias de control como para las de planeación urbano-industrial, para que de esta manera lleven a cabo las estrategias de control necesarias para obtener la calidad del aire deseada. Con el apoyo de modelos matemáticos apropiados y el inventario de fuentes, es posible determinar el grado de control necesario para cumplir con las normas de calidad del aire y/o los límites establecidos por el PSD.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) tiene tabulados los factores de emisión para diferentes

tipos de fuentes encontradas comúnmente, tanto fijas como móviles. Esta compilación es denominada AP-42 (USEPA, 2005), y es información fundamental para la estimación de emisiones a la atmósfera

### Requerimientos de información ambiental por el PSD.

Con relación a información de calidad del aire, las regulaciones del PSD requieren a la fuente en particular llevar a cabo un análisis o evaluación de la calidad del aire, la cual podrá incluir información de monitoreo, y bajo algunas instancias se requerirá también el monitoreo posterior a la construcción. Lo anterior para cualquier contaminante a emitirse en cantidades significativas por cualquier fuente nueva o modificación de las existentes. En la ausencia de información de calidad del aire representativa en el área de interés, esta deberá ser generada como requerimiento del PSD. Además, la necesidad de información meteorológica para los modelos de dispersión requiere que esta sea generada, lo cual implicará la operación de una red de estaciones meteorológicas. El periodo considerado como representativo para los datos que se generen por el monitoreo será de un año. Cuando se vayan a utilizar datos de calidad del aire ya existentes, los responsables de la fuente a instalar y la autoridad ambiental convendrán sobre la representatividad de la información conforme a los siguientes criterios:

- 1).- Localización de las estaciones de monitoreo.
- 2).- Calidad de los datos.
- 3).- Vigencia de los datos.

En caso de que sea requerido el monitoreo de la calidad del aire a los responsables de la fuente de contaminación atmosférica, estos previamente al inicio de los monitoreos deberán presentar a la autoridad ambiental competente su plan de monitoreo para su autorización. De esta manera no se perderá tiempo en caso de incumplimientos y cualquier observación podrá ser detectada por la autoridad anticipadamente.

El PSD recomienda el monitoreo posterior a la construcción de la planta cuando:

- 1).- Las NNCA estén amenazadas, y
- 2).- Exista incertidumbre en la base de datos para el modelamiento.

### *Aplicación de modelos de dispersión.*

Los modelos de dispersión constituyen una herramienta muy útil para estimar la calidad del aire ocasionada por una o varias fuentes de contaminación atmosférica. Dichos modelos consideran como datos de entrada información meteorológica, datos de la fuente y características del terreno, obteniéndose como resultado concentraciones de los contaminantes de interés que podrán compararse con sus respectivas normas de calidad del aire (Bravo y otros 1992a). Existen aplicaciones específicas para el caso de industrias en donde se consideran modelos de origen gaussiano principalmente (Bravo y otros 1990). Es necesario poner atención en que mientras más complejo es el problema, también más complejo será el modelo y por lo tanto se requerirá mayor y mejor información. El aplicar modelos de dispersión sin contar con la información adecuada nos llevará a cometer grandes errores, más aún si el resultado de la simulación servirá de apoyo en la toma de decisiones sobre un proyecto.

Los modelos de dispersión estimaran las concentraciones resultantes que consideraran la fuente propuesta en combinación con las otras fuentes existentes. La concentración total estimada será usada para evaluar el cumplimiento con las NNCA o los correspondientes incrementos al PSD.

### *Monitoreo de la calidad del aire*

Los efectos de la contaminación atmosférica pueden detectarse en la salud humana, en la vegetación, en animales o en materiales. Sin embargo, con base a estas observaciones no se puede determinar en todos los casos de qué contaminantes se trata. Por lo tanto, es de suma importancia contar con un equipo analítico cualitativo y cuantitativo que no sólo especifique cuál es el contaminante, sino también su concentración en el aire ambiente (Bravo y otros 1992b).

Los contaminantes atmosféricos criterio considerados son: bióxido de azufre, bióxido de nitrógeno, monóxido de carbono, partículas suspendidas totales, PM10 (partículas menores a 10 micrómetros), y ozono (CFR, 1991).

Las mediciones de la calidad del aire involucran: monitoreo de calidad del aire, monitoreo de parámetros meteorológicos, sistemas de calibración y adquisición de datos.

La selección del sitio de monitoreo depende de los objetivos que éste vaya a cumplir. La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, EPA, reconoce como los principales

objetivos del monitoreo los siguientes (USEPA, 1976; USEPA, 1991):

- Juzgar el cumplimiento de las normas de calidad del aire, y/o el progreso para lograrlo.
- Activar procedimientos de control de emergencias para prevenir episodios de contaminación atmosférica.
- Observar tendencias de contaminación a través de la región, incluyendo las áreas no urbanas. Esta información sobre áreas no urbanas es necesaria para evaluar cómo la calidad del aire en las porciones limpias de una región es deteriorada significativamente, y para determinar niveles de concentración de fondo. Es este objetivo el que mejor corresponde al PSD.
- Generar una base de datos para aplicación en la evaluación de efectos; planeación urbana, de uso del suelo y transportes: así como desarrollo y validación de modelos de dispersión.

### *Etapas básicas en el análisis de la calidad del aire.*

El análisis de la calidad del aire consiste de dos distintas fases:

- 1).- Análisis preliminar y
- 2).- Análisis completo de impacto.

El análisis preliminar modela solamente el incremento significativo en las emisiones potenciales de un contaminante por una fuente nueva o modificación de alguna ya existente. Los resultados de este análisis preliminar determinaran si se requiere llevar a cabo un análisis completo de impacto, incluyendo la estimación de concentraciones de fondo que resultan de las fuentes existentes y el crecimiento asociado con la fuente propuesta.

El análisis preliminar: determina si se requiere además un análisis de calidad del aire para un contaminante en particular, puede permitir quedar exento de los requerimientos de monitoreo ambiental, y es usado para definir el área de impacto dentro de la cual un análisis completo de impacto deberá de llevarse a cabo.

Un análisis completo de impacto es requerido para cualquier contaminante para el cual las concentraciones estimadas para la fuente propuesta excedan los niveles de impacto significativo prescritos. Este tipo de análisis amplía el análisis preliminar en que considera emisiones de: la fuente pro-

puesta; fuentes existentes; así como crecimiento residencial, comercial e industrial que acompaña la nueva actividad.

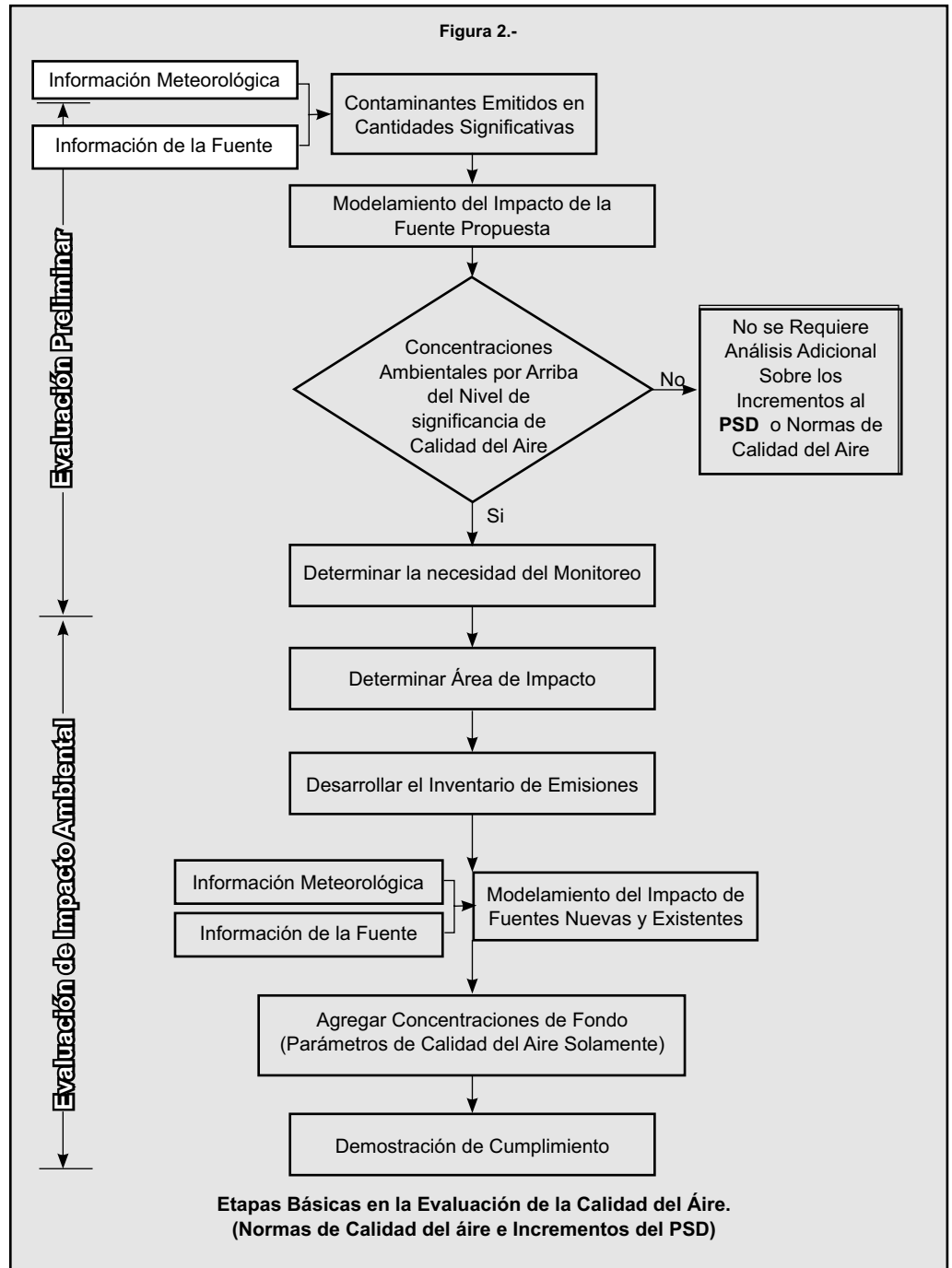
La figura 2 presenta las etapas básicas para una evaluación de la calidad del aire conforme al PSD para demostrar cumplimiento con alguna NNCA e incrementos del PSD (USEPA, 1990). Lo anterior deberá considerar la normatividad ambiental vigente y las condiciones específicas de la región en donde se vaya aplicar. Es importante aprender de la experiencia de los distintos países latinoamericanos, así como del intercambio de información ambiental en la región.

### 3.- Prevención y control de contaminantes atmosféricos.

El control de contaminantes atmosféricos consiste en la reducción de las emisiones, recomendándose cuando es aplicable la prevención que es evitar que los contaminantes se generen. Como filosofía de control en Ingeniería Ambiental se contempla el control en la fuente, esto es evitar desde el mismo proceso u operación que los contaminantes se generen o reducir sus emisiones.

La evaluación, aunque fundamental, por si misma no resuelve el problema, por lo que habrá que pasar a una etapa posterior al diagnóstico que es la toma de decisiones para establecer y aplicar las estrategias que prevengan, minimicen o controlen las emisiones a la atmósfera.

Los aspectos económicos, sociales y políticos, así como su interrelación con la contaminación atmosférica, de acuerdo al profesor B. Linsky de la Universidad de West Virginia, se denomina: "Ciclo Técnico Social de la Contaminación Atmosférica y su Control" (Bravo, 1971), tal y como se presenta en la figura 3.



Los factores que influyen en la selección del equipo de control son:

• Técnico	Económico
- Características del equipo	- \$ Costos de capital
- Características del contaminante	- \$ Costos de operación
- Características de la corriente gaseosa.	- \$ Tiempo de vida del equipo

Las normas de emisión serán diferentes dependiendo de la clasificación de la zona de acuerdo al PSD, ya que se tendrá



Figura 3. Ciclo Técnico Social e la Contaminación Atmosférica y su Control (Tomado del profesor B. Linsky, University of West Virginia, USA).



que cumplir con los incrementos establecidos por este programa.

#### 4.-Regiones en Latinoamérica consideradas como patrimonio de la humanidad

Aunque el programa PSD se puede aplicar en cualquier región en donde los niveles de calidad del aire no rebasen las normas correspondientes, se recomienda tomar en consideración aquellos sitios que la UNESCO ya tiene definidos como patrimonio natural o cultural de la humanidad.

Latinoamérica cuenta actualmente con treinta y cinco áreas naturales consideradas por la UNESCO como patrimonio de la humanidad, y con ochenta sitios designados como Patrimonio Cultural de la Humanidad (UNESCO-GOOGLE, 2006), de los cuales se enlistan a continuación a manera de ejemplo, los encontrados en Colombia y en México:

##### Colombia

- \* Puerto, Fortalezas y Grupo de Monumentos, Cartagena (1984)
- \* Parque Nacional Los Katíos (1994)
- \* Centro Histórico de Santa Cruz de Mompox (1995)
- \* Parque Arqueológico Nacional de Tierradentro (1995)
- \* Parque Arqueológico de San Agustín (1995)
- \* Santuario de Flora y Fauna de Malpelo (2006)
- \* Parque Nacional Morne Trois Pitons (1997)
- \* Parque Histórico Nacional - Citadel, Sans Souci, Ramiers (1982)

##### México

- \* Centro Histórico de la Ciudad de México y Xochimilco (1987)

- \* Centro Histórico de Oaxaca y Zona Arqueológica de Monte Albán (1987)
- \* Centro Histórico de Puebla (1987)
- \* Ciudad Pre-Hispánica y Parque Nacional de Palenque (1987)
- \* Ciudad Pre-Hispánica de Teotihuacan (1987)
- \* Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an (1987)
- \* Centro Histórico de la Ciudad de Guanajuato y Minas Adyacentes (1988)
- \* Ciudad Pre-Hispánica de Chichen-Itza (1988)
- \* Centro Histórico de Morelia (1991)
- \* Ciudad Pre-Hispánica de El Tajin (1992)
- \* Centro Histórico de Zacatecas (1993)
- \* Pinturas Rupestres de la Sierra de San Francisco (1993)
- \* Santuario de Ballenas de El Vizcaino (1993)
- \* Primeros Monasterios de principios del Siglo XVI en las faldas del Popocatepetl (1994)
- \* Monumentos Históricos de la Zona de Querétaro (1996)
- \* Ciudad Pre-Hispánica de Uxmal (1996)
- \* Hospicio Cabañas, Guadalajara (1997)
- \* Zona Arqueológica de Paquimé, Casas Grandes (1998)
- \* Monumentos Históricos de la Zona de Tlacotalpan (1998)
- \* Monumentos Arqueológicos de la Zona de Xochicalco (1999)
- \* Ciudad Histórica y Fortificada de Campeche (1999)
- \* Ciudad Maya Antigua de Calakmul, Campeche (2002)
- \* Misiones Franciscanas en la Sierra Gorda de Querétaro (2003)
- \* Casa y Estudio de Luis Barragán (2004)
- \* Islas y Áreas Protegidas de el Golfo de California (2005)
- \* Paisaje de Agave y la Antigua Planta Industrial de Tequila (2006)

#### 5. Conclusiones y recomendaciones

El considerar y aplicar el PSD constituye una excelente oportunidad de colaboración entre los distintos países latinoamericanos, debiéndose establecer programas a corto, mediano y largo plazo.

Es necesario entender que en la toma de decisiones para atender y dar solución a un problema ambiental y específicamente de contaminación atmosférica, los aspectos técnicos y de protección a la salud de la población van ligados a los aspectos económicos, sociales y políticos. Lo anterior tendrá que ser tomado en cuenta en la aplicación de incrementos en el PSD.

Identificar las áreas en donde se cumplen y en donde no se cumplen las normas de calidad del aire en Latinoamérica.

Llevar a cabo los inventarios de emisiones, así como la evaluación del impacto en la calidad del aire mediante la aplicación de modelos de dispersión en las distintas regiones de Latinoamérica en donde sea necesario.

Desarrollar un sistema de indicadores ambientales para Latinoamérica.

Sin duda en los países latinoamericanos es necesario atacar el problema de la contaminación atmosférica en varias regiones que rebasan ampliamente las normas de calidad del aire, y más aún existen regiones en donde ni siquiera

se lleva a cabo el monitoreo de la calidad del aire. Sin embargo, es necesario empezar a tomar en cuenta el concepto de prevención, ya que de esta manera podremos conservar áreas con una calidad del aire adecuada y en un contexto más amplio e integral, áreas con una calidad ambiental adecuada.

Adecuar la meta general del programa para la Prevención de Deterioro Significativo, de un enfoque de calidad del aire hacia un enfoque integral que considere al ambiente en general. De esta manera se le denominará a este concepto "Prevención de Deterioro Ambiental Significativo" y tendrá como meta permitir el crecimiento urbano-industrial planeado adecuadamente, manteniendo los niveles de calidad ambiental para proteger la salud de la población y su bienestar, así como para proteger las áreas naturales.

## Referencias Bibliográficas

BRAVO A. Humberto. "El ciclo técnico social de la contaminación atmosférica y su control". XI Convención del Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos. México, D.F., Octubre de 1971.

BRAVO A. Humberto, SOSA E. Rodolfo, TORRES J. Ricardo. Pronóstico del impacto en la Calidad del Aire por Procesos Industriales (Complejo Industrial Pajaritos, Ver.). Revista Ingeniería Ambiental. 1990. Año 3, No. 7. pp 8-18.

BRAVO A. Humberto, SOSA E. Rodolfo, TORRES J. Ricardo. "La calidad del aire en la conurbación industrial de Coatzacoalcos-Minatitlán". La contaminación atmosférica en México, sus causas y efectos en la salud. Comisión Nacional de Derechos Humanos 1992a: 117-145.

BRAVO A. Humberto, SOSA E. Rodolfo, TORRES J. Ricardo. "Los criterios y metodologías para medir la calidad del aire". La

contaminación atmosférica en México, sus causas y efectos en la salud. Comisión Nacional de Derechos Humanos. 1992b: 15-41.

CFR. Code of Federal Regulations. Office of the Federal Register National Archives and Records. Administration. No. 40. Part. 58. "Ambient Air Quality Surveillance". July 1, 1991.

SOSA E. Rodolfo, BRAVO A. Humberto, SÁNCHEZ A. Pablo. "Evaluación Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica". Memorias del 48 Congreso de ACODAL (Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental), Saneamiento y Ambiente: Políticas, Educación, Tecnología y Negocios, Santa Marta, Colombia. Octubre 2005.

SOSA E. Rodolfo, BRAVO A. Humberto, SÁNCHEZ A. Pablo. "Prevention of Significant Deterioration, a proposal for its application in Latin American countries".

100th Annual Conference & Exhibition of the Air & Waste Management Association. Pittsburgh, Pensilvania. June 2007.

Página web: UNESCO-GOOGLE, (consulta 25-11-2006).

USEPA. "Procedures for evaluating operations of ambient air monitoring networks". U.S. Environmental Protection Agency. EPA-600/4-76-043. August 1976.

USEPA.. New Source Review Workshop Manual. Prevention of Significant Deterioration and Nonattainment Area Permitting. 1990.

USEPA. "Guidelines: Air quality surveillance networks". U.S. Environmental Protection Agency. AP-98. May 1991.

USEPA. "Compilation of Air Pollution Emission Factors". U.S. Environmental Protection Agency. AP-42. Version 12, 2005.

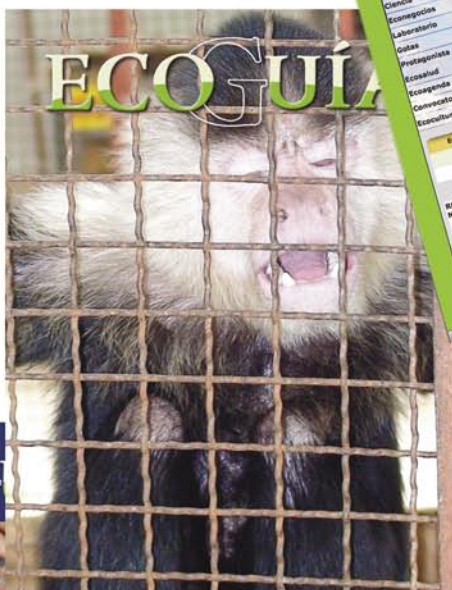
Revista

# ECO GUÍA

Periodismo al natural



Suscripciones:  
lectores@revistaecoguia.com  
PBX: 342 03 92



**Somos una especie en vía de Expansión**



Visítenos  
también en la web  
[www.revistaecoguia.com](http://www.revistaecoguia.com)