



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**Capacidad de retención de hidrocarburos  
aromáticos policíclicos y metales pesados en una  
azotea verde extensiva**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**BIÓLOGA**

**P R E S E N T A:**

**ERÉNDIRA ALEJANDRA ARELLANO LEYVA**

**DIRECTORA DE TESIS:  
DRA. MARGARITA COLLAZO ORTEGA**



México, D. F.

2012

**ESTE TRABAJO SE REALIZÓ EN EL TALLER “BIOLOGÍA DE LA REPRODUCCIÓN, PROPAGACIÓN Y FISIOLOGÍA DE PLANTAS QUE VIVEN EN AMBIENTES CONTRASTANTES”**

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: LABORATORIO DE DESARROLLO EN PLANTAS. DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA COMPARADA Y UNIDAD DE ANÁLISIS AMBIENTAL**

**ASESORA DEL TEMA:  
Dra. Margarita Collazo Ortega**

**SUSTENTANTE:  
Eréndira Alejandra Arellano Leyva**

# *Dedicatoria*

A Dios por la oportunidad de seguir en pie y disfrutando de la vida a pesar de los tropiezos.

A mis padres por todo el amor y enseñanzas que me dan día con día, por el apoyo en los momentos buenos y malos.

A mis hermanas por todo su amor, compañía y apoyo. Paty, te agradezco los momentos de aliento y sabiduría. Nancy, gracias por cada sonrisa.

A mis abuelos Felipe y Javier por todo el amor que en vida supieron brindar y hacia quiénes tengo una gran admiración.

A mi Asesora de tesis, Dra. Margarita Collazo quién admiro mucho y con todo su apoyo, cariño y enseñanzas ha hecho de mí una mejor persona y de la que he aprendido que pese a las adversidades siempre hay que brindar una sonrisa.

A la Familia Martínez Pabello por toda su ayuda y cariño.

A Pável por todo el amor, alegrías y apoyo que me ha brindado, que es una persona muy especial en mi vida y cuya personalidad entre más conozco más admiro.

A mi más mejor amiga Alejandra (lo siento, no pude evitarlo!) a quién amo con todo el corazón y ha estado a mi lado apoyándome en todo momento por 12 alegres años. Amiga... te admiro mucho y nunca dejes de sonreír que esa hermosa sonrisa vaya que es contagiosa.

A toda la bandita McDonald's, cada uno con virtudes muy especiales. Los quiero inmensamente y valoro mucho los momentos que he vivido con cada uno de ustedes en todas esas experiencias que hemos compartido.

Al muy adorado Kinder Rules con quiénes compartí los momentos más felices de mi adolescencia y entable una hermosa amistad, los amo mucho chic@s.

A Brenda, Luis, Micra, Gerardo, Alba, Isaac, Xel y Micha por su gran amistad y apoyo, los quiero mucho.

# Agradecimientos

## Académicos

- Al Laboratorio de Análisis Ambiental de la Facultad de Ciencia, particularmente a la Dra. Claudia Ponce de León Hill y al M. en C. Manuel Hernández Quiroz por el apoyo y enseñanza de las técnicas de detección de hidrocarburos aromáticos policíclicos y metales pesados.
- Agradezco al Biól. Jerónimo Reyes por permitir llevar a cabo el desarrollo del trabajo en el Área de colecciones del Jardín Botánicos, por el apoyo y enseñanza de las Azoteas Verdes.
- Al M. en C. Roberto Gerardo Huerta Guzmán por sus enseñanzas y apoyo de la técnica de cuantificación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en la lluvia.
- Agradezco al Laboratorio de Desarrollo en Plantas y todo su equipo por la confianza y apoyo que me han brindado desde que ingrese al Taller de Biología de la reproducción, propagación y fisiología de plantas que viven en ambientes contrastantes.
- A la Dra. Margarita Collazo Ortega quién con su gran apoyo y enseñanzas me ha convertido en lo que soy.

## Institucionales

Este proyecto se llevó a cabo en las instalaciones de la Facultad de Ciencias de la UNAM, con el financiamiento del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) No. IN-225510-3

## Índice

	Página
<b>Resumen</b>	
<b>1</b> <i>Introducción</i> .....	<b>1</b>
<b>2</b> <i>Justificación</i> .....	<b>3</b>
<b>3</b> <i>Hipótesis</i> .....	<b>4</b>
<b>4</b> <i>Objetivos</i> .....	<b>4</b>
<b>4.1</b> <i>Objetivo general</i> .....	<b>4</b>
<b>4.2</b> <i>Objetivos particulares</i> .....	<b>4</b>
<b>5</b> <i>Marco teórico</i> .....	<b>5</b>
<b>5.1</b> <i>Clasificación y tipo de contaminantes atmosféricos</i> .....	<b>5</b>
<b>5.2</b> <i>Mecanismos de remoción de los contaminantes de la atmósfera</i> .....	<b>5</b>
<b>5.3</b> <i>Contaminantes atmosféricos en la Ciudad de México</i> .....	<b>6</b>
<b>5.4</b> <i>Precipitación pluvial</i> .....	<b>7</b>
<b>5.5</b> <i>Contaminación por lluvias en zonas urbanas</i> .....	<b>8</b>
<b>5.6.</b> <i> Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs)</i> .....	<b>8</b>
5.6.1 <i>Propiedades físicas y químicas</i> .....	8
5.6.2 <i>Fuentes de exposición</i> .....	12
5.6.3 <i>Efectos en la salud</i> .....	13
<b>5.7</b> <i>Metales pesados</i> .....	<b>14</b>
5.7.1 <i>Propiedades físicas y químicas</i> .....	14
5.7.2 <i>Fuentes de exposición</i> .....	15
5.7.3 <i>Efectos en la salud</i> .....	16
5.7.4 <i>Movilidad en suelos</i> .....	17
<b>5.8</b> <i>Azoteas verdes</i> .....	<b>19</b>
5.8.1 <i>Servicios ecosistémicos</i> .....	20
5.8.2 <i>Estudios de caso</i> .....	21

5.9	Características de la Zona Metropolitana del Valle de México .....	22
5.10	Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA) .....	23
6.	<b>Método</b> .....	25
6.1	<b>Área de estudio</b> .....	26
6.1.1	Azotea verde extensiva .....	26
6.2	Sistema de recolección de agua de lluvia e infiltrada .....	27
6.3	<b>Modelo escala</b> .....	28
6.4	<b>Colección de las muestras</b> .....	29
6.5	<b>Tratamiento de las muestras</b> .....	30
6.6	<b>Análisis</b> .....	31
6.6.1	Análisis cromatográfico de los HAPs .....	31
6.6.2.	Análisis de los metales pesados por Espectrometría de Absorción Atómica. ....	31
6.7	<b>Análisis estadístico</b> .....	32
7.	<b>Resultados y discusión</b> .....	32
7.1	<b>Precipitación pluvial</b> .....	32
7.2	<b>Agua infiltrada</b> .....	33
7.3	<b>Valores de pH</b> .....	34
7.4	<b>Determinación de los eventos para el análisis de HAPs y metales pesados en agua de lluvia e infiltrada.</b> .....	35
7.5	<b>Concentración de los Hidrocarburos aromáticos policíclicos</b> .....	35
7.5.1	Bajo peso molecular .....	35
7.5.2	Mediano peso molecular.....	36
7.5.3	Alto peso molecular .....	37
7.6	<b>Metales pesados</b> .....	40
7.6.1	Concentración en el agua de lluvia e infiltrada .....	40
7.6.2	Modelo escala.....	42
7.6.3	Suelo.....	43

<b>8</b>	<b>Conclusiones</b> .....	<b>45</b>
<b>9</b>	<b>Sugerencias</b> .....	<b>46</b>
<b>10</b>	<b>Bibliografía</b> .....	<b>47</b>
	<b>Anexo 1</b> .....	<b>57</b>
	<b>Anexo 2</b> .....	<b>58</b>
	<b>Anexo 3</b> .....	<b>59</b>
	<b>Anexo 4</b> .....	<b>60</b>

## Índice de figuras

	Página
Figura 1. Mecanismos de remoción de contaminantes: deposición seca y deposición húmeda.....	6
Figura 2. Precipitación pluvial anual, periodo 2000-2009 (mm) (CONAGUA, 2011). .....	8
Figura 3. Factores que influyen en la movilidad de los metales pesado del suelo. ....	18
Figura 4. Capas de construcción típicas de una azotea verde.....	19
Figura 5. Ejemplo de la escorrentía de una azotea verde (línea punteada) generada por un evento de lluvia dado (línea negra) (Berndtsson, 2010).....	21
Figura 6. Líneas de flujo del aire superficial en la tarde (13 a 18 horas) en enero de 1997 (Jauregui, 2000). .....	23
Figura 7. Ubicación del sitio de estudio en la República Mexicana. ....	26
Figura 8. Fotografía de la azotea verde extensiva en el Jardín Botánico de la UNAM (a) y algunas especies.: (b) Echeveria sp., (c) Agave celsii, (d) Opuntia tomentosa y (e) Sedum dendroideum. ...	27
Figura 9. Sistema para la captura de agua de lluvia. Izquierda: para la de la azotea verde; en medio: tubería para el agua infiltrada; derecha: captura de agua infiltrada. Los envases de plástico se utilizaron para el análisis de los de metales pesados y los de vidrio para HAPs. ....	28
Figura 10. Modelo a escala ubicado en la azotea verde estudiada. A la derecha (a), modelo con material de soporte y (b) con material y sustrato. Izquierda, modelo escala, tubería PVC y envases de captura de agua infiltrada para el análisis de metales pesados. ....	29
Figura 11. Volumen de precipitación en el área total de la azotea verde extensiva. Morado: eventos de 48 h; rojo eventos de 24 h.....	32
Figura 12. Comparación del volumen de precipitación capturada en la azotea verde del Jardín Botánico y el registrado por la Estación Meteorológica del CCH-Sur en litro por metro cuadrado (mm).....	33
Figura 13. Volumen de infiltración por evento (L). En azul se marcan los eventos en que llovió y en morado aquellos en los que no, pero ocurrió escorrentía.....	34
Figura 14. pH del agua de precipitación e infiltrada. ....	35
Figura 15. Eventos para el análisis fisicoquímico.....	35
Figura 16. Variación de la concentración (ppt) de los HAPs de bajo peso molecular (Naftaleno, Acenaftileno, Acenafteno y Fluoreno) en agua de lluvia e infiltrada.....	36
Figura 17. Variación de la concentración (ppt) de los HAPs de mediano peso molecular (Fenantreno, Antraceno, Fluoranteno, Pireno, Benzo(a)antraceno y Criseno) en el agua de lluvia e infiltrada. ....	37
Figura 18. Variación de la concentración (ppt) de los HAPs de alto peso molecular (Benzo[b]fluoranteno, Benzo[k]fluoranteno, Benzo[a]pireno, Indeno[123-cd]pireno, Dibenzo[ah]antraceno y Benzo[ghi]perileno) en agua de lluvia e infiltrada.....	38
Figura 19. Cromatograma del perfil de los 16 HAPs de la muestra estándar.....	39



Figura 20. Cromatograma del perfil de HAPs en el agua de lluvia.....	39
Figura 21. Cromatograma del perfil de HAPs en el agua de lluvia infiltrada.....	40
Figura 22. Variación de la concentración (ppb) de metales pesados manganeso, níquel, cromo, cobalto, plomo y cadmio en agua de lluvia e infiltrada. En azul la lluvia y en verde la infiltrada por fecha y muestra. ....	41
Figura 23. Variación de la concentración (ppb) de metales pesados manganeso, níquel, cromo, cobalto, plomo y cadmio en agua de lluvia e infiltrada. ....	42
Figura 24. Variación de la concentración (ppb) de zinc en agua de lluvia e infiltrada.....	42

## Índice de Tablas

	<b>Página</b>
Tabla I. Propiedades físicas y químicas de los HAPs analizados en este estudio (Modificada de Ibañez, 2008). ....	10
Tabla II. Estructura, fórmula y peso molecular de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (modificado de Huerta, 2010). ....	11
Tabla III. Algunos HAPs considerados como marcadores de fuentes de emisión. ....	12
Tabla IV. Evidencia de carcinogenicidad, de acuerdo a varias agencias reguladoras, de HAPs analizados en animales experimentales y en humanos (modificado de Ibañez, 2008). ....	14
Tabla V. Emisiones de contaminantes atmosféricos en los Estados Unidos (Valette-Silver, 1993; García, 2007). ....	16
Tabla VI. Condiciones de operación para el GC-MS.....	31
Tabla VII. Comparación del modelo a escala y la AVE en eventos de 24 h y 48 h. ....	43
Tabla VIII. Concentración en mg Kg <sup>-1</sup> de los metales pesados en las muestras de suelo de la zona A y zona B de la AVE en eventos de 24 h y 48 h. ....	44
Tabla IX. Ciclones tropicales de 2009.....	57
Tabla X. Concentración (ppt) de los HAPs en el agua de lluvia e infiltrada de la AVE en por muestra. ....	59
Tabla XI. Límites de detección para los 16 HAPs cuantificados. ....	59
Tabla XII. Concentración (ppb) de los metales pesados en el agua de lluvia e infiltrada de la AVE en por muestra. Sombreado se muestra los eventos 48 h y no sombreados los de 24 h. ....	60

## Lista de Abreviaturas

AV.- Azotea Verde  
AVE.- Azotea Verde Extensiva  
CG/EM.- Cromatografía de Gases con Espectrometría de Masas  
CIC.- Capacidad de Intercambio Catiónico  
COVs.- Compuestos Orgánicos Volátiles  
EAA.-Espectrometría de Absorción Atómica  
EDTA.- Ácido etilendiaminotetraacético  
EPA.- Environmental Protection Agency  
EPTs.- Elementos potencialmente tóxicos  
HAP.- Hidrocarburo Aromático Policíclico  
PROFEPA.- Procuraduría Federal de Protección al Ambiente  
REPSA.- Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel  
SEMARNAT.- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales  
SIM.- Selected Ion Monitoring  
ZMVM.- Zona Metropolitana del Valle de México

Naf.- Naftaleno  
Act.- Acenaftileno  
Acf.- Acenafteno  
Fln.- Fluoreno  
Fnt.- Fenantreno  
Ant.- Antraceno  
Flt.- Fluoranteno  
Prn.- Pireno  
Bat.- Benzo[a]antraceno  
Csn.- Criseno  
Bbf.- Benzo[b]fluoranteno  
Bkf.- Benzo[k]fluoranteno  
Bap.- Benzo[a]pireno  
Idp.- Indeno[123-cd]pireno  
Dba.- Dibenzo[ah]antraceno  
Bpl.- Benzo[ghi]perileno

## Resumen

Las azoteas verdes extensivas (AVE) son un tipo de naturación que constituyen una estrategia de mejoramiento del medio ambiente, que, además de aumentar las áreas verdes en las grandes zonas urbanas, ofrecen varios beneficios ecosistémicos, siendo uno de ellos la mitigación de la contaminación atmosférica. El presente trabajo se realizó en una AVE del Jardín Botánico de la Universidad Nacional Autónoma de México ubicada en el sur del Distrito Federal, dentro de la Reserva del Pedregal de San Ángel. Esta zona tiene una mayor concentración de áreas arboladas respecto al norte de la ciudad sin embargo el tránsito vehicular es abundante. Se evaluó durante dos meses de la época de lluvia (agosto y septiembre del 2009) la capacidad de adsorción de la AVE para retener 16 hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) y 7 metales pesados del agua de lluvia e infiltrada; se cuantificó la concentración de HAPs por Cromatografía de Gases y de metales pesados por Espectrometría de Absorción Atómica. El análisis de resultados mostró que 14 HAPs están presentes en la lluvia, y los de mayor concentración son naftaleno, fenantreno, fluoranteno y pireno, asimismo, la concentración de 13 de los 14 HAPs disminuyó en el agua de lluvia infiltrada y se puede afirmar con el 95% de confianza que 4 HAPs son retenidos por una AVE; el naftaleno tuvo las concentraciones más altas en los muestreos. Respecto a los metales pesados, el zinc fue el de mayor concentración en la precipitación pluvial, mientras que la de manganeso, cromo, y níquel tendió a ser superior en el agua infiltrada en la mayoría de las muestras, por otro lado, el plomo redujo su concentración en todas las muestras de agua infiltrada. Los resultados sugieren que la AVE es capaz de retener 4 HAPs y plomo de la precipitación pluvial y contribuye con manganeso y cromo, metales esenciales y benéficos. También sugieren que retiene el agua de lluvia y disminuye la escorrentía en eventos de lluvia leve, así como neutraliza las deposiciones ácidas. No se observó ninguna correlación entre la precipitación y concentración tanto para HAPs como metales pesados.

## 1 Introducción

La contaminación por elementos o compuestos que son tóxicos ambientales es uno de los problemas más importantes que afectan los ecosistemas y surge como resultado de la adición excesiva de cualquier sustancia al medio ambiente (Fernández *et al.*, 2006), ocasiona la pérdida de biodiversidad global y puede afectar de forma irreversible la estructura y función de los ecosistemas, tales como los ciclos biogeoquímicos. Se ha reportado que la capacidad de los ecosistemas para amortiguar los contaminantes generados por las actividades humanas es limitada, lo cual pone en riesgo su capacidad productiva (CCA, 1997; Romero, 2006).

Se considera una fuente potencial de contaminación no puntual a la escorrentía de las azoteas comunes, por dos razones principales. En primera los compuestos contenidos en los materiales de las azoteas pueden ser lixiviados en la escorrentía, más los contaminantes atmosféricos y las sustancias orgánicas, tales como desecho de insecto e insectos muertos. Segundo, la temperatura en la azotea es mucho mayor que la temperatura de otras superficies, debido al bajo albedo, la inclinación da mayor superficie a la radiación solar directa y menos efecto de sombra de los árboles circundantes. Las altas temperaturas pueden acelerar reacciones químicas y descomposición orgánica de los materiales y compuestos que están acumulados en la azotea de las casas (Chang *et al.*, 2004).

Se considera que un agente contaminante es aquel elemento o compuesto, cuyas concentraciones se encuentran por encima de los valores en los que normalmente se encuentran en el medio ambiente y que, además, pueden alterar de forma negativa al medio ambiente, afectando sus características fisicoquímicas y ocasionando perturbaciones en la biota, lo que representa un factor de riesgo para el hombre y otros seres vivos (Jiménez, 2001; Vásquez, 2005). Numerosos residuos y desechos de sustancias tóxicas son vertidos al medio ambiente, principalmente en sitios altamente industrializados o en zonas urbanas. El estudio de la composición química de la precipitación pluvial es necesario para comprender la incorporación de contaminantes del aire a la lluvia. En este trabajo se estudian las azoteas verdes extensivas como una estrategia de mitigación a la contaminación atmosférica.

Una azotea verde se puede definir como cualquier construcción en la superficie de un techo que ha sido cubierta con suelo y plantas. Imitan a los ecosistemas naturales para proporcionar algunos

servicios ecosistémicos (Oberndorfer *et al.*, 2007). La adición de suelo y vegetación a la superficie del techo puede reducir algunos efectos negativos de los edificios sobre los ecosistemas locales, como el consumo de energía, el efecto “isla de calor urbano”, el volumen de escorrentía en la infraestructura urbana; además pueden aumentar el aislamiento acústico, la resistencia a incendios, la longevidad de la membrana del techo, proveen un espacio verde de recreo y mejoran la calidad del aire. Los beneficios ambientales proporcionados por las AVE se derivan de su funcionamiento como ecosistemas (Czemiel *et al.*, 2006; Getter y Rowe, 2006; Oberndorfer *et al.*, 2007). La implementación de azoteas verdes para la gestión de aguas pluviales ha demostrado ser una herramienta eficaz en zonas altamente urbanizadas (Center for the Advancement of green roof technology, 2005; Mentens *et al.*, 2005; Carter y Jackson, 2007).

Debido a estas virtudes, en los últimos años ha habido un mayor interés en las azoteas verdes, sin embargo, en la actualidad hay pocos estudios en México acerca de estos sistemas.

Las ciudades industrializadas emiten 35% de los HAPs al medio ambiente (Harvey, 1997). Como contaminantes han despertado preocupación debido a que algunos compuestos han sido identificados como carcinógenos y mutágenos e invaden el aire, el agua y los suelos. Y son compuestos de preocupación ambiental, ya que son persistentes y bioacumulables. Con la Revolución Industrial y el aumento en la combustión para calefacción, energía y fábricas, sus concentraciones han aumentado en el medio ambiente (Simcik y Offenberg, 2006).

Por otra parte, el análisis de metales pesados en la lluvia es importante debido a su papel en el suelo y la carga de agua, por su bioacumulación en los organismos vivos, por ser precursores de formas ácidas, en la estabilidad de las nubes, en la catálisis atmosférica, en el aumento de la frecuencia de aire y de enfermedades cuyo origen es por el consumo de agua contaminada (Vernet, 1991; Bem *et al.*, 2003; Navarro *et al.*, 2007). Ello significa que los organismos pueden incorporar sustancias químicas como los metales pesados considerados “elementos potencialmente tóxicos” (EPTs) (Alonso *et al.*, 2004) durante un cierto plazo, en concentraciones mayores a las que se encuentran en el medio circundante (Spacie *et al.*, 1995). Sin embargo el Cu, Fe, Ni y Zn se sabe que son esenciales para el metabolismo de plantas y animales (Prasael, 2001; Epstein y Bloom, 2005; Taíz y Zeiger, 2010). La concentración de metales en la atmósfera es cada vez mayor debido a sus emisiones por fuentes naturales y antropogénicas, la mayoría de los elementos se introducen en la atmósfera en forma de aerosoles y se depositan por deposición

húmeda o seca, tanto en la zona emisora como en zonas remotas (Yang *et al.*, 2000, Fang *et al.*, 2004; Báez *et al.*, 2006).

## **2 Justificación**

En las grandes urbes, la industrialización y el crecimiento poblacional tienen efectos adversos sobre la composición química de la lluvia y la contaminación del medio ambiente, de modo que es primordial realizar estudios y proponer aquellos sistemas que ayuden a aminorarlos y preferentemente a eliminarlos. En este trabajo se analiza una azotea verde extensiva, como propuesta de mitigación a los problemas de contaminación por la precipitación pluvial, inundaciones y desbordamiento de alcantarillado combinado.

Para conocer si una azotea verde extensiva, como sistema, es capaz de contribuir para disminuir la contaminación, es necesario primero cuantificar el contenido de algunos contaminantes en la lluvia y su posible retención al entrar en contacto con este sistema. Se eligieron para el análisis HAPs (compuestos orgánicos) y metales pesados (inorgánicos) por su importancia como contaminantes ambientales. Los HAPs son compuestos cancerígenos y mutagénicos, mientras que los metales pesados son elementos tóxicos para los seres humanos y el medio ambiente en altas concentraciones. Además es importante mencionar que no existen estudios previos para la Ciudad de México en azoteas verdes.

### **3 Hipótesis**

**HO:** Una azotea verde extensiva tiene la capacidad de retener contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en el agua de lluvia.

**HA:** Una azotea verde extensiva tiene la capacidad de retener algunos de los contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en el agua de lluvia.

### **4 Objetivos**

#### **4.1 Objetivo general**

Evaluar la capacidad de adsorción de una azotea verde extensiva para retener contaminantes orgánicos e inorgánicos de la precipitación pluvial.

#### **4.2 Objetivos particulares**

- a) Determinar 16 hidrocarburos aromáticos policíclicos y 7 metales pesados en la precipitación y el agua infiltrada por una azotea verde extensiva.
- b) Determinar 7 metales pesados en el suelo y material de soporte de una azotea verde extensiva.
- c) Estimar la capacidad de una azotea verde extensiva para retener HAPs y metales pesados de la precipitación.
- d) Aportar información de este sistema como estrategia de mitigación de la contaminación atmosférica.

## **5 Marco teórico**

### **5.1 Clasificación y tipo de contaminantes atmosféricos**

La contaminación atmosférica se define como la presencia en el aire de toda materia o energía en cualesquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o actuar en la atmósfera, altere o modifique su composición y condición natural (García M. R., 2007).

Se clasifican por su origen en contaminantes primarios y secundarios. Los primarios se emiten a la atmósfera por procesos naturales o por actividades humanas, algunos ejemplos son el monóxido de carbono (CO), el bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>). Los contaminantes secundarios son los que se forman en la atmósfera por reacciones químicas o fotoquímicas en las que intervienen contaminantes primarios; algunos ejemplos son el ozono (O<sub>3</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y los sulfatos (Ibañez, 2008).

### **5.2 Mecanismos de remoción de los contaminantes de la atmósfera**

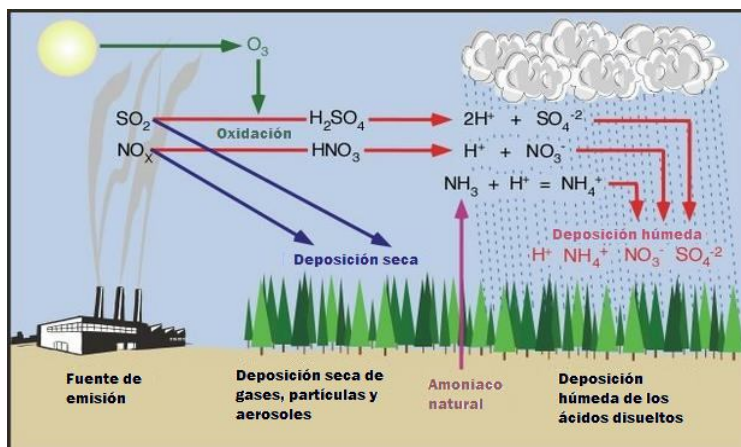
La remoción de un contaminante de la atmósfera puede ocurrir por deposición húmeda o por deposición seca. La deposición seca se define como un proceso de sedimentación gravitacional y de transferencia turbulenta que remueve partículas y gases de la atmósfera. En la deposición húmeda, los gases y partículas son transportados hacia la superficie por gotas de agua, granizo, nieve, cristales de hielo o neblina, donde colisionan, son absorbidas o experimentan reacciones químicas en fase acuosa (García M. R., 2007). Duce y Hoffman (1976), concluyeron que la remoción de las partículas por la lluvia es aproximadamente dos veces mayor que la deposición seca.

Los principales procesos de remoción de partículas por deposición húmeda son:

- Rain-out (incorporación dentro de las nubes), los gases son removidos por disolución o absorción en las gotas de nube, donde son transformados por reacciones químicas en fase acuosa. El contaminante absorbido puede reaccionar dentro de la nube para formar productos secundarios que también pueden ser removidos por precipitación.
- Wash-out (transferencia de las nubes al suelo), consiste en la remoción de un contaminante por absorción a las gotas de lluvia, durante su caída desde las nubes hasta el suelo.

En la mayoría de los procesos de remoción de partículas, posiblemente se produzca una simultaneidad de estos dos mecanismos atmosféricos.





**Figura 1.** Mecanismos de remoción de contaminantes: deposición seca y deposición húmeda.

### 5.3 Contaminantes atmosféricos en la Ciudad de México

Las severas alteraciones hidrológicas y ecológicas del área metropolitana de la Ciudad de México por la urbanización, han provocado cambios en las condiciones climáticas a nivel regional y local. Prácticamente tres cuartas partes de los bosques de coníferas y encinos han desaparecido y se han desecado casi la totalidad de los lagos, mientras que dos tercios de sus tierras no urbanizadas presentan un avanzado proceso de erosión (Jáuregui *et al.*, 2000). La emisión de contaminantes tiende a estancarse en la atmósfera debido a las características geográficas, a la presencia de inversiones térmicas y a los sistemas de alta presión a causa de la altitud (2240 msnm), donde recibe una radiación solar intensa la mayor parte del año. Históricamente, la zona más afectada por la contaminación atmosférica es el suroeste de la ciudad, debido al patrón de circulación de los vientos dominantes (Fast. J. D. y S. Zhong, 1998; Jáuregui, 2000; Raga *et al.*, 2001). Las montañas que rodean la ciudad, impiden que se dispersen adecuadamente los contaminantes atmosféricos, especialmente hacia el sur, ya que se quedan atrapados en el interior de la Cuenca. Algunos de los factores que afectan la concentración de metales y otros contaminantes del aire en la Ciudad de México son:

- Estancamiento del aire debido al entorno montañoso que constituye una barrera natural que dificulta la libre circulación del viento y la dispersión de los contaminantes.
- Atmósfera muy estable.
- Abundante radiación solar, lo cual favorece la formación de contaminantes fotoquímicos.
- Formación de líneas de confluencia sobre la cuenca de la Ciudad.

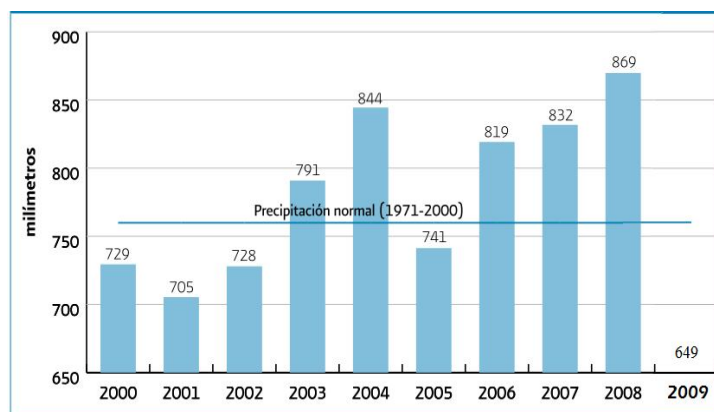
#### 5.4 Precipitación pluvial

En meteorología, la precipitación es cualquier forma de hidrometeoro tan mínimos pero son demasiados que caen del cielo y llegan a la superficie terrestre. Este fenómeno incluye lluvia, llovizna, nieve, aguanieve, granizo. Según la definición oficial de la Organización Meteorológica Mundial (1993), la lluvia es la precipitación de partículas líquidas de agua, de diámetro mayor de 0,5 mm o de gotas menores, pero muy dispersas que llegan a la superficie terrestre. La precipitación se mide en milímetros de agua, o litros caídos por unidad de superficie (m<sup>2</sup>).

De acuerdo al Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) (2006), el promedio de precipitación pluvial indica que la mayor cantidad de lluvia se presenta en la parte occidental del Distrito Federal, al pie de la sierra Ajusco-Chichinautzin. Esto ocurre debido al flujo de viento de verano, durante las lluvias intensas y reforzadas por el levantamiento mecánico del aire que golpea montaña, rebota y asciende. La humedad se condensa formando nubes y produce la precipitación. El aumento de la precipitación pluvial propicia un efecto de "lavado atmosférico", el cual favorece a una mejor calidad de aire, ya que mitiga la generación de partículas.

La lluvia depende de tres factores: presión, temperatura y radiación solar. En las últimas décadas se ha producido un fenómeno que causa lluvias con mayor frecuencia cuando la radiación solar es menor, es decir, por la noche (Jáuregui, 2000).

De los 1489 miles de millones de metros cúbicos (km<sup>3</sup>) de precipitación pluvial anual total en México, la disponibilidad nacional media total es de 460 km<sup>3</sup>; sin embargo el 73.1% de esa agua de lluvia se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 22.1 % escurre por los ríos o arroyos, y el 4.8% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos y no está distribuida físicamente de manera homogénea en el territorio nacional, ni en las distintas épocas del año (SMA, 2008; CONAGUA, 2011). El 68% de la precipitación normal mensual cae entre los meses de junio a septiembre que se asocia a la entrada de aire tropical con alto contenido de humedad del Océano Pacífico, Mar Caribe y Golfo de México (Carabias y Landa, 2005; SMA, 2008; CONAGUA, 2011).



**Figura 2.** Precipitación pluvial anual, periodo 2000-2009 (mm) (CONAGUA, 2011).

## 5.5 Contaminación por lluvias en zonas urbanas

Debido a que una superficie impermeable no puede absorber la precipitación, el agua fluye (escorrentía) y aumenta la infiltración en el agua subterránea. En los bosques aproximadamente el 95% del agua de lluvia es absorbida, mientras que sólo el 25% lo es en las ciudades (Scholz–Barth, 2001).

Las zonas urbanas están dominadas por superficies duras e impermeables que contribuyen a la escorrentía en el período de lluvias, esto provoca una combinación de precipitación pluvial con el agua residual del alcantarillado, cuando esta mezcla sobrepasa su capacidad de volumen se produce el “desbordamiento de alcantarillado combinado” que desemboca en mares, ríos y lagos llevando hasta ellos contaminantes. En la ciudad de México el problema es más grave ya que es una cuenca endorreica y no tiene salida a ningún cuerpo de agua.

Además de agravar las inundaciones, erosión y sedimentación, la escorrentía urbana es alta en contaminantes tales como sólidos en suspensión, metales pesados, cloruros, aceites y grasas, pesticidas y residuos de petróleo, entre otros, que perjudican la vida silvestre, hábitats naturales y los suministros de agua potable (Moran *et al.*, 2005).

## 5.6. Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs)

### 5.6.1 Propiedades físicas y químicas

Los HAPs son compuestos orgánicos que contienen dos o más anillos de benceno. A elevadas temperaturas, la pirólisis de compuestos orgánicos produce fragmentos de moléculas y radicales que se combinan para dar lugar a los HAPs, proceso que se llama pirosíntesis. La composición de los productos de la pirosíntesis depende del combustible, de la temperatura y del tiempo de

permanencia en la zona de combustión. Algunos combustibles que forman HAPs son metano, otros hidrocarburos, ligninas y péptidos. Sin embargo, los compuestos que contienen ramificaciones, los compuestos insaturados y las estructuras cíclicas suelen favorecer su formación (Neilson, 1998).

Los sistemas conjugados  $\pi$  de los HAPs son los responsables de su estabilidad química y dependiendo de su carácter aromático, pueden absorber luz ultravioleta y producir un espectro fluorescente característico (Finlayson-Pitts y Pitts Jr., 1986). Su estabilidad decrece conforme el número de anillos aumenta y también la solubilidad tiende a disminuir con el incremento en el peso molecular, aunque son solubles en varios compuestos orgánicos. (Harvey, 1997). La **tabla I** ilustra algunas propiedades físicas y químicas de estos compuestos y la **tabla II**, su estructura, fórmula y peso molecular.

**Tabla I.** Propiedades físicas y químicas de los HAPs analizados en este estudio (Modificada de Ibañez, 2008).

HAPs	Punto de fusión (°C) <sup>a</sup>	Punto de ebullición (°C) <sup>a</sup>	Presión de vapor (mm de Hg)	Densidad (g cm <sup>-3</sup> ) <sup>a</sup>	Coefficiente de partición (Log K <sub>OW</sub> /Log K <sub>OC</sub> ) <sup>a</sup>	Solubilidad en agua a 25 °C (mg L <sup>-1</sup> ) <sup>a</sup>	Constante de Henry (atm m <sup>3</sup> mol <sup>-1</sup> ) <sup>a,*</sup>	Solubilidad en disolvente orgánicos <sup>a</sup>
<b>Naftaleno</b>	80-82	217.7	7.8x10 <sup>-2(3)</sup>	1.15 <sup>(3)</sup>	3.4	30	4.82x10 <sup>-4</sup> <sup>d</sup>	Dietiléter, etanol, benceno, tolueno, disulfuro de carbono, tetracloruro de carbono
<b>Acenaftileno</b>	92-93	265-275	2.9x10 <sup>-2(3)</sup>	0.899 <sup>b,(3)</sup>	4.07	3.93	1.45x10 <sup>-3</sup>	Etanol, dietiléter, benceno
<b>Acenafteno</b>	95	277.5	4.4x10 <sup>-3(3)</sup>	1.225 <sup>(1)</sup>	3.98	1.93	7.91x10 <sup>-5</sup>	Etanol, metanol, propanol, Cloroformo, benceno, ácido acético glacial
<b>Fluoreno</b>	116-117	295	3.2x10 <sup>-4(3)</sup>	1.203 <sup>b,(3)</sup>	4.18	1.98	1.0x10 <sup>-4</sup>	Ácido acético, acetona, benceno, disulfuro de carbono, tetracloruro de carbono, Dietiléter, etanol, pirimidina, tolueno
<b>Fenantreno</b>	100	340	6.8x10 <sup>-4(b)</sup>	0.980 <sup>(2)</sup>	4.45	1.20	2.56x10 <sup>-b</sup>	Ácido acético, glacial, benceno, disulfuro de carbono, tetracloruro de carbono, dietiléter anhidro, etanol, tolueno
<b>Antraceno</b>	216	340	1.7x10 <sup>-5(5)</sup>	1.283 <sup>b,(3)</sup>	4.54	0.076	1.77x10 <sup>-5</sup>	Acetona, benceno, disulfuro de carbono, tetracloruro de carbono, cloroformo, dietiléter, etanol, metanol, tolueno.
<b>Fluoranteno</b>	107-111	375	5.0x10 <sup>-6(b)</sup>	1.25 <sup>b,(3)</sup>	4.90	0.26	6.5x10 <sup>-6</sup>	Etanol, dietiléter, benceno, ácido acético.
<b>Pireno</b>	156	360	2.5x10 <sup>-6(5)</sup>	1.27 <sup>(4)</sup>	4.88	0.077	1.14x10 <sup>-5</sup>	Acido acético glacial, benceno, disulfuro de carbono, dietiléter, etanol, éter de petróleo, tolueno
<b>Benzo(a)antraceno</b>	158-159	400-435 sublima	2.2x10 <sup>-8(3)</sup>	1.27 <sup>(3)</sup>	5.61	0.010	1x10 <sup>-6</sup>	Ligeramente soluble en acido acético y etanol caliente, acetona, dietiléter, benceno.
<b>Criseno</b>	255-256	448	6.3x10 <sup>-7(5)</sup>	1.274	5.30	2.8x10 <sup>-3</sup>	1.05x10 <sup>-6</sup>	Acetona, disulfuro de carbono, dietiléter, etanol, ácido acético glacial, tolueno, xileno, benceno.
<b>Benzo(b)fluoranteno</b>	168	481 <sup>c</sup>	5.07x10 <sup>-7(b)</sup>	n.d.	6.04	1.2x10 <sup>-3</sup>	1.22x10 <sup>-b</sup>	Benceno, acetona
<b>Benzo(k)fluoranteno</b>	215	480	5.2x10 <sup>-8(3)</sup>	n.d.	5.74	7.6x10 <sup>-4</sup>	3.87x10 <sup>-5</sup>	Benceno, acido acético, etanol
<b>Benzo(a)pireno</b>	179	495	5.6x10 <sup>-9(3)</sup>	1.351	6.06	2.3x10 <sup>-3</sup>	4.9x10 <sup>-7</sup>	Etanol, metanol, benceno, tolueno, xileno y dietiléter.
<b>Indeno(123-cd)pireno</b>	163	530	7.9x10 <sup>-11(3)</sup>	n.d.	6.58	5.3x10 <sup>-4</sup>	6.95x10 <sup>-8</sup>	Soluble en disolventes orgánicos
<b>Dibenzo(a,h)antraceno</b>	262	524 <sup>c</sup>	3.7x10 <sup>-10(3)</sup>	1.282	6.84	5x10 <sup>-4</sup>	7.3x10 <sup>-8</sup>	Etanol, acetona, acido acético, benceno, tolueno, xileno
<b>Benzo(ghi)perileno</b>	273	525	1x10 <sup>-10(b)</sup>	n.d.	6.50	2.6x10 <sup>-4</sup>	1.44x10 <sup>-7</sup>	Benceno, cloruro de metileno, acetona

(<sup>1</sup>) -0°C, (<sup>2</sup>) 4°C, (<sup>3</sup>) 20°C, (<sup>4</sup>) 23°C, (<sup>5</sup>) 25°C

<sup>a</sup> - ATSDR, 1995

<sup>b</sup> - Lide DR ed. 1991. CRC handbook of chemistry and physics., 72nded., Boca Raton, Florida, CRC Press., pp. 22-35.

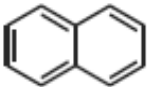
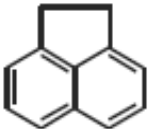
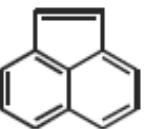
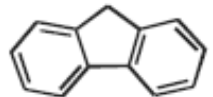
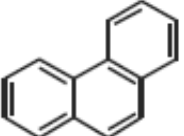
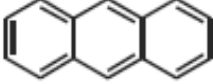
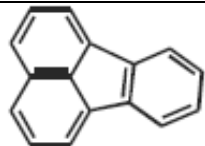
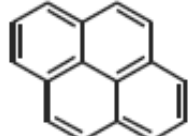
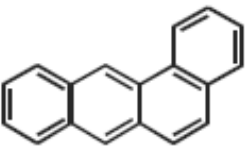
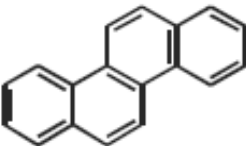
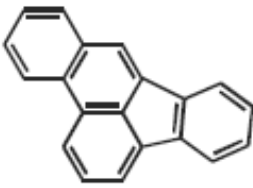
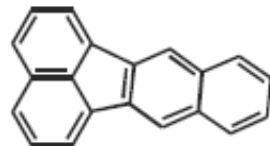
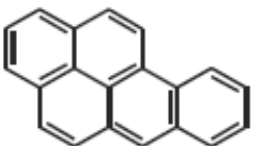
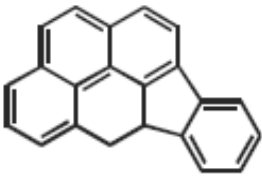
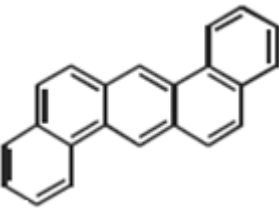

<sup>c</sup> - Manual Aldrich, 2002

<sup>d</sup> - Mackay D., W. Y. Shiu y R. P. Sutherland, 1979. Determination of air-water Henry's law constants for hydrophobic pollutants. Environment Science Technology 13, 333-337

n.d.- No disponible

\*- Contante de Henry (H<sub>c</sub>), coeficiente de partición aire-agua, H<sub>c</sub> = P/c; donde: p =presión de vapor del HAP y c = solubilidad en agua.

**Tabla II.** Estructura, fórmula y peso molecular de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (modificado de Huerta, 2011).

1. Naftaleno, C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>  PM 128.171	2. Acenaftileno, C <sub>12</sub> H <sub>8</sub>  PM 152.192	3. Acenaftileno, C <sub>12</sub> H <sub>8</sub>  PM 154.208	4. Fluoreno, C <sub>13</sub> H <sub>10</sub>  PM 166.219
5. Fenantreno, C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>  PM 178.229	6. Antraceno, C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>  PM 178.229	7. Fluoranteno, C <sub>16</sub> H <sub>10</sub>  PM 202.251	8. Pireno, C <sub>16</sub> H <sub>10</sub>  PM 202.251
9. Benzo(a)antraceno, C <sub>18</sub> H <sub>12</sub>  PM 228.228	10. Criseno, C <sub>18</sub> H <sub>12</sub>  PM 228.228	11. Benzo(b)fluoranteno, C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>  PM 252.309	12. Benzo(k)fluoranteno, C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>  PM 252.309
13. Benzo(a)pireno, C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>  PM 252.309	14. Indeno(1,2,3-cd)pireno, C <sub>22</sub> H <sub>12</sub>  PM 276.331	15. Dibenzo(a,h)antraceno, C <sub>22</sub> H <sub>14</sub>  278.347	16. Benzo(ghi)perileno, C <sub>22</sub> H <sub>12</sub>  PM 276.331

Los HAPs se liberan de la zona de combustión en forma de gas y debido a sus bajas presiones de vapor ( $10^{-6} - 10^{-10}$  mm Hg), la mayoría se condensa inmediatamente sobre partículas de hollín o bien, forman ellos mismos partículas pequeñas que pueden ser transportadas grandes distancias por los vientos (Miranda *et al.*, 2000).

Los hidrocarburos aromáticos son una clase de compuestos orgánicos volátiles (COVs) presentes en la atmósfera y la oxidación química es una importante vía de interacción atmosférica. Las principales especies químicas que inicialmente reaccionan con los compuestos aromáticos en la atmósfera son el radical hidroxilo (OH) y el nitrato (NO<sub>3</sub>) (Calvert *et al.*, 2002).

### 5.6.2 Fuentes de exposición

Los HAPs tienen un origen tanto natural como antropogénico, son producto de la diagénesis de compuestos orgánicos, incendios, erupciones volcánicas y están presentes en el petróleo, el carbón y en depósitos de alquitrán y también como productos de la utilización de combustibles (ya sea en forma de fósil o biomasa). Algunos autores han sugerido que diferentes HAPs pueden ser usados como marcadores de fuentes de emisión (Masclat, 1986; Khalili *et al.*, 1995; Miguel *et al.*, 1998; Simcik *et al.*, 1999; Kulkarni y Venkataraman, 2000) (**Tabla III**).

**Tabla III.** Algunos HAPs considerados como marcadores de fuentes de emisión.

Fuentes	HAPs	Anillos
Emisiones de vehículos a gasolina <sup>b,c,e</sup>	Benzo(j+k)fluorantenos	5
	Benzo (ghi)perileno	6
	Indeno(1,2,3-cd)pireno	6
Emisiones de vehículos a diesel <sup>a,b,e</sup>	Fluoranteno	4
	Criseno	4
	Pireno	4
	Benzo(b)fluoranteno	5
	Benzo(j+k)fluorantenos	5
Combustión de madera <sup>b,e</sup>	Antraceno	3
	Fenantreno	3
	Fluoranteno	4
	Pireno	4
	Reteno	3
Combustión de carbón <sup>b,e</sup>	Antraceno	3
	Fenantreno	3
	Fluoranteno	4
	Pireno	4
	Benzo(a)antraceno	4
Combustión de gas natural <sup>d</sup>	Criseno	4
	Fenantreno	3
	Fluoreno	4
	Benzo(a)antraceno	4

<sup>a-</sup> Masclat, 1986; <sup>b-</sup> Khalili *et al.*, 1995; <sup>c-</sup> Miguel *et al.*, 1998; <sup>d-</sup> Simcik *et al.*, 1999; <sup>e-</sup> Kulkarni y Venkataraman, 2000.

Las concentraciones de los HAPs en la atmósfera varían con la temporada del año y las condiciones meteorológicas. Se han clasificado en tres rubros de acuerdo a su peso molecular: bajo (naftaleno a fluoreno) se encuentran predominantemente en fase gaseosa; mediano (fenantreno a criseno) se encuentran entre la fase gas y sólido; y por último, alto (benzo[b]fluoranteno a benzo[ghi]perileno) están asociados a la fase sólida (Yamasaki *et al.*, 1982; Pankow, 1987). Otra forma de clasificarlos es por el número de anillos, se ha observado que los HAPs que presentan dos o tres anillos se encuentran en la fase de vapor, los de cuatro anillos en fase vapor y

particulada y con más de cinco anillos únicamente en la fase particulada, además, la mayoría están asociados con partículas finas  $< 1 \mu\text{m}$  suspendidas en el aire (Sheu *et al.*, 1997).

Se han identificado más de 500 HAPs en el aire, siendo el más común el benzo[a]pireno, empleado como indicador de la carcinogenicidad en entornos contaminados, su concentración natural en el aire oscila entre  $0.01$  y  $1 \text{ ng m}^{-3}$ , en las zonas urbanas entre  $1$  y  $10 \text{ ng m}^{-3}$  y en el entorno de algunas industrias hasta  $40 \text{ ng m}^{-3}$  (OMS, 2000). El hecho de que los HAPs cancerígenos reaccionen con otras sustancias no significa necesariamente que se inactiven, por el contrario, muchos derivados de los HAPs son carcinógenos más potentes que el compuesto progenitor (Finlayson-Pitts y Jr Pitts, 1986; Miranda *et al.*, 2000).

El tiempo de residencia de los HAPs en la atmósfera depende de varios factores, así como de su transformación química debido a reacciones fotoquímicas, la sorción con otras partículas, la deposición seca y deposición húmeda (Kiss *et al.*, 1998; Huerta, 2011).

### 5.6.3 Efectos en la salud

Debido a sus conocidas propiedades mutagénicas y cancerígenas para los seres humanos los HAPs han sido ampliamente estudiados. Su actividad carcinogénica puede variar en función de la vía de exposición (Li *et al.*, 2006). Algunos de ellos, tienen fuerte actividad carcinogénica (**tabla IV**), particularmente los benzoantracenos en animales y el benzo[a]antraceno en humanos. El benzo[a]pireno, es empleado como indicador de la carcinogenicidad en entornos contaminados. Para otros HAPs no existe evidencia y por ello han sido clasificados como posibles cancerígenos (Amagi *et al.*, 1999; Ohura *et al.*, 2004).

En el aire, se han medido concentraciones de benzo[a]pireno de  $0.1 \text{ ng m}^{-3}$  o menores en zonas no contaminadas y valores hasta varios miles de veces superiores en atmósferas urbanas contaminadas. Este HAP se encuentra en asfaltos, alquitrán de hulla, alquitrán de madera, gases de escape de los automóviles, humo del tabaco, aceites minerales, aceites usados de motores de combustión y de equipos eléctricos (EC, 2004).



**Tabla IV.** Evidencia de carcinogenicidad, de acuerdo a varias agencias reguladoras, de HAPs analizados en animales experimentales y en humanos (modificado de Ibañez, 2008).

HAP	IARC <sup>a</sup>	USEPA <sup>b</sup>	OMS <sup>c</sup>
Naftaleno	2B	D	n.d
Acenaftileno	n.d	D	n.d
Acenafteno	n.d	n.d	n.d
Fluoreno	3	D	n.d
Fenantreno	3	D	(±)
Antraceno	3	D	(-)
Fluoranteno	3	D	(±)
Pireno	3	D	(+)
Benzo[a]antraceno	2A	B2	(+)
Criseno	3	n.d	(+)
Benzo[b]fluoranteno	2B	n.d	(+)
Benzo[k]fluoranteno	2B	n.d	(+)
Benzo[a]pireno	2A	B2	(+)
Indeno[1,2,3-cd]pireno	2B	B2	(+)
Dibenzo[a,h]antraceno	2A	3	(+)
Benzo[ghi]perileno	3	3	(-)

<sup>a</sup>- IARC (1983), <sup>b</sup>- USEPA (1993), <sup>c</sup>- OMS (1998). 2A y 2B, probables carcinógenos para humanos; B2, datos inadecuados en humanos pero suficiente evidencia de carcinogenicidad en animales; 3, no clasificable como carcinógeno en humanos; D, no clasificados (inadecuada evidencia en humanos y animales); estudio en animales: (-), negativos; (+), positivos; (±), cuestionables por el número de estudios limitados en animales; n.d., no documentados.

## 5.7 Metales pesados

### 5.7.1 Propiedades físicas y químicas

Los elementos llamados genéricamente metales pesados, traza u oligoelementos están ubicados en el grupo B (elementos de transición) y en los periodos 4, 5 y 6 de los grupos III y IV del grupo A de la tabla periódica, con densidades mayores a los 4 g cm<sup>-3</sup> (Lavoiser, 2006). A veces se emplea el criterio de densidad, los valores en la bibliografía pueden ir desde 4 g/cm<sup>3</sup> hasta 7 g/cm<sup>3</sup>. Otros criterios empleados son el número atómico y el peso atómico.

Entre los metales están los no esenciales, como Cd y Pb que pueden ser tóxicos a nivel traza, y los elementos biológicamente esenciales como Cu y Zn, que pueden causar efectos tóxicos a elevadas concentraciones (Barrie *et al.*, 1987; Coby *et al.*, 2006; Rodríguez, 2010). Sin embargo, hay una serie de elementos que en alguna de sus formas pueden representar un serio problema medioambiental y es común referirse a ellos con el término general de "metales pesados".

Los metales que están regulados por organismos internacionales y nacionales (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos - EPA por sus siglas en inglés; en México, la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales – SEMARNAT – y la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente - PROFEPA) son: As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Pb, Mo, Ni, V, y Zn (Rodríguez, 2010).

Los metales pueden cambiar su sinergismo o antagonismo en presencia de otros metales y contaminantes (plaguicidas o hidrocarburos de petróleo), debido a que su distribución y concentración en el ambiente son regulados por factores físico-químicos como temperatura, potencial redox, pH, oxígeno disuelto, salinidad o materia orgánica, entre otros (Calderón, 2005).

### **5.7.2 Fuentes de exposición**

Las actividades domésticas e industriales han aumentado los niveles de metales en el ambiente. Esto es resultado de perturbaciones originadas por las actividades humanas como los efluentes industriales, las descargas residuales, los residuos fertilizantes y la combustión de combustible fósiles. También influyen los fenómenos geológicos, que son los principales procesos responsables del incremento de los metales en el ambiente (Mason y Moore, 1994). En la **Tabla V** se presenta una estimación de la importancia relativa que tiene el aporte de contaminantes por diferentes fuentes de contaminación. En ella se considera que los principales aportes de contaminación por metales pesados son las descargas industriales, seguidas gradualmente de la combustión y los derrames de combustible fósiles (Valette-Silver, 1993). La mayoría de los elementos se introducen en la atmósfera en forma de aerosoles y después de viajar a cierta distancia se depositan por gravedad y/o son captados por la humedad en forma de lluvia o niebla, tanto en la zona emisoras como las remotas (Yang *et al.*, 2000, Fang *et al.*, 2004; Báez *et al.*, 2006). En este caso, se sabe que existen determinados metales traza asociados a las partículas en la precipitación pluvial (Keeler *et al.*, 1995).

Los seres humanos pueden tener contacto con los metales pesados tóxicos por múltiples conductos. De forma directa estos pueden llegar a los alimentos procedentes de diversos orígenes, como son los suelos de cultivo, aguas, fertilizantes, altas concentraciones en el aire cerca de las fuentes de emisión, o bien proceder de los contenedores y utensilios empleados en la fabricación, almacenamiento y preparación de los alimentos (Vidal, 2004).

La inadecuada disposición de residuos metálicos, surgidas de procesos industriales, tales como la industria metalúrgica y la industria química, ocasionan la contaminación de suelos, agua superficial y subterránea. Una gran variedad de aguas residuales, contienen metales pesados en solución, a

menudo estas aguas se descargan en el sistema de alcantarillado municipal y federal (Nriagu y Pacyna, 1988; Durán de Bazúa, 1994; Díaz-Báez *et al.*, 2000).

**Tabla V.** Emisiones en teragramos (Tg) de contaminantes atmosféricos en los Estados Unidos (Valette-Silver, 1993; García, 2007).

Fuente	Emisiones estimadas (Tg/año)
<b>Combustión de combustible y procesos industriales</b>	15
Emisiones de partículas fugitivas de procesos industriales	5.3
Fuentes fugitivas no industriales (polvo, erosión eólica, etc.)	115-47
Fuentes móviles	2.5
<b>Polvos</b>	50-250
Incendios forestales	1-50
Sal marina	300
Emisiones volcánicas	25-150
<b>Partículas formadas a partir de emisiones gaseosas (H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub> y HC)</b>	345-1100

### 5.7.3 Efectos en la salud

A diferencia de otras sustancias como los plaguicidas y los radioisótopos artificiales, los metales pesados se presentan de manera natural en el ambiente en concentraciones del orden de partes por millón (mg/kg) y partes por billón (µg/kg). El problema surge cuando algunos de los elementos que a concentraciones naturales son benéficos o inocuos, exceden sus concentraciones naturales como producto de las actividades antropogénicas o naturales, convirtiéndose en elementos altamente peligrosos para los organismos. La prolongada presencia de metales, especialmente en un ambiente urbano y su proximidad a la población humana puede amplificar significativamente la exposición de los habitantes a los metales vía inhalación, ingestión y contacto dérmico (Calderón *et al.*, 2001; Wrong *et al.*, 2006). La exposición del humano a especies químicas por ejemplo a la alta movilidad del Cr<sup>VI</sup> puede causar cáncer de pulmón, enfermedades crónicas de las vías respiratorias y del aparato digestivo (Rodríguez, 2010).

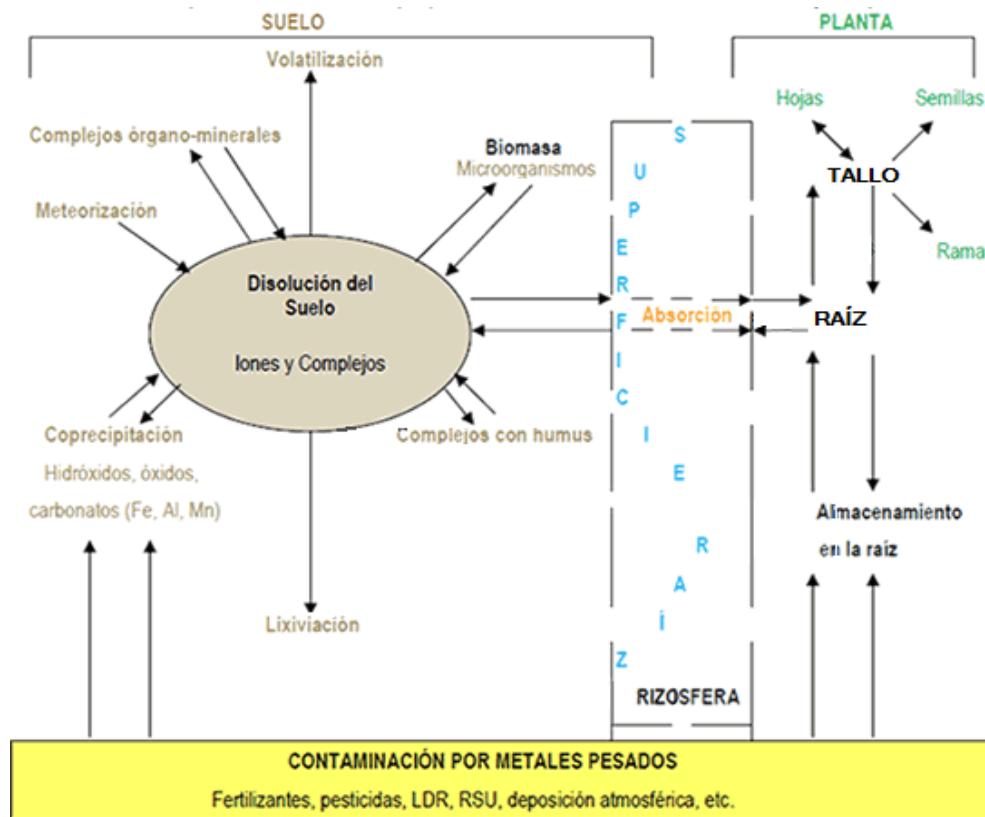
De acuerdo a un estudio desarrollado por Schneider y colaboradores (1985) los metales esenciales son aquellos cuya concentración permanece aproximadamente constante en el organismo y que al disminuir ocurren deficiencias fisiológicas, estas se corrigen cuando se recupera el nivel original; entre estos elementos se encuentra el Mn, Co, Cu y Zn.

Los oligoelementos benéficos son los que si están presentes en concentraciones adecuadas, permiten una actividad fisiológica normal en los organismos, pero si su biodisponibilidad en el ambiente y por ende su concentración en los tejidos del organismo es inferior al requerimiento metabólico del espécimen, limita la actividad fisiológica pero el organismo sobrevive, entre este tipo de elementos se incluyen  $\text{Cr}^{\text{III}}$  y  $\text{Ni}^{2+}$ .

Por otro lado, el Cd y el Pb no forman parte de los organismos vivos y siempre representan un peligro (Tovar, 2000). Los metales tóxicos también comprenden a los metales esenciales y benéficos, pero cuando sus concentraciones son elevadas, y exceden de 40 a 200 veces los requerimientos naturales de un organismo llegan a ser tóxicos, con efectos subletales y letales en los organismos, en función de otros factores ambientales y biológicos (Venugopal y Luckey, 1975).

#### **5.7.4 Movilidad en suelos**

La entrada de metales pesados en el aire, agua y suelo, y su posterior traslado de éste a las plantas, en última instancia, puede tener efectos adversos significativos biológicos y ecológicos. La movilidad de los metales pesados en el suelo depende de las condiciones de: potencial redox, pH, textura, cantidad de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico y la interacción con otros constituyentes de la solución y propiedades físicas; así como de las plantas y el aporte de contaminantes (Haiyan W. y A. O. Stuanes, 2003). Todos estos factores contribuyen a que la concentración de metales se vea sujeta a una alta variabilidad tanto temporal como espacial (**Figura 3**).



**Figura 3.** Factores que influyen en la movilidad de los metales pesado del suelo.

El pH influye en las reacciones de adsorción/desorción y precipitación/solubilización de los metales. El pH de la solución del suelo y de los grupos funcionales afecta la ionización y sitios de adsorción sobre la superficie mineral, determinando la retención o la liberación de los metales. En general, la disminución del pH, provoca un aumento en la solubilidad de la mayoría de los metales y por lo tanto en su biodisponibilidad. Sin embargo, existen cationes como el As, que a pH alcalinos, tienen mayor solubilidad y por lo tanto mayor movilidad (Tack, 1996).

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es la propiedad de los minerales de arcilla y la materia orgánica coloidal para adsorber cationes de la fase líquida del suelo, desadsorbiendo al mismo tiempo cantidades equivalentes de otros cationes, la cual a su vez se ve influenciada por el pH del sustrato.

La materia orgánica del suelo tiende a adsorber los iones de los metales vía la formación de complejos y también incrementa la CIC. Al igual que las reacciones de hidrólisis, las reacciones de complejación son reacciones pH dependientes y pueden correlacionarse con el tamaño y carga de los cationes (Muguía, 2008).

## 5.8 Azoteas verdes

Una azotea verde se puede definir como cualquier construcción en la superficie de un techo que ha sido cubierta con suelo y plantas. Imitan a los ecosistemas naturales para proporcionar algunos servicios ecosistémicos (Oberndorfer *et al.*, 2007).

Las azoteas verdes se dividen en dos tipos principalmente: extensivas e intensivas dependiendo del material vegetal y principalmente la planeación del uso al que se destina. En ambos tipos de azoteas se colocan varias capas de diversos materiales, que se pueden resumir en 3: impermeabilizante, malla geotextil o anti-raíz y sustrato (**Figura 4**).



**Figura 4.** Capas de construcción típicas de una azotea verde

Las azoteas verdes intensivas reciben su nombre debido a que requieren de un “intenso” y continuo mantenimiento; están diseñadas para ser similares a los paisajes encontrados al nivel del suelo natural, suelen utilizar una gran variedad de especies de plantas que pueden incluir árboles y arbustos, por lo tanto, requieren capas de sustrato más profundas (generalmente > 15,2 cm). Debido a que son áreas accesibles al público, por lo general se limitan a superficies planas (Getter y Rowe, 2006; Oberndorfer *et al.*, 2007).

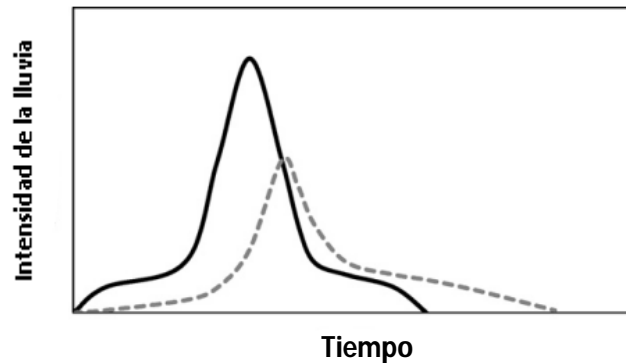
Por otra parte, las azoteas verdes extensivas generalmente requieren un mantenimiento mínimo, normalmente no son accesibles al público y pueden incluso no ser visibles ya que se ubican en los techos. Debido a la menor profundidad del sustrato (<15.2 cm), las especies vegetales se limitan a

hierbas, pastos, musgos y suculentas como *Sedum* que son tolerantes a la sequía, por lo tanto estas azoteas pueden ser construidas en superficies inclinadas (Getter y Rowe, 2006; Oberndorfer *et al.*, 2007). En la mayoría de los casos se plantan especies crasuláceas, principalmente de las familias Crassulaceae, Cactaceae y Agavaceae, ya que por sus características xerófitas no requieren de regadío, su desarrollo y ciclo de vida es acorde a las condiciones de precipitación y temperatura, y por ello llegan a ser autosostenibles (Jerónimo Reyes, com. pers.)

### 5.8.1 Servicios ecosistémicos

La adición de suelo y vegetación a la superficie del techo para construir una AVE puede reducir algunos efectos negativos de los edificios sobre los ecosistemas locales, como el consumo de energía, el efecto “isla de calor urbano”, el volumen de escorrentía en la infraestructura urbana; pueden aumentar el aislamiento acústico, la resistencia a incendios, la longevidad de la membrana del techo; proveen un espacio verde de recreo y mejoran la calidad del aire. Los beneficios ambientales proporcionados por las AVE se derivan de su funcionamiento como ecosistemas (Czemiel *et al.*, 2006; Getter y Rowe, 2006; Oberndorfer *et al.*, 2007). La implementación de azoteas verdes para la gestión de aguas pluviales ha demostrado ser una herramienta eficaz en zonas altamente urbanizadas (Center for the Advancement of green roof technology, 2005; Mentens *et al.*, 2005; Carter y Jackson, 2007).

En general, la tasa y calidad del agua de escorrentía de las azoteas verdes depende del sistema que se emplee (extensiva o intensiva), la infraestructura, edad del edificio y la pendiente del techo, tipo de entorno (industrial, residencial o comercial), condiciones climáticas y patrones de lluvia (Mentens *et al.*, 2005; VanWoert *et al.*, 2005; Czemiel *et al.*, 2006; Carter y Jackson, 2007). Aunque las azoteas verdes pueden reducir la escorrentía (**Figura 5**), no resuelven el problema de la reducción de la recarga de las aguas subterráneas ni los problemas de calidad del agua en las zonas urbanas (Oberndorfer *et al.*, 2007).



**Figura 5.** Ejemplo de la escorrentía de una azotea verde (línea punteada) generada por un evento de lluvia dado (línea negra) (Berndtsson, 2010).

### 5.8.2 Estudios de caso

En julio de 1999, México construye el primer prototipo en la azotea del edificio del Área de Colecciones del Jardín Botánico de la UNAM bajo el patrocinio del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) denominado CORENA-BID, como una extensión de la Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal y bajo la coordinación del Biól. Jerónimo Reyes (Reyes, 2009).

En cuanto a la investigación realizada hasta el momento sobre la dinámica del agua en un sistema de azotea verde extensiva, se ha reportado lo siguiente:

- Sobre la calidad hidrológica y del agua en azoteas verdes, se concluye que éstas retienen una cantidad significativa de agua, y que su lixiviación ocurre en este tipo de sistemas (Moran *et al.*, 2005).
- Sobre la escorrentía total anual, se ha reportado que las azoteas verdes pueden reducirla considerablemente, los valores varían de acuerdo a diferentes autores: de 60% a 79% (Oberndorfer *et al.*, 2007), 85% máximo (Moran *et al.*, 2003) y 88.8 % (Getter *et al.*, 2007).
- Acerca de la profundidad del sustrato y pendiente de los techos, varios autores coinciden en que: el total de la escorrentía es mayor en azoteas que tienen una menor cantidad de sustrato y pendientes más pronunciadas (Mentens *et al.*, 2005; Villarreal y Bengtsson, 2005).
- Se sugiere que el principal factor para la retención de agua son las propiedades físicas del sustrato (VanWoert *et al.*, 2005).
- Se ha demostrado que la implementación de azoteas verdes para la gestión de aguas pluviales es una herramienta eficaz en zonas altamente urbanizadas (Carter y Jackson, 2007; Center for the Advancement of green roof technology, 2005; Mentens *et al.*, 2005).



- Respecto al aumento en el promedio de pH del agua de lluvia durante su paso por la azotea verde intensiva, éste indica la rápida neutralización de las deposiciones ácidas. En general, las azoteas verdes no tienen efectos perjudiciales sobre la calidad de la escorrentía urbana (Czemiel *et al.*, 2009).
- Van Seters y colaboradores (2009) han reportado en muestras de escorrentía de una AVE pH, sólidos suspendidos totales, metales, nutrientes, bacterias, y HAPs. Las cargas de la mayoría de los químicos fueron relativamente bajos para la azotea verde a comparación con el techo convencional, con excepción del Ca, Mg y P total.
- Steusloff (1998) modeló la capacidad de retención de una AVE para metales pesados y reportó valores de retención para Cu, Zn, Cd y Pb de 97%, 96%, 92% y 99% respectivamente, durante el verano; y 34%, 72%, 62% y 91% durante el invierno. Señala que de manera similar a los contaminantes del aire, el crecimiento activo de las plantas puede influenciar la calidad del agua de escorrentía.
- Se ha demostrado que los materiales convencionales de los techos pueden ser fuente de metales pesados en la escorrentía (Förster, 1996; Chang *et al.*, 2004; Göbel *et al.*, 2007) y que los sistemas de azoteas verdes tienen la capacidad de retener contaminantes de la lluvia (Kölher *et al.*, 2002; Berndtsson *et al.*, 2006; Berndtsson *et al.*, 2009).
- Para los contaminantes inorgánicos, tales como los metales pesados, la profundidad de sustrato podría aumentar el tiempo de retención de los solutos en las azoteas verdes, proporcionando una mayor oportunidad para que los elementos se absorban o retengan en el sustrato o las capas de la éstas, reduciendo su movilidad (Alsup *et al.*, 2011). También se permite que las plantas retrasen la lixiviación de los contaminantes.

## 5.9 Características de la Zona Metropolitana del Valle de México

La Zona Metropolitana del Valle de México tiene aproximadamente 3,500 km<sup>2</sup> de superficie, de los cuales 1,500 km<sup>2</sup> están completamente urbanizados (Lafragua *et al.*, 2003). La zona urbana se extiende en una cuenca endorreica a una altura promedio de 2,240 msnm rodeada por un entorno montañoso que constituye una barrera natural que dificulta la libre circulación del viento y dispersión de los contaminantes (Calderón, 2004). La ZMVM tiene 23,103 086 millones de habitantes, 54,326 industrias y 3,3 millones de vehículos matriculados (INEGI, 2010).

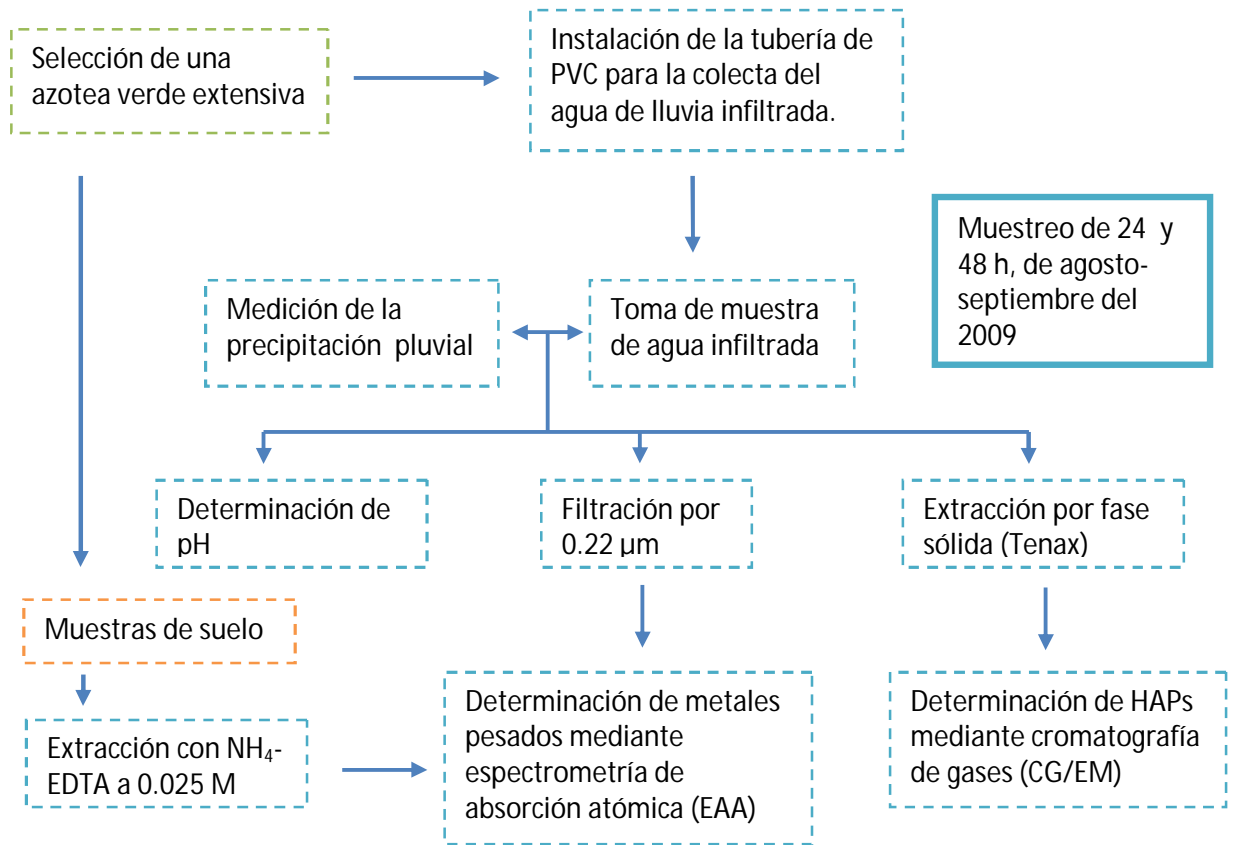
El clima en la Ciudad de México lo rigen dos corrientes regionales a gran escala: los vientos predominantemente secos del oeste, los cuales llegan a México durante el invierno y primavera y



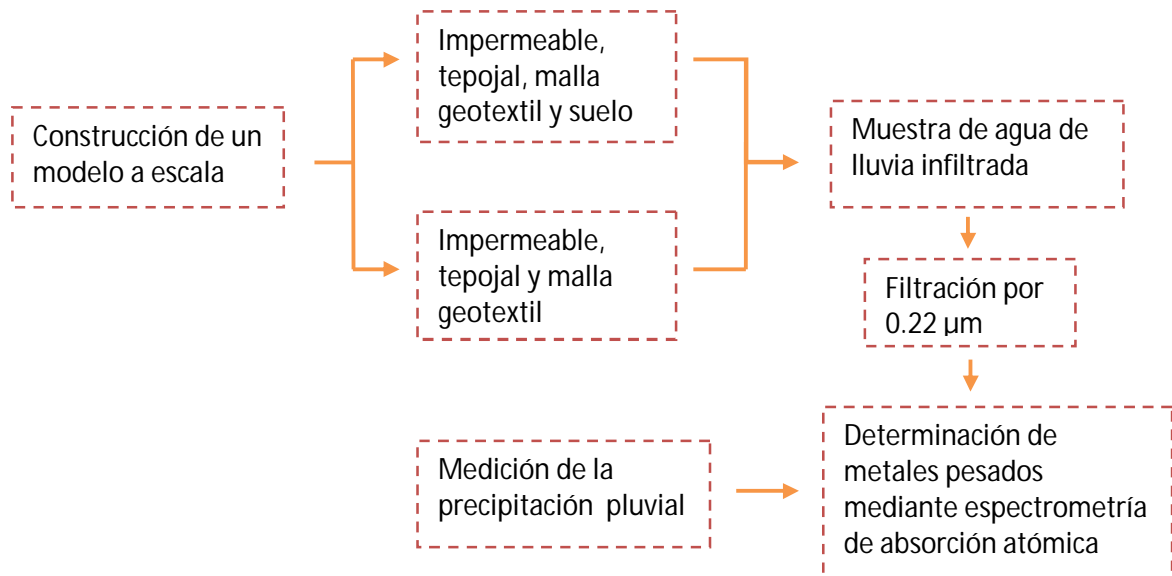
El clima de la zona es templado sub-húmedo con lluvia en verano Cb (w1) (w) (i') g [Cb(w 1 )w]) (Castillo-Argüello *et al.*, 2004). Topográficamente la reserva se localiza entre las isotermas de 15.3°C y 15.6°C y entre las isoyetas de 814.7 mm y 952.7 mm, con un promedio de 870.2 mm al año (REPSA: página en red, 2001). El patrón de precipitación presenta una estacionalidad muy marcada: las lluvias se presentan de junio a octubre, mientras que la temporada de secas abarca los meses de noviembre a mayo y la temperatura promedio anual es de 14 a 15°C (REPSA, 2001; Flores, 2006). El ecosistema predominante de la REPSA es el matorral xerófilo, en el que domina una flora propia denominada por Rzedowski (1978) *Senecionetum praecocis*, un matorral de de *Senecio praecox* (Asteraceae; nombre común palo loco).

La delegación Coyoacán, cuenta con una superficie de 340 071 km<sup>2</sup>, siendo la más extensa del Distrito Federal, sin embargo el 80% de su territorio es rural, con una población de 650,567 habitantes (INEGI, 2010).

## 6. Método



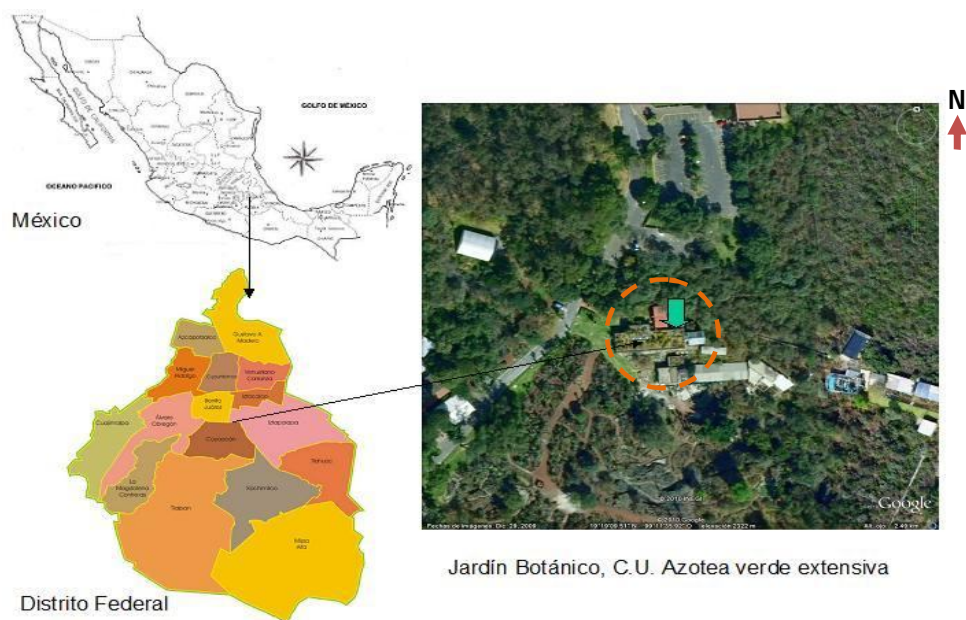
Muestreo de 24 y 48 h



## 6.1 Área de estudio

Se localiza en el Jardín Botánico de la UNAM, dentro de la REPSA y fue creada en 1959. Se localiza al sur de la ciudad de México, entre los paralelos 19°13'45" y 19°20'23" latitud norte y los meridianos 99°19'37" de longitud oeste a una altitud de 2330 msnm., y cuenta con un clima templado con lluvias en verano (Hernández, 1990). Las temperaturas más elevadas ocurren en marzo, abril y mayo (16-19°C); las temperaturas frías en diciembre, enero y febrero (12-14°C). La temperatura media anual es de 15.5 °C, pero hay variaciones extremas, desde -6°C hasta 34.6°C (Flores, 2006).

El estudio se realizó en un área de azotea verde extensiva con 10 años de antigüedad localizada en edificio principal de colecciones del Jardín Botánico perteneciente al Instituto de Biología de la UNAM (Figura 7).

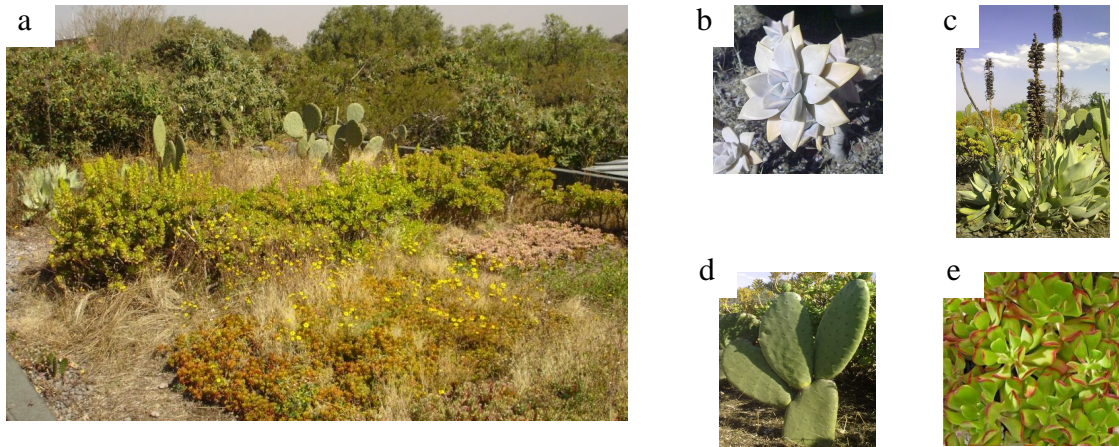


**Figura 7.** Ubicación del sitio de estudio en la República Mexicana.

### 6.1.1 Azotea verde extensiva

El área mide 32 m<sup>2</sup> y tiene la siguiente infraestructura: techo nivelado de cemento con muros perimetrales de 10 cm de alto, impermeabilizado, carpetas asfálticas selladas, malla anti-raíz y por último el sustrato de 6 cm de profundidad, compuesto de tepojal, fibra de coco y composta. El tepojal facilita el drenaje dentro del sistema mientras que la fibra de coco hace más ligero el

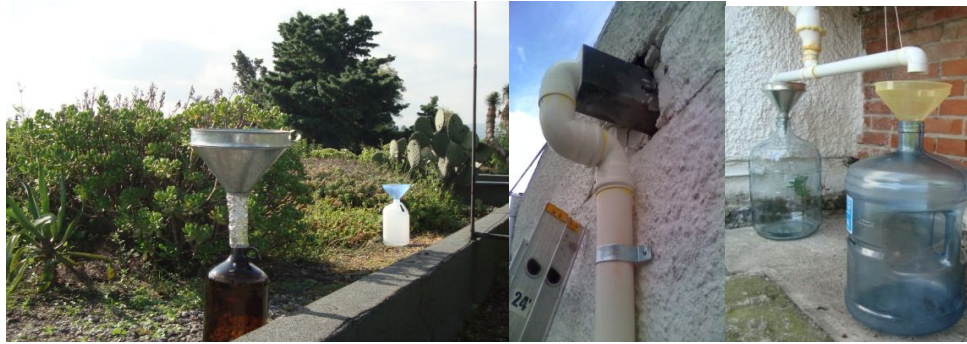
sistema para el edificio que lo soporta. Las especies plantadas en la azotea verde extensiva fueron: *Sedum dendroideum*, *Sedum moranense*, *Sedum acre*, *Sedum reflexum*, *Echeveria* sp., *Agave celsii*, *Mammillaria* sp., *Opuntia robusta* y *Opuntia tomentosa* (Jerónimo Reyes, com. pers.) (**Figura 8**).



**Figura 8.** Fotografía de la azotea verde extensiva en el Jardín Botánico de la UNAM (a) y algunas especies.: (b) *Echeveria* sp., (c) *Agave celsii*, (d) *Opuntia tomentosa* y (e) *Sedum dendroideum*.

## 6.2 Sistema de recolección de agua de lluvia e infiltrada

La tubería original se sustituyó por una de PVC para evitar interferencias en la lectura de algunos metales en este estudio. El sistema de recolección de agua de lluvia en la azotea consistió en 2 botellas de 4 L, una de vidrio color ámbar (evitando la degradación por fotólisis) para HAPs y otro de plástico para metales pesados, cada uno con su respectivo embudo de lámina galvanizada y plástico. Mientras que en la salida de la tubería se colocó un par de garrafones con capacidad de 20 L cada uno para la colecta del agua infiltrada, uno de vidrio para HAPs y otro de plástico para los metales pesados, como se observa en la **Figura 9**.



**Figura 9.** Sistema para la captura de agua de lluvia. Izquierda: para la de la azotea verde; en medio: tubería para el agua infiltrada; derecha: captura de agua infiltrada. Los envases de plástico se utilizaron para el análisis de los de metales pesados y los de vidrio para HAPs.

### 6.3 Modelo escala

El modelo a escala se diseñó con la finalidad de conocer si el material de soporte de la AVE retiene o aporta metales pesados de la lluvia, por lo que la estructura presenta las mismas características que ésta: malla geotextil, tepojal y fibra de coco. Mide 1.63 m de largo y 40 cm de ancho y se colocó a una altura de 1 m del suelo. Se dividió en dos segmentos para facilitar el estudio y análisis de las muestras (**Figura 10**). Se colocó a un costado de la zona de muestreo (AVE), con el objetivo de mantener las condiciones constantes.

Una sección del modelo sólo tuvo los materiales de soporte, y en otra materiales más sustrato (tierra y composta). A cada sección se le hizo un orificio para el desagüe y se le colocó tubería PVC para conducir el agua a los respectivos contenedores. Se realizaron cuatro muestreos (de lluvia, de agua infiltrada de la AVE, y una muestra infiltrada de cada segmento del modelo) por evento de 24 h y 48 h, que fueron analizadas para metales pesados por Espectrometría de Absorción Atómica (EAA).





**Figura 10.** Modelo a escala ubicado en la azotea verde estudiada. A la derecha (a), modelo con material de soporte y (b) con material y sustrato. Izquierda, modelo escala, tubería PVC y envases de captura de agua infiltrada para el análisis de metales pesados.

#### 6.4 Colección de las muestras

El muestreo se realizó durante los meses de agosto y septiembre de 2009, que abarca la temporada de lluvias (Mayo a Octubre). De lunes a sábado se recolectó agua en episodios de 24 horas, y de sábado a lunes de 48 horas. En junio de 2010 se realizó el muestro del modelo escala y suelo. Registrando los siguientes parámetros:

- Precipitación (volumen).
- Infiltración (volumen).
- pH: se midió tanto en la muestra de lluvia como en la infiltrada por medio de un potenciómetro.
- Suelo: Se trazó una cuadrícula de 6x4 en el techo y se dividió en dos segmentos, A y B, de forma que cada lado tuviera 12 cuadros. En donde "A" contiene *Echeveria* sp., *Agave celsii* y *Opuntia tomentosa* y "B" contiene *Sedum dendroideum*. De cada cuadro se extrajo una muestra de suelo de 1 m<sup>2</sup> para cuantificar metales pesados.
- Modelo escala: se ubicaron dos contenedores, uno en cada sección del modelo para la determinación de metales pesados solamente.
- HAPs y metales pesados

Para la determinación de HAPs y metales pesados, se eligieron 12 eventos de precipitación: aquellos de los que se tuviera la suficiente cantidad de muestra para los análisis y además, los datos del volumen de agua de lluvia e infiltrada con el objetivo de comparar su presencia y concentración. Las muestras se refrigeraron para su conservación a 4°C hasta su tratamiento.



Es importante puntualizar que cada toma de datos constituye un evento por día de lluvia, ya que los resultados serán reportados como precipitación, infiltración, pH, presencia de HAPs y metales pesados por episodio.

## **6.5 Tratamiento de las muestras**

Previo a su determinación, las muestras de lluvia se filtraron con filtros de fibra de vidrio Millipore de tamaño de poro de 1.5  $\mu\text{m}$  en un matraz kitazato conectado a una bomba de vacío para eliminar las partículas suspendidas y determinar los HAPs disueltos. Los HAPs se extrajeron en fase sólida utilizando como material adsorbente Tenax TA 60/80 Supelco, que ha demostrado ser muy eficiente para su recuperación en muestras de lluvia (Pankow *et al.*, 1982; Ligocki *et al.*, 1985). Una vez agregado el Tenax TA, las muestras se agitaron por 25 h y previo a su determinación por CG/EM las muestras se filtraron, posteriormente se extrajo el Tenax y se agitó con una mezcla de los siguientes disolventes: hexano:diclorometano:acetona (grado cromatográfico) en una relación 50:35:15 v/v. Para la recuperación de los analitos del Tenax la mezcla se agitó por 45 min con variaciones en la velocidad del agitador Vortex. Se recuperó el disolvente y agregó  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  anhidro (tratado térmicamente a 560°C toda la noche). Finalmente se evapora la mezcla de disolventes con  $\text{N}_2$  ultra puro y se concentra a 500  $\mu\text{L}$  para inyectar 1 $\mu\text{L}$  al CG/EM (Huerta, 2011).

Las muestras de agua para la determinación de metales pesados se filtraron con un filtro de 0.22  $\mu\text{m}$ , se estabilizaron con ácido nítrico y fueron guardadas en refrigeración a 4°C antes de su análisis.

En cuanto a las muestras de suelo, una vez colectadas se secaron en el horno a 60°C y se pasaron por un tamiz de acero inoxidable con amplitud de malla menor de 2 mm de diámetro. A 1 g de suelo se le agregaron 25 mL de 0.025M  $\text{NH}_4$ -EDTA para extraer los metales pesados inmediatamente disponibles, se agitó 90 min y centrifugó durante 15 min a 2500rpm, el sobrenadante se filtró con papel filtro Whatman No. 40.

El proceso requiere que el material sea lavado con varios materiales, lo cual se indica en el anexo 2.

## 6.6 Análisis Químico

### 6.6.1 Análisis cromatográfico de los HAPs

Las muestras de lluvia se analizaron con un Cromatógrafo de Gases acoplado a un Espectrómetro de Masas (CG/EM) modelo HP G1800C GCD Serie II, 16 HAPs, los cuales se agrupan de acuerdo a su peso molecular y la fase en la que se encuentren: naftaleno, acenafteno, acenaftileno, fluoreno, (bajo peso molecular, fase gaseosa); fenantreno, fluoranteno, pireno (mediano peso molecular, fase sólido-gaseosa) y criseno, benzo[a]pireno, benzoantraceno, antraceno, benzo[b]fluoranteno, benzo[k]fluoranteno, indeno[123-cd]pireno, dibenzo[ah]antraceno, benzo[ghi]perileno (alto peso molecular, fase sólida). Todas las muestras se analizaron en modo de monitoreo de ion selectivo (SIM, por sus siglas en inglés) bajo las condiciones descritas en la **Tabla VI**.

**Tabla VI.** Condiciones de operación para el CG/EM (Páez Bristrain Rosaura, 2007).

<b>Detector</b>	<b>Espectrómetro de masas (cuadrupolo)</b>
<b>Columna</b>	DB5 Agilent 30m de longitud y 0.25 mm de diámetro interno
<b>Programa de temperaturas</b>	Temperatura inicial 70°C Rampa de temperaturas: 8 °C/min hasta 180°C 5°C/min hasta 235 °C 2°C/min hasta 300°C y se mantuvo por 5 min
<b>Temperatura del inyector Y línea de transferencia</b>	320°C
<b>Tiempo de la corrida</b>	63 min
<b>Gas</b>	Helio (1mL/min)
<b>Intervalo de masas</b>	45-450 m/z

Para confirmar que efectivamente se detectan los compuestos de interés, se inyectó en el CG/EM una solución de un estándar certificado a una concentración de 600 ppb; el cual contenía los 16 HAPs. Las características son: mezcla de los 16 HAPs, a una concentración de 2000 ppm en una mezcla de disolventes (benceno:diclorometano 50:50 v/v), de la marca ChemService.

### 6.6.2. Análisis de los metales pesados por Espectrometría de Absorción Atómica.

En las muestras de lluvia y suelo se analizaron siete metales pesados: cadmio, níquel, manganeso, plomo, cobalto, cromo y zinc (sólo lluvia) con un Espectrómetro de Absorción Atómica por la técnica de Horno de Grafito (EAA-HG), utilizando un equipo Perkin-Elmer AAnalyst™ 800 con una lámpara de cátodo hueco de Cd, Ni, Mn, Pb, Co, Cr y Zn respectivamente; y Zn en suelo por la técnica de Flama.

## 6.7 Análisis estadístico

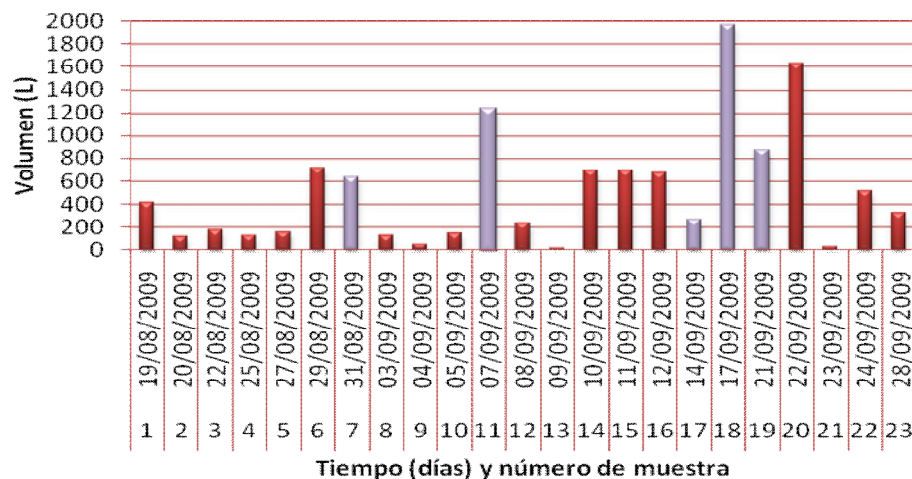
Se realizaron pruebas "t" de Student para conocer las posibles diferencias significativas de las medias entre el pH, las concentraciones de HAPs y metales pesados en el agua de lluvia e infiltrada, ANOVA para determinar las diferencias entre los metales pesados con un nivel de significancia  $p < 0.05$ , utilizando Excel y el paquete de cómputo Statgraphics Centurion (StatPoint Technologies, Inc.EUA).

También se realizaron pruebas de correlación entre la precipitación y la concentración de HAPs y metales pesados, utilizando Excel Microsoft Office (versión Vista).

## 7. Resultados y discusión

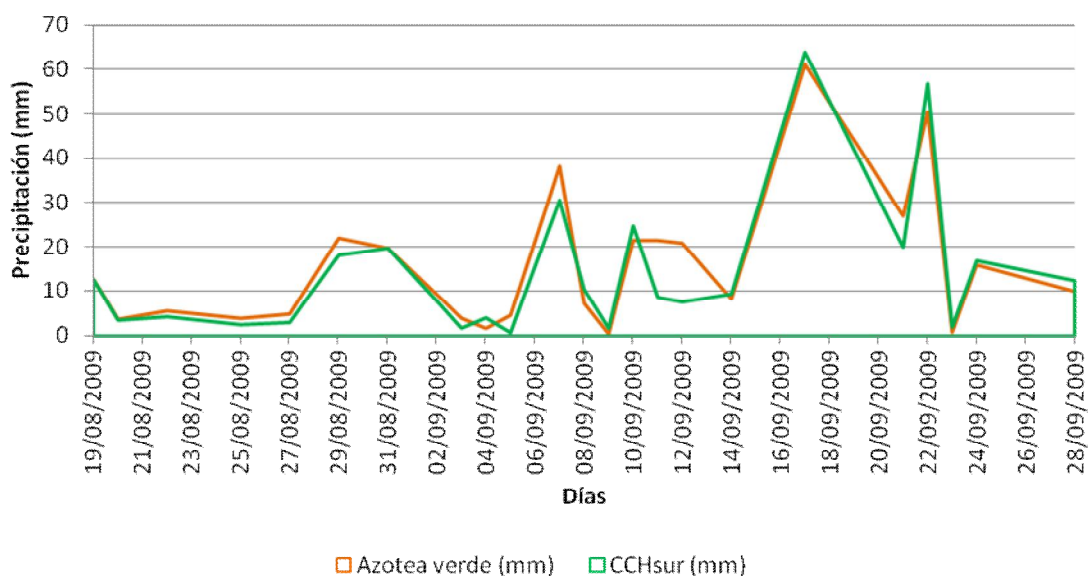
### 7.1 Precipitación pluvial

Antes de explicar los resultados, es importante aclarar que la fecha de los eventos se refiere al día en que se recogió la muestra de la lluvia (entre 7:30 a.m. y 10:30 a.m.), es decir, del día siguiente a la lluvia, e inmediatamente se hacía el cambio de recipientes. Con los datos de precipitación recolectados, se calculó el total de precipitación (L) en el área de la AVE, los cuales se registraron en eventos de 24 y 48 horas, destacándose que los episodios en los que se obtuvo mayor volumen fueron los de 48 h, excepto en la muestra del 22 de septiembre que fue de 24 h. La **Figura 11** muestra el volumen (L) de agua de lluvia que cayó por evento en toda la AVE (32 m<sup>2</sup>). También se observa en los eventos de 48 h que las muestras 7 y 17 tuvieron un volumen similar al de los de 24 h.



**Figura 11.** Volumen de precipitación en el área total de la azotea verde extensiva. Morado: eventos de 48 h; rojo eventos de 24 h.

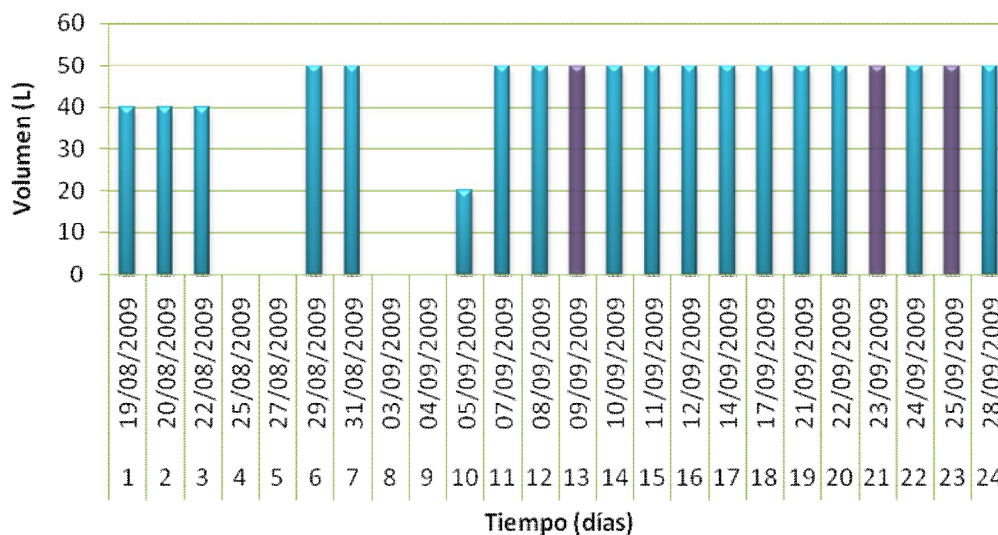
En la **Figura 12** se presenta la comparación entre la precipitación colectada en la azotea verde extensiva y la Estación Meteorológica del CCH-Sur durante agosto y septiembre del 2009. Se observa que existe una gran similitud entre ambos registros, lo que comprueba la efectividad del método empleado. Las pequeñas variaciones pueden deberse a varios parámetros como la dirección del viento, el tiempo climático, la radiación solar y la temperatura, entre otros. Sin embargo el más significativo es el tiempo de exposición de las muestras al ambiente una vez pasado el evento de lluvia, ya que ocurre evaporación.



**Figura 12.** Comparación del volumen de precipitación capturada en la azotea verde del Jardín Botánico y el registrado por la Estación Meteorológica del CCH-Sur en litro por metro cuadrado (mm).

## 7.2 Agua infiltrada

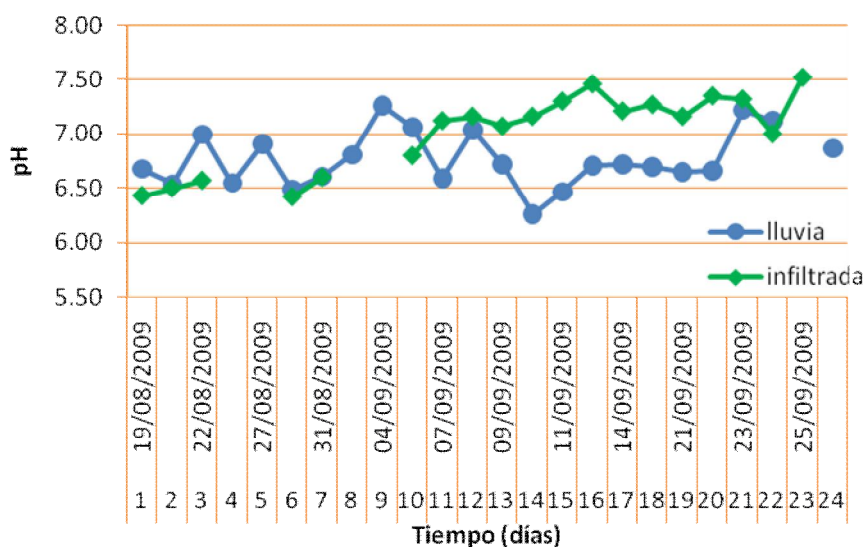
En eventos en los que el volumen total de lluvia en la azotea fue  $\leq 158.97$  L, se registró una escorrentía menor a los 40 L o nula, excepto en tres ocasiones (9, 23 y 25 de septiembre) en que los episodios de lluvias ocurrieron en días continuos, por lo que sí se registró escorrentía (se marcan en color morado en la **Figura 13**).



**Figura 13.** Volumen de infiltración por evento (L). En azul se marcan los eventos en que llovió y en morado aquellos en los que no, pero ocurrió escorrentía.

### 7.3 Valores de pH

Los valores de pH en las muestras de lluvia e infiltrada indican una ligera tendencia a valores neutros en el agua infiltrada, lo que se manifiesta más en el mes de septiembre. Los resultados concuerdan con lo reportado por Czemieli y colaboradores (2009) respecto a que hay neutralización de deposiciones ácidas. (**Figura 14**). Se encontraron diferencias significativas entre el pH de la lluvia e infiltrada ( $p < 0.05$ ).



**Figura 14.** pH del agua de precipitación e infiltrada.

#### 7.4 Determinación de los eventos para el análisis de HAPs y metales pesados en agua de lluvia e infiltrada.

Se eligieron 12 muestras (**Figura 15**) para analizar metales pesados y HAPs, en los cuales no tuviéramos eventos sucesivos y si los hubiera como es el caso de las muestras del 7 al 8 de Septiembre y del 10 al 11 de Septiembre.



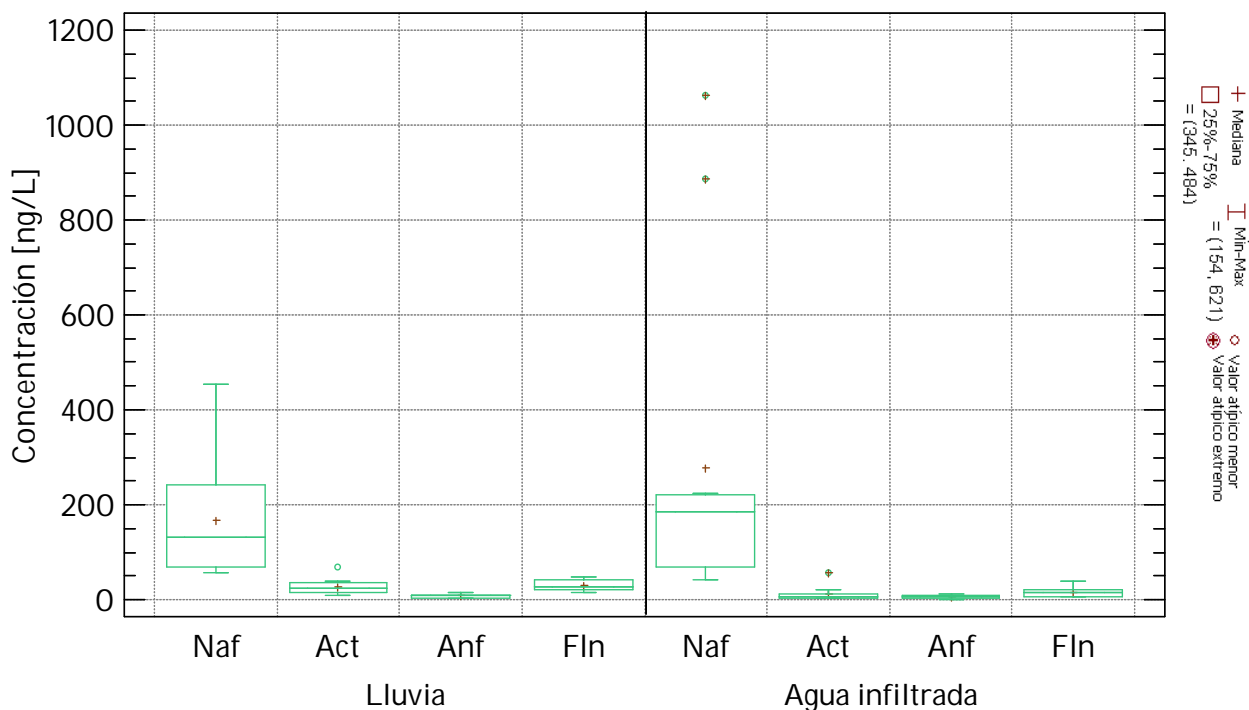
**Figura 15.** Eventos para el análisis fisicoquímico

#### 7.5 Concentración de los Hidrocarburos aromáticos policíclicos

##### 7.5.1 Bajo peso molecular

Como se mencionó previamente, los HAPs en la atmósfera se han clasificado de acuerdo a su peso molecular (Yamasaki *et al.*, 1982; Pankow, 1987), y están asociados a la fase gaseosa, sólido-gaseosa y sólida (bajo, medio y alto peso molecular, respectivamente). De acuerdo a este criterio se clasificaron los datos de la concentración de los HAPs. En las **figura 16** se observa el diagrama de caja (Box and Whisker Plot) que se realizó con base en la media de las concentraciones de los HAPs. Aunque todos los HAPs son compuestos poco solubles en agua, los que se encuentran en fase gaseosa son los menos insolubles, lo que permite a estos compuestos unirse con el polvo u otras partículas de la atmósfera y es más fácil encontrarlos en la lluvia. Se detectó que el naftaleno fue el compuesto con mayor concentración en el agua infiltrada. El naftaleno superó la concentración del agua de lluvia en 6 muestras de agua infiltrada, lo cual puede ser causa de varios factores, desde las características de contaminación de la zona de estudios, incluyendo los

agentes que lo liberan, las partículas atmosféricas, hasta el volumen de precipitación, el tiempo atmosférico, el pH de la lluvia y suelo. La concentración del acenaftileno, acenafteno y fluoreno en agua infiltrada no supera el agua de lluvia. Existen diferencias significativas ( $p < 0.05$ ).

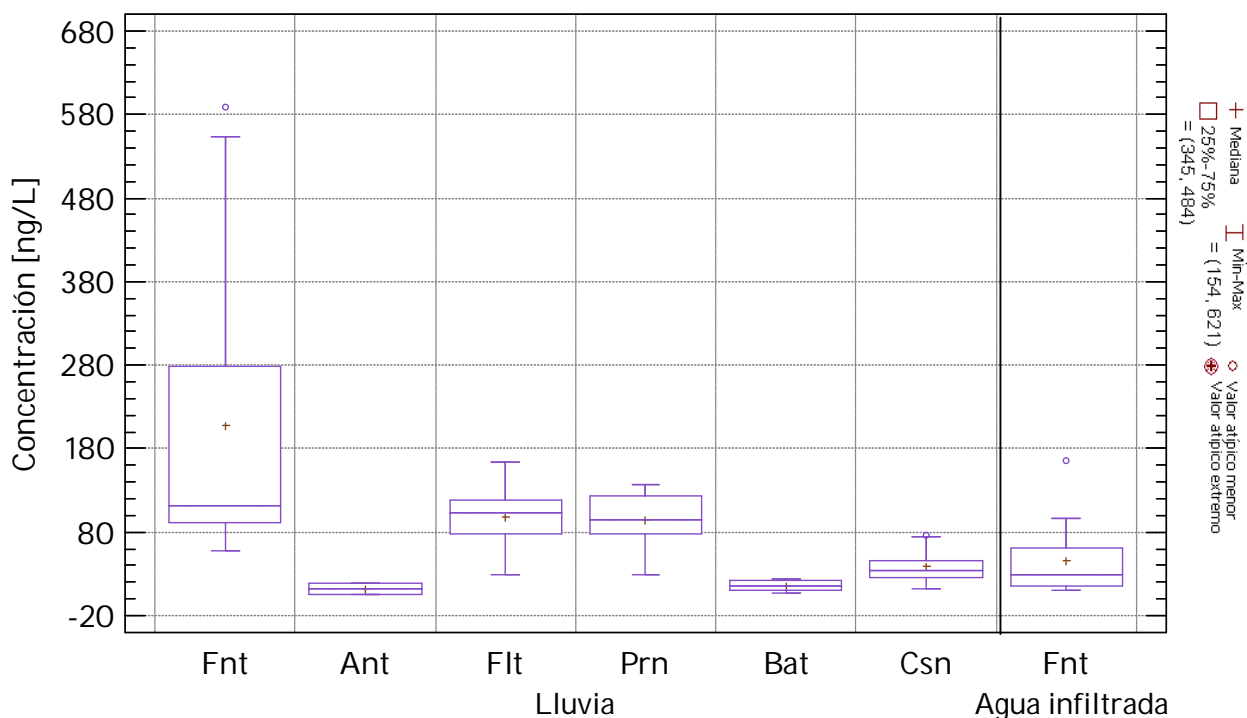


**Figura 16.** Variación de la concentración (ppt) de los HAPs de bajo peso molecular (Naftaleno, Acenaftileno, Acenafteno y Fluoreno) en agua de lluvia e infiltrada.

### 7.5.2 Mediano peso molecular

Respecto a los HAPs de mediano peso molecular (**Figura 17**) el fenantreno, fluoranteno y pireno, fueron los compuestos de mayor concentración en el agua de lluvia de los 16 HAPs analizados, esto puede deberse a sus fuentes de emisión en la Ciudad de México ya que el fenantreno y pireno se encuentran en el humo del cigarrillo; mientras que el fluoranteno puede producirse a partir de la pirólisis de materias primas orgánicas como el petróleo y el carbón a elevadas temperaturas, ó de forma natural como producto de la biosíntesis de las plantas (Harvey, 1997). La forma intermedia entre fase sólido-gas en que se clasificaron a estos HAPs se debe principalmente a que hay variaciones en las fases presentes en la atmósfera en base a diferentes parámetros, que ya se han mencionado. En las muestras de agua infiltrada, se observó que excepto por el fenantreno los demás HAPs ya no se detectaron, esto debido a que su concentración en agua de

lluvia fue muy baja. Existen diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre los HAPs de la lluvia y fenantreno.

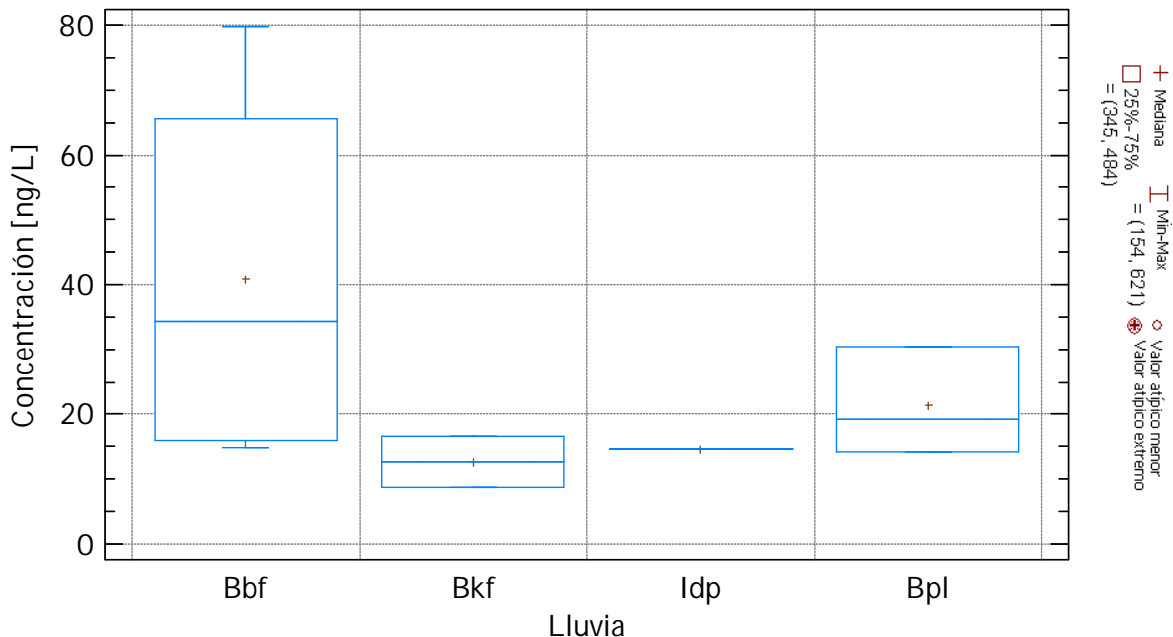


**Figura 17.** Variación de la concentración (ppt) de los HAPs de mediano peso molecular (Fenantreno, Antraceno, Fluoranteno, Pireno, Benzo(a)antraceno y Criseno) en el agua de lluvia e infiltrada.

### 7.5.3 Alto peso molecular

De los compuestos de alto peso molecular (**Figura 18**), el que mostró mayor concentración es el benzo[b]fluoranteno con  $79.758 \text{ ng L}^{-1}$ , mientras que los demás se encuentran por debajo de  $31 \text{ ng L}^{-1}$  en la lluvia. En cuanto al agua infiltrada las concentraciones ya no se detectaron porque están por debajo del límite de cuantificación. A partir del benzo[k]fluoranteno su concentración en al agua de lluvia disminuye y desaparece con el tiempo, lo que hace suponer que conforme avanza la época de lluvias la atmósfera se va limpiando de los contaminantes, además de que por estar en fase sólida no son fácilmente transportados por agua debido a su alta insolubilidad (Huerta, 2011). Existen diferencias significativas ( $p < 0.05$ ).





**Figura 18.** Variación de la concentración (ppt) de los HAPs de alto peso molecular (Benzo[b]fluoranteno, Benzo[k]fluoranteno, Benzo[a]pireno, Indeno[123-cd]pireno, Dibenzo[ah]antraceno y Benzo[ghi]perileno) en agua de lluvia e infiltrada.

La concentración de los HAPs en la lluvia y agua infiltrada por muestra, así como los límites de detección para cada compuesto se muestran en la Tabla X y XI respectivamente del anexo 3.

Para confirmar que efectivamente se detectan los compuestos de interés, se inyectó en el CG/EM una solución de un estándar certificado a una concentración de 600 ppb; el cual contenía los 16 HAPs (**Figura 19**). Posteriormente se analizaron las muestras de precipitación pluvial (**Figura 20**) y de agua de lluvia infiltrada (**Figura 21**). Se encontró correspondencia entre los analitos de las muestras de lluvia y el estándar certificado y esto se corroboró con su espectro de masa, lo cual validó los resultados obtenidos. También se verificaron los espectros para cada HAP.

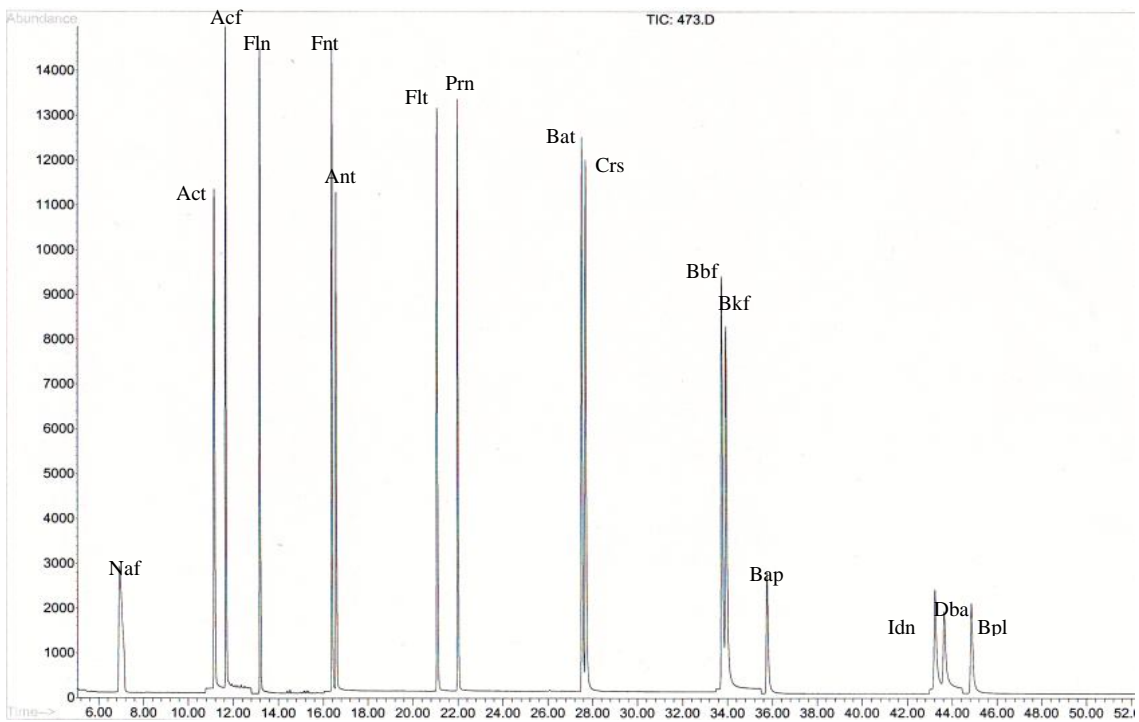


Figura 19. Cromatograma del perfil de los 16 HAPs de la muestra estándar.

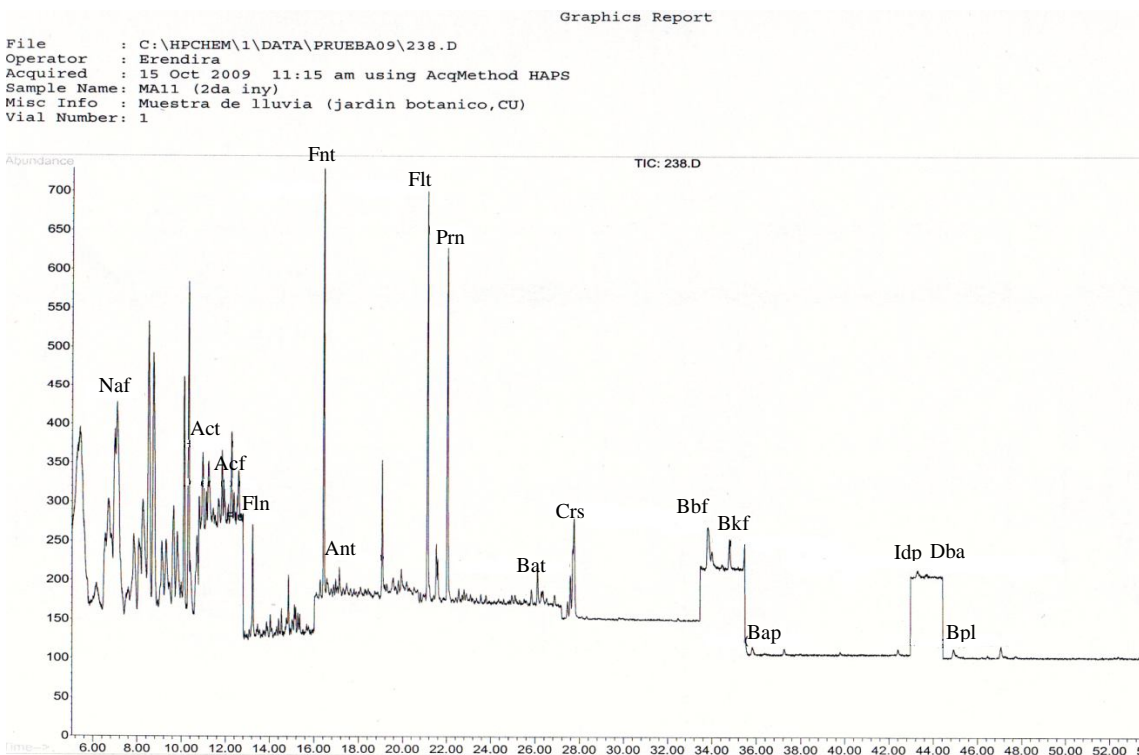
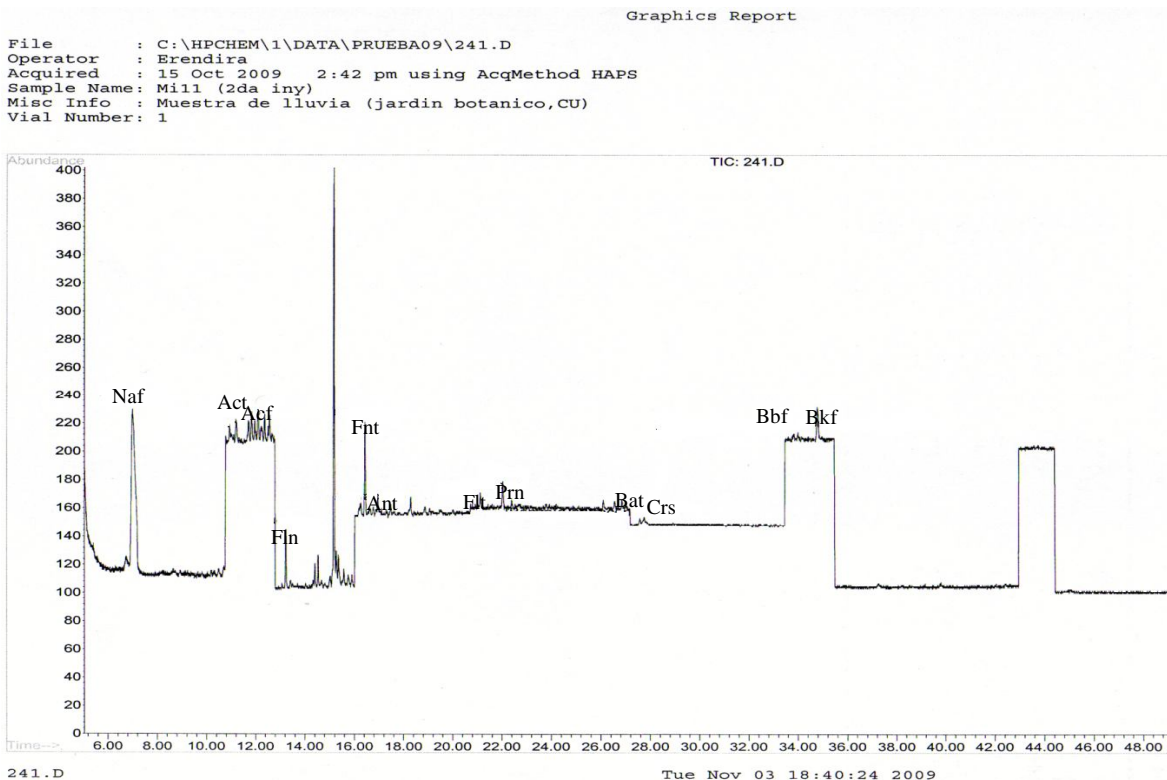


Figura 20. Cromatograma del perfil de HAPs en el agua de lluvia



**Figura 21.** Cromatograma del perfil de HAPs en el agua de lluvia infiltrada

## 7.6 Metales pesados

### 7.6.1 Concentración en el agua de lluvia e infiltrada

En cuanto a los metales pesados que fueron analizados en el agua de lluvia e infiltrada (**Figura 22**), se observó que el manganeso en el agua infiltrada superó en varios eventos la concentración de la precipitación, lo que puede deberse a que se ha ido acumulando en el suelo, proveniente del aire y la lluvia o forma parte del material de la AVE. En el plomo se distingue claramente que la concentración es mayor en la lluvia, esto puede deberse a que después de varios años de ser prohibido su uso en la gasolina todavía se encuentre presente en la atmósfera. En cambio, el cromo presentó concentraciones más altas en el agua infiltrada que se puede atribuir a la solubilidad del elemento en condiciones naturales. Se observó que la concentración de los metales pesados en el agua de lluvia no presentaron ninguna correlación con el volumen de precipitación. En resumen, la concentración de la lluvia de manera descendente es: Zn > Mn > Ni > Pb > Cr > Co > Cd y en el agua infiltrada por la AVE es: Zn > Ni > Mn > Cr > Co > Cd > Pb. Se encontraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ).

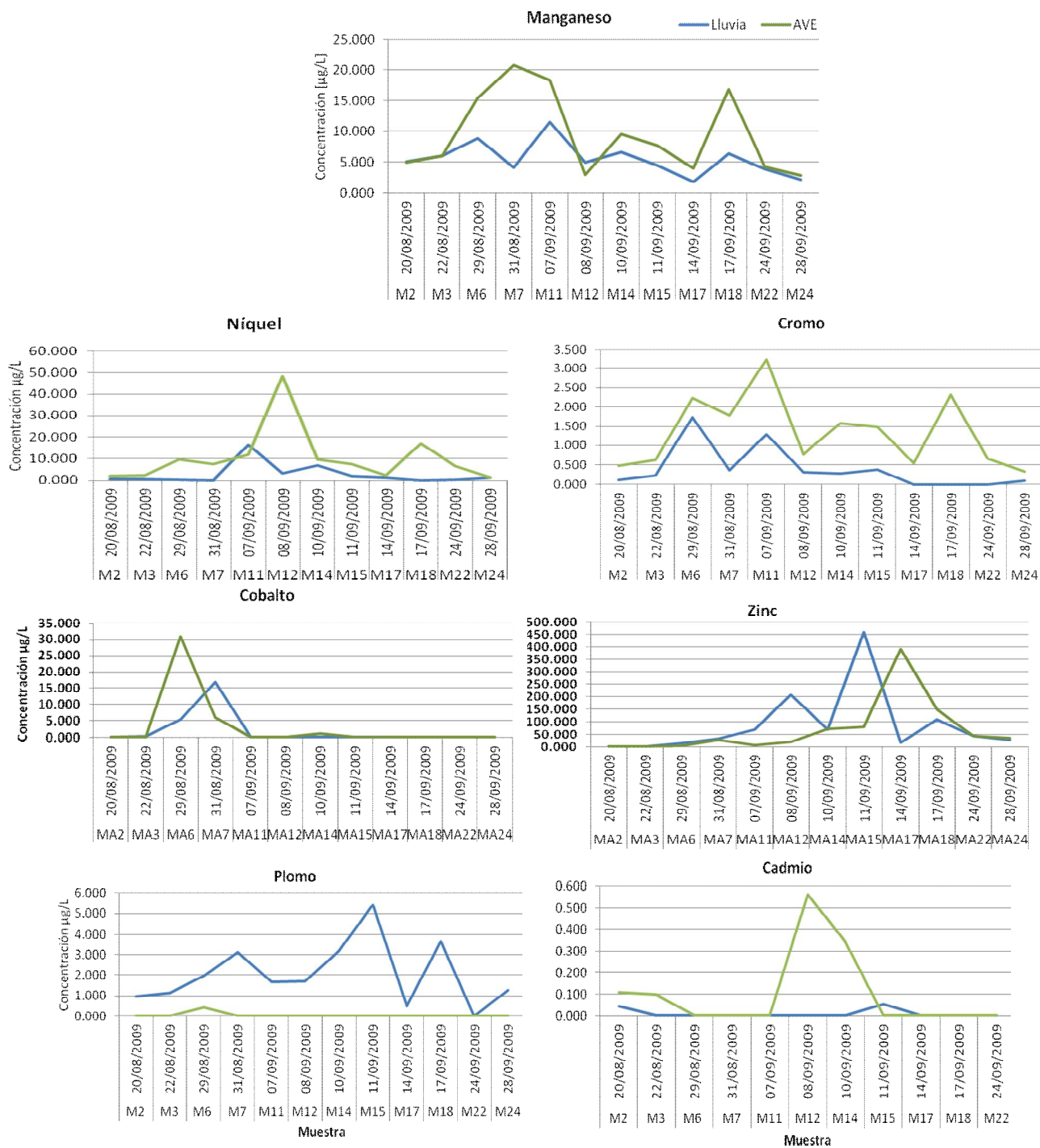
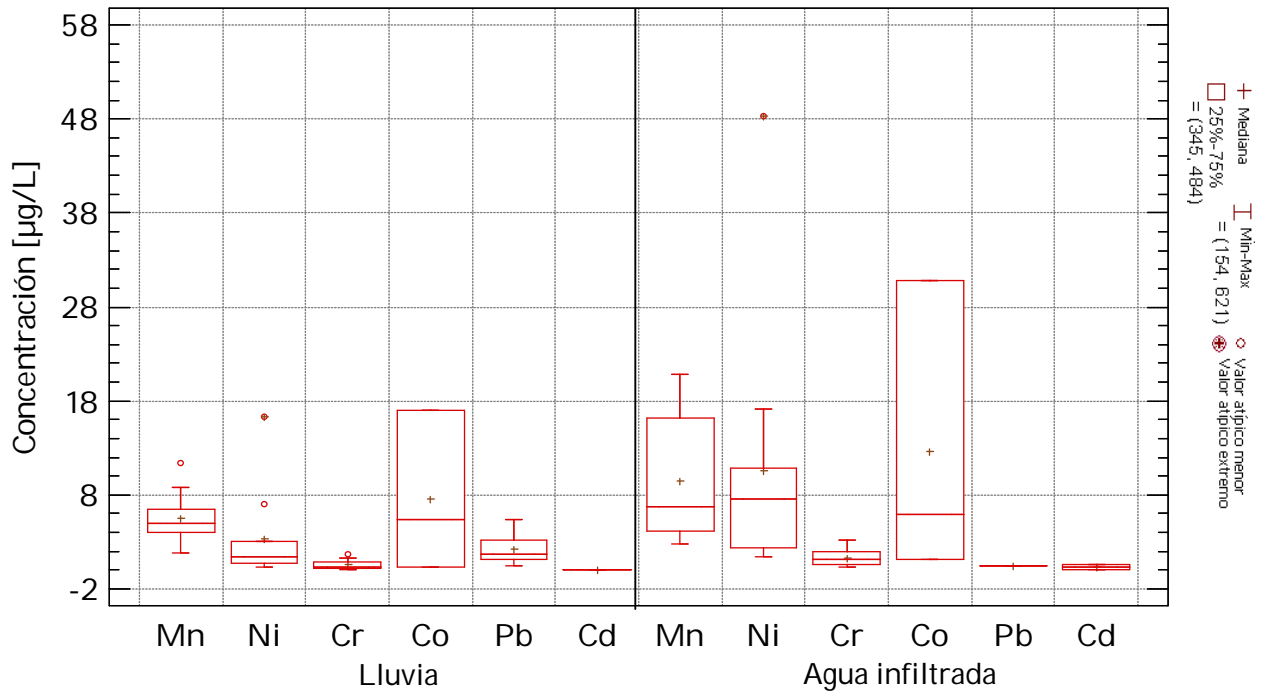
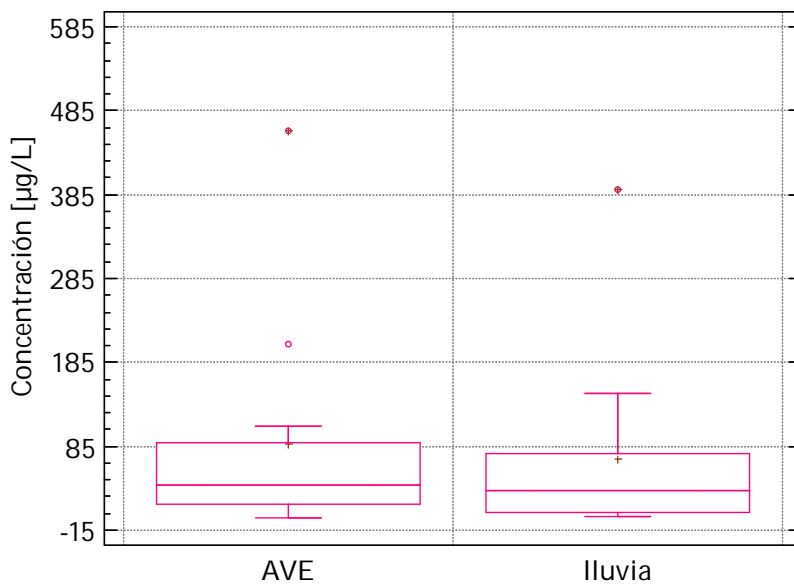


Figura 22. Variación de la concentración (ppb) de metales pesados manganeso, níquel, cromo, cobalto, plomo y cadmio en agua de lluvia e infiltrada. En azul la lluvia y en verde la infiltrada por fecha y muestra.



**Figura 23.** Variación de la concentración (ppb) de metales pesados manganeso, níquel, cromo, cobalto, plomo y cadmio en agua de lluvia e infiltrada.



**Figura 24.** Variación de la concentración (ppb) de zinc en agua de lluvia e infiltrada.

### 7.6.2 Modelo escala

En la **Tabla VII** se presenta la concentración de siete metales pesados que fueron analizados para evaluar el material de soporte, sustrato y sistema de AVE. En el evento de 24 h estimamos que hay aportación de Zn por todo el sistema de AVE; mientras que el Pb es retenido por éste. Tanto para

el Cr y Ni hay aportación del sistema de AVE y material, como de la AVE y suelo, respectivamente. En cuanto al Mn, el material lo contribuye.

Para el evento de 48 h se estima que el Mn, Cr y Zn son aportados por cada capa del sistema de AVE; el material y suelo contribuyen con Co y aporta junto con el suelo Pb, mientras que el Ni es retenido por todo el sistema de AVE. No se realizaron pruebas estadísticas de estos experimentos por ser muestras únicas.

**Tabla VII.** Comparación del modelo a escala y la AVE en eventos de 24 h y 48 h.

<b>Evento de 24 h</b>					
	<b>Lluvia</b>	<b>AVE</b>	<b>Material</b>	<b>Material y sustrato</b>	<b>LD</b>
<b>Metal</b>	<b>Concentración µg/L</b>				
<b>Mn</b>	2.551	2.297	5.419	1.725	0.881
<b>Ni</b>	0.215	0.908	0.101	2.347	0.102
<b>Cd</b>	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.098
<b>Pb</b>	0.305	N.D.	0.232	N.D.	0.115
<b>Cr</b>	N.D.	0.099	0.089	N.D.	0.099
<b>Co</b>	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.115
<b>Zn</b>	8.613	11.283	21.184	19.363	0.177
<b>Evento de 48 h</b>					
<b>Mn</b>	3.918	5.745	15.806	18.123	0.881
<b>Ni</b>	8.228	1.888	0.240	0.979	0.102
<b>Cd</b>	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.098
<b>Pb</b>	0.144	N.D.	0.600	1.422	0.115
<b>Cr</b>	N.D.	0.205	0.069	0.071	0.099
<b>Co</b>	N.D.	N.D.	0.147	0.129	0.115
<b>Zn</b>	15.012	196.703	17.783	253.607	0.177

LD=límite de detección. N.D.= No detectable

### 7.6.3 Suelo

Como se mencionó anteriormente, las muestras de suelo se tomaron de dos segmentos de la AVE, designando zona A donde encontramos *Opuntia tomentosa* y *Agave celsii*, y zona B la que tiene varias especies de *Sedum*. En la **Tabla VIII**, se observan las concentraciones de los 7 metales pesados inmediatamente disponibles analizados, por zona y después de 24 h y 48 h del evento de lluvia. No se encontraron diferencias significativas por metal, tratamiento o zona.

**Tabla VIII.** Concentración en  $\text{mg kg}^{-1}$  de los metales pesados inmediatamente disponibles en las muestras de suelo de la zona A y zona B de la AVE en eventos de 24 h y 48 h.

Concentración $\text{mg kg}^{-1}$					
	Evento 24 h		Evento 48 h		LD
	Zona A	Zona B	Zona A	Zona B	
<b>Mn</b>	68.494	64.039	52.104	52.712	0.044
<b>Ni</b>	2.329	1.524	1.352	1.001	0.102
<b>Cd</b>	1.856	2.003	1.772	2.607	0.098
<b>Pb</b>	14.341	14.328	14.651	12.583	0.208
<b>Cr</b>	2.124	0.357	0.196	0.445	0.018
<b>Co</b>	1.010	0.835	0.915	0.831	0.011
<b>Zn</b>	40.338	32.900	39.890	29.701	0.732

LD=límite de detección.

La medición de la retención de los HAPs en el suelo no pudo ser llevado a cabo, sin embargo, se sabe que la degradación de éstos en los suelos se encuentra afectada por la baja biodisponibilidad debido a su baja solubilidad en agua y a la tendencia a adsorberse fuertemente a la materia orgánica del suelo. Conforme aumenta el tiempo de residencia en el suelo, los HAPs se vuelven menos disponibles. Este "envejecimiento" es conocido como uno de los principales factores que gobiernan las rutas y el transporte de los HAPs en suelo (Swindell y Reid, 2006; Sabate *et al.*, 2006).

En adición, las plantas en la AVE pueden secuestrar, fitoextraer o fitoestabilizar alguna fracción de los contaminantes que pueden ser liberados por el sustrato o material de la infraestructura, lo que reduce la concentración del contaminante lixiviado por el sistema.

## 8 Conclusiones

Se registró una alta correlación entre los registros de precipitación colectados en la AVE del Jardín Botánico de la UNAM y de la Unidad Meteorológica del CCH-Sur, lo que indica que el procedimiento de colecta fue adecuado tomando en cuenta que en el plantel se realiza el muestreo cada 30 min.

Los resultados sugieren que una azotea verde extensiva tiene la capacidad de retener agua de la precipitación y disminuir la esorrentía en eventos de lluvia de poca intensidad, incluso puede ser nula. En eventos de lluvia continuos y de 48 horas con lluvias fuertes, la azotea verde extensiva, una vez llegando a la saturación, tiene menor capacidad de retención.

El pH mostró que la azotea verde extensiva posee la capacidad de neutralizar las deposiciones ácidas.

La concentración del naftaleno en el agua infiltrada superó a la de la lluvia en la mitad de las muestras lo que podría deberse a las características de contaminación de la zona de estudio, las partículas atmosféricas que lo contienen, incluyendo los agentes que los liberan, hasta el volumen de precipitación, el tiempo atmosférico, depositación seca o húmeda, el pH de la lluvia y suelo.

En algunas muestras de metales pesados la concentración en el agua infiltrada superó a la de la lluvia, lo cual podría deberse a varios factores, desde las características de contaminación de la zona de estudio, incluyendo los agentes que los liberan, hasta el volumen de precipitación, el tiempo atmosférico, el pH de la lluvia y los factores que afectan la movilidad de metales pesados en el suelo.

Se observó que conforme el número de anillos aromáticos en los HAPs aumenta su estabilidad decrece, al igual que su solubilidad disminuye con el aumento del peso molecular, motivo por el cual las concentraciones llegaron a decrecer considerablemente.

El fenantreno, fluoranteno y pireno son los compuestos en mayor concentración en el agua de lluvia de los 16 HAPs analizados, y el naftaleno en el agua infiltrada.

El Zn fue el metal de mayor concentración en el agua de lluvia e infiltrada, en el Cd, Co, Mn, Cr, y Ni ésta tendió a ser superior en el agua infiltrada en la mayoría de las muestras por el aporte del material y sustrato, mientras que, el Pb redujo su concentración en todas las muestras de agua infiltrada.

En la comparación del modelo a escala y la AVE se observó el aporte de Zn por todo el sistema de AVE (material, sustrato y plantas) en los eventos de 24 h y 48 h.



La concentración de los 7 metales pesados analizados en suelos no varía de acuerdo a tipo de plantas presentes en la AVE.

## **9 Sugerencias**

- Identificar los materiales y sustrato que no sean fuente de contaminantes para posteriormente identificar aquellos que sean capaces de absorber o adsorber, los contaminantes introducidos por la lluvia, o al menos restringir su liberación en la escorrentía.
- Examinar los efectos de las raíces y los exudados de las raíces en la solubilización de los contaminantes inorgánicos a partir de sustratos de las AVs y la capacidad de las plantas de secuestrar metales solubles liberados del sustrato utilizado.
- Realizar un balance de masas para los HAPs y metales pesados.

## 10 Bibliografía

- Alonso, J., M. A. García, M. P. López y M. J. Melgar. 2004. Acumulación de metales pesados en macromicetos comestibles y factores que influyen en su captación. *Revista de Toxicología*. 21(001):11-15
- Alsup S. E., S. D. Ebbs, L. L. Battaglia y W. A. Retzlaff. 2011. Heavy metals in leachate from simulated green roof systems. *Ecological Engineering*. 37:1709-1717
- Álvarez S.F. J., J. Carabias-Lillo, J. Meave del Castillo, P. Moreno-Casasola, D. Nava-Fernández, F. Rodríguez-Zahar, C. Tovar-Gonzalez y A. Valiente-Banuet. 1982. Proyecto para la creación de una Reserva en el Pedregal de San Ángel. Serie Cuadernos de Ecología No. 1. Universidad Autónoma de México, México, D. F.
- Amagi T., Takahashi Y., Matsushita H., Morknoy D., Sukasem P. y M. Tabucanon. 1999. A survey on polycyclic aromatic hydrocarbon concentrations in soil in Chiang-Mai, Thailand. *Environment International*. 25:563-572.
- ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry) 1995. Toxicological profile for polycyclic aromatic hydrocarbons. Atlanta, GA.: U.S. Department of Health and Human Service, Public Health Service.
- Báez, P. A., D. R. Belmont, R. M. García, M. C. B. Torres and H. G. Padilla. 2006. Rainwater chemical composition at two sites in Central. *Atmospheric Research* 80:67–85.
- Barrie L. A., S. E. Limberg, W. H. Chang, H. B. Ross, R. Arimoto y T. M. Church. 1987. On the concentration of trace metals in precipitation. *Stmospheric Environment*. 21(5): 1113-1135
- Bem, H., M. Gallorini, E. Rizzio y M. Krzeminska. 2003. Comparative studies on the concentrations of some elements in the urban air particulate matter in Lodz City of Poland and Milan, Italy. *Environmental Pollution* 29: 423–428.
- Berndtsson J. C. 2010. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering*. 36: 351-360
- Berndtsson J. C., L. Bengtsson y K. Jinno. 2009. Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs. *Ecological Engineering*. 35: 369–380
- Berndtsson J. C., T. Emilson y L. Bengtsson. 2006. The influence of extensive vegetated roofs on runoff water quality. *Science of the Total Environment*. 355:48-63

- Calderón J., M. E. Navarro, M. E. Jimenez-Capdeville, M. A. Santos-Díaz, A. Golden, I. Rodríguez-Leyva, V. Borja-Aburto y F. Díaz-Barriga. 2001. Exposure to arsenic and lead and neuropsychological development in Mexican children. *Environmental Research*. 85:69-76
- Calderón M., Gómez S., Villalobos-Pietrini R., Butterworth F. y M.O. Amador. 2004. The effects of seasonal weather on the genotoxicity, cytotoxic properties, cytotoxicity and organochemical content of the extracts of airborne particles in Mexico city. *Mutation Research*. 558, 7-17-
- Calderón R. A. 2005. Metales pesados en aves (patos y cercetas) residentes y migratorias recolectadas en sistemas lagunares del centro y sur de Sinaloa. Tesis de Maestría en Ciencias del Mar. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Calvert J. G., R. Atkinson, K. H. Becker, R. M. Kamens, J. H. Seinfeld, T. J. Wallington y G. Yarwood. 2002. *The Mechanisms of Atmospheric Oxidation of Aromatic Hydrocarbons*, Oxford University Press, Nueva York.
- Carabias, J. y R. Landa. 2005. Agua, medio ambiente y sociedad. Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México. México: El Colegio de México, UNAM, Fundación Gonzalo Río Arronte, IAP.
- Carter, T. y C. R. Jackson. 2007. Vegetated roofs for stormwater management at multiple spatial scales. *Landscape and Urban Planning* 80: 84-94
- Castillo A. S., Y. M. Orea, M. A. R. Romero, P. G. Chávez, O. N. Castro, I. S. Gallén y J. A. Meave. 2007. La Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. Aspectos florísticos y ecológicos. Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Castillo-Argüero S., G. Montes-Cartas, M. A. Romero-Romero, Y. Martínez-Orea, P. Guadarrama-Chávez, Irene Sánchez-Gallén y O. Núñez-Castillo. 2004. Dinámica y conservación de la flora del matorral xerófilo de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (D.F., México). *Boletín de la Sociedad Botánica de México*. Junio. No. 074, 51-75 pp
- CCA. 1997. Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte. Rutas continentales de los contaminantes. Hacia una agenda para la cooperación en materia de transporte a grandes distancias de la contaminación atmosférica en América del Norte. Disponible en: [www.cec.org/Storage/33/2429\\_rutasContaminantes.pdf](http://www.cec.org/Storage/33/2429_rutasContaminantes.pdf). Consultado 4 de Marzo del 2010.

- Center for the Advancement of green roof technology. 2005. British Columbia Institute of Technology.
- Chang M., M. W. McBroom y R. S. Beasley. 2004. Roofing as a source of nonpoint water pollution. *Journal of Environmental Management*. 73:307-315
- Chang, M., M.W. McBroom y R. S. Beasley. 2004. Roofing as a source of nonpoint water pollution. *Journal of Environmental Management*. 73:307-315
- Coby S. C. W., L. Xiangdong y I. Thomton. 2006. Review: Urban environmental geochemistry of trace metals. *Environmental Pollution*. 142:1-16
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua de México. 2011. Atlas del agua en México. Página en red: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGP-18-11.pdf>
- Czemieli, B. J., L. Bengtsson y K. Jinno. 2009. Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs. *Ecological Engineering* 35: 369-380.
- Czemieli, B. J., T. Emilsson y L. Bengtsson. 2006. The influence of extensive vegetated roofs on runoff water quality. *Science of the Total Environment* 355: 48-63
- Díaz-Báez M. C., L. E. Cruz, D. Rodríguez, J. Pérez y C.M. Vargas. 2000. Evaluation of Three Water Concentration Techniques as a Prior Step to Test Acute Toxicity. *Environmental Toxicology*. 15 (4):600-610
- Duce A. R. y G. L. Hoffman. Atmospheric vanadium transport to the ocean. 1976. *Atmospheric Environment*. 10 (11): 989-996
- Durán de Bazúa C. Sep-Oct-1994. Saneamiento de aguas residuales y desechos en un ingenio azucarero. UNAM, Año 3, N°14 pp57-62
- EC, European Commission. 2004. Working group on particulate matter (Ed.), Second Position Paper on Particulate Matter, p. 234
- Epstein, E. y A. J. Bloom. 2005. Mineral Nutritional of Plants: principles and perspectives. 2nd ed. Editorial Sinauer Associates. Sunderland, Massachusetts. 400 pp
- Fang, G. C., C. N. Chang, Y. S. Wu, M. H. Chen, T. T. Ho y S. H. Huang 2004. A study of metallic elements at suburban and industrial regions in central Taiwan during 2002–2003. *Atmospheric Research* 70: 131–142.
- Fast J. D. y S. Zhong. 1998. Meteorological factors associated with inhomogeneous ozone concentrations within the Mexico City basin. *Journal Geophysical Research*. 103: 927-946

- Fenn M. E., L. I. de Bauer y T. Hernandez-Tejeda. 2002. Urban air pollution and forest. Resources at risk in the Mexico City Basin, Springer, Nueva York, Estados Unidos.
- Fernández-Zacarias, A., E. González-García, R. Patiño-Arroyo, F.J. Luna-García y G. de la Rosa-Álvarez. 2006. Emprendiendo la fitorremediación en México. Tercer encuentro "Participación de la mujer en la ciencia". León, Guanajuato, México. Disponible en: [www.cio.mx/3\\_enc\\_mujer/files/extensos/.../S1-BYQ11.doc](http://www.cio.mx/3_enc_mujer/files/extensos/.../S1-BYQ11.doc).
- Finlayson-Pitts B. y Jr. J. Pitts. 1986. Atmospheric chemistry fundamental and experimental techniques. Wiley Interscience. Nueva York. 1098 pp.
- Flores, V. L. 2006. Contribución al estudio de la Familia Orchidaceae en la Reserva del Pedregal de San Ángel y en algunas zonas perturbadas por la urbanización de la Ciudad Universitaria UNAM, México, D. F. Tesis de Licenciatura (Biología), Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. 120 pp
- Förster J. 1996. Patterns in roof runoff contamination and their implications on practice and regulation of treatment and local infiltration. *Water Science and Technology*. 33: 39–48
- García Martínez Rocío. 2007. Determinación de metales pesados en la precipitación pluvial de una zona urbana (Ciudad de México) y de una zona rural (Rancho Viejo, Edo. de México). Tesis de Doctorado en Física de la Atmósfera. Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM
- Getter, K. L y D. B Rowe. 2006. The role of green roofs in sustainable development. *HortScience* 41: 1276–1286
- Getter, K. L., D. B. Rowe y J. A. Andressen. 2007. Quantifying the effect of slope on extensive green roof storwater retention. *Ecological Engineering* 31:225-231
- Göbel P., C. Dierkes y W. G. Coldewey. 2007. Storm water runoff concentration matrix for urban areas. *Journal of Contaminant Hydrology*. 91: 26–42
- Haiyan W. y A. O. Stuanes. 2003. Heavy metal pollution in air-water-soil-plant system of Zhuzhou City, Hunan Province, China. *Water air and soil pollution*. 147, 79-107.
- Harvey, G. R. 1997. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. Editorial Wiley-VHH. Estados Unidos de América.
- Hernández, Z. C. 1990. Las colecciones del Jardín Botánico del Instituto de Biología, UNAM. México. 32 pp

- Huerta Guzmán Roberto Gerardo. 2011. Determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) en el agua de lluvia de la Ciudad de México. Tesis de Maestría en Ciencias de la Tierra. Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM.
- Ibañez G. A. 2008. Hidrocarburos aromáticos policíclicos en las PM<sub>10</sub> de la zona metropolitana del Valle de México. Tesis para obtener el título de Químico Farmacéutico Biólogo. Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F.
- Ibañez G. A. 2008. Hidrocarburos aromáticos policíclicos en las PM<sub>10</sub> de la Zona Metropolitana del Valle de México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 2010. Estadística Sociodemográfica. Población total según sexo 1950 a 2010. Censo Poblacional y Vivienda.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 2010. Precipitaciones pluviales extremas. Disponible en: [www.imta.gob.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=179:precipitaciones-pluviales-extremas&catid=52:enciclopedia-del-agua&Itemid=80](http://www.imta.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=179:precipitaciones-pluviales-extremas&catid=52:enciclopedia-del-agua&Itemid=80). Consultado 7 julio del 2010.
- Jáuregui, E. 2000. El clima de la Ciudad de México. Temas selectos de Geografía de México. Textos monográficos. Plaza y Valdés Editores.
- Jáuregui, O. E. 2000. El clima de la Ciudad de México. 1ra ed. Editorial Plaza y Valdés. México, Distrito Federal. 131 pp
- Jiménez, C. B. 2001. La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada. Ed. Limusa. Colegio de Ingenieros Ambientales de México. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Keeler G., G. Glinsorn y N. Pirrone.1995. Particulate mercury in the atmosphere: Its significance transport, transformation and sources. *Water, Air, Soil and Pollutant*. 80-159.
- Khalili N. R., Scheff P. A. y T. M. Holsen. 1995. PAH source fingerprints for coke ovens, diesel and, gasoline engines, highway tunnels, and wood combustion emissions. *Atmospheric Environment*. 29, 533-542.
- Kiss G., Z. Varga-Puchony, G. Rohrbacher y J. Hlavay.1998. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons on atmospheric aerosol particles of different sizes. *Atmospheric Research*. 46:253-261

- Köhler M., M. Schmidt, F. W. Grimme, M. Laar, V. L. de Assunción Paiva y S. Tavares. 2002. Green roofs in temperate and in hot-humid tropics—far beyond the aesthetics. *Environmental Management and Health*. 13: 382–391
- Kulkarni P. y C. Venkataraman. 2000. Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons in Mumbai, India. *Atmospheric Environment*. 34, 2785-2790
- Lafragua J., Gutiérrez A., Aguilar E., Aparicio J., Mejía R., Santillán O., Suárez M.A. y M. Preciado. 2003. Balance hídrico del valle de México. *Anuario del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*.
- Lavoisier, Salcedo Eric. 2006. Metales pesados en la Laguna Yalahu. Tesis de Licenciatura (Ingeniero Químico). Facultad de Química, UNAM.
- Li J., G. Zhang, S. Qi, G. Liu y X. Peng. 2006. Source seasonality of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in a subtropical city, Guangzhou, South China. *Science of the Total Environment*. 355:145-155
- Ligocki M. P., C. Leuenberger y J. F. Pankow. 1985. Trace organic compounds in rain-II. Gas scavenging of neutral organic compounds. *Atmospheric Environmen*. 19:1609-1617
- Masclet P., Mouvier G. y K. Nikolaou. 1986. Relative decay index and source of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Atmospheric Environment*. 20, 439-446.
- Mason, B. y C. B. Moore. 1994. *Principles of Geochemistry*. Wiley. New York 310 pp
- Mentens, J., D. Raes y M. Hermy. 2005. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and Urban Planning* 77: 21–226.
- Miguel A., Marr L. C., Kirschstetter T., Harley R., Hering S. y S. Hammond. 1998. Real-world emissions of PAH in the exhaust of California reformulated gasoline-and heavy duty diesel-fueled vehicles. *Journal of Aerosol Science*. 29, 73-74.
- Miranda J., Crespo L. y A. Morales. 2000. Absolute principal component analysis of atmospheric aerosols in Mexico City. *Environment Science and Pollution Research*. 7: 1-5.
- Moran A., B. Hunt y G. Jennings. 2003. A North Carolina Field Study to Evaluate Greenroof Runoff Quantity, Runoff Quality, and Plant Growth. Paper presented at the 2003 ASAE Annual International Meeting.
- Moran A., B. Hunt y J. Smith. 2005. Hydrologic and water quality performance from greenroofs in Goldsboro and Raleigh, North Carolina. Paper presented at the Third Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference, Awards and Trade Show; 4–6 May 2005, Washington, DC.

- Moran A., B. Hunt y J. Smith. 2005. Hydrologyc and water quality performance from greenroofs in Goldsboro and Raleigh, North Carolina. Paper presented at the Third Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference, Awards and Trade Show; 4–6 Mayo, Washington, DC.
- Murguía Flores Fabiola. 2008. Tranferencia de metales pesados del suelo a plantas de lechuga (*actuca sativa*), en la zona chinampera de Xochimilco D.F. Tesisi de Licenciatura. Bióloga. Facultad de Ciencias, UNAM.
- Navarro-Aviño, J. P., I. A. Alonso y J. R. López-Moya. 2007. Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. Ecosistemas 16 (2):10-25
- Neilson A. H. 1998. The handbook of environmental chemistry. Volume 3 Anthropogenic compounds (part J): PAHs and related compounds. Editorial Berlin, Springer.
- Nriagu J. O. y J. M. Pacyna. 1988. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals. Nature. 333: 134– 139
- Oberndorfer, E., J. Lunhdholm, B. Bass, R. R. Coffman, H. Doshi, N. Dunnett, S. Gaffin, M. köhler, K. Y. Liu y B. Rowe. 2007. Green roofs as urban ecosystems: ecological, structures, functions and services. BioScience 57: 823-833
- Ohura T., Amagai T., Fusaya M. y H. Matsushita. 2004. Spatial distributions and profiles of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons in two industrial cities in Japan. Environmental Science and Technology. 38: 49-55
- OMM, "Atlas Internacional de Nubes", Volumen I: "Manual de observación de nubes y otros meteoros" Publicaciones de la OMM, N° 407, Ginebra, 1993.
- OMS (Organización Mundial de la Salud). 2000. Air quality guidelines for Europe, 2da Ed. WHO, Regional Office for Europa, Copenhagen. Página en red: <http://www.euri.who.int/document/e71922.pdf>.
- Páez Bistrain Rosaura. 2010. Biodisponibilidad y toxicidad de hidrocarburos aromáticos policíclicos en suelos orgánicos contaminados con derrames de petróleo. Tesis de Maestría. Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra. Instituto de Geofísica, UNAM.
- Pankow J. F., M. I. Lorne y T. J. Kristensen. 1982. Effects of linear flow velocity and residence time on the retention of non-polar aqueous organic analytes by cartridges of tenax-gc. Journal of Chromatography A 245:31-43



- Pankow, J. F. 1987. Review and comparative analysis of the theories on partitioning between the gas and aerosol particulate phases in the atmosphere, *Atmosphere Environment* 21:2275-2283
- Prasael, M. N. V. 2001. *Metals in the environmental analysis by biodiversity*. Editorial Marcel Dekker, Inc. Nueva York, Estados Unidos de América.
- Raga G. B., T. Castro, D. Baumgardner. 2001. The impact of mega-city pollution on local climate and implications for the regional environment Mexico City. *Atmospheric Environment*. 35:1805-1811
- REPSA, Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. 2011. Página en red: <http://www.repsa.unam.mx/index.html>
- Reyes, J. S. 2009. *Sistemas de azoteas naturadas para la Ciudad de México*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Rodríguez Estrada Mónica Lucía. 2010. *Metales pesados e isótopos de C en anillos de árbol: herramienta para evaluar el impacto antropogénico en zonas metalúrgicas*. Tesis de Licenciatura. Química. Facultad de Química, UNAM
- Romero, L. P. 2006. *Cambio ambiental global: ¿Nuevos desafíos a viejos problemas?* Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco. Disponible en: [rcci.net/globalizacion/2006/fg644.htm](http://rcci.net/globalizacion/2006/fg644.htm). Consultado 7 julio del 2010.
- Rzedowski G. C. de, J. Rzedowski y colaboradores. 2001. *Flora fanerogámica del Valle de México*. 2a edición. Instituto de Ecología y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Pátzcuaro, Michoacán, México. 1406
- Rzedowski J. 1978. *Vegetación de México*. Limusa, México, D. F.
- Sabate J., M. Viñas y A. M. Solanas. 2006. Bioavailability Assessment and Environmental Fate of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Biostimulated Creosote-contaminated Soil. *Chemosphere*. 63, 1648
- Schneider, R., G. Steinhagen-Schneider, H. E. Drescher. 1985. Organochlorines and heavy metals in seals and birds from the Weddel Sea. En: Seigfried W. R., P. R. Conly, R. M. Laws (Eds.) *Antartic Nutrient Cycles and Food Webs*: Berlin: Springer-verlag, 1985. 652-655
- Scholz-Barth Katrin. Enero, 2001. *Green Roofs: Stormwater Management from the Top Down*. *Environmental Design and Construction*.
- Sheu H.-L., W.-J Lee, J. Lin Sue, G.-C. Fang, H.-C. Chang y W.-C. You. 1997. Particle bound PAH content in ambient air. *Environment Pollution*. 93:369-382

- SIMAT-SMA (Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Secretaría del Medio Ambiente). 2011. Disponible en: [www.sma.df.gob.mx/simat](http://www.sma.df.gob.mx/simat)
- Simcik M. F. Eisenreich S. J. y P. J. Lioy. 1999. Source apportionment and source/sink relationships of PAHs in the coastal atmosphere of Chicago and Lake Michigan. *Atmospheric Environment*. 33, 5071-5079.
- Simcik, M. F. y J. H. Offenberg. 2006. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Great Lakes Offenberg. *Environmental Chemistry Vol. 5, Part N*. 307–353 pp
- SMA, Secretaría del Medio Ambiente. 2008. Inventario de emisiones de contaminantes criterio de la ZMVM 2008. Página en red: [http://www.sma.df.gob.mx/sma/links/download/biblioteca/2008ie\\_criterio/2008ie\\_criterio04.pdf](http://www.sma.df.gob.mx/sma/links/download/biblioteca/2008ie_criterio/2008ie_criterio04.pdf)
- Spacie, A., L. MacCarty y G. Rand. 1995. Bioaccumulation and bioavailability in multiphase aquatic system. In: *Fundamentals of Aquatic Toxicology: effects, environmental fate and risk assessment*. Ed. Taylor and Francis. 2nd ed. Washington, D. C.
- Steusloff, S. 1998. Input and output of airborne aggressive substances on green roofs in Karlsruhe. *Urban ecology* (eds J. Breuste, H. Feldmann y O. Uhlmann). Springer-Verlag, Berlin.
- Swindell A. y B. Reid. 2006. *Chemosphere*, 62, 1126-1134.
- Tack F. M. O. Callewaert, W. J. J y M. G. Verloo. 1996. Metal solubility as function of pH in a contaminated, dredged sediment affected by oxidation. *Environmental pollution*. 91(2):109-208
- Taiz, L. y E. Zeiger. 2010. *Plant Physiology*, Quinta Edición. Sinauer Associates. Sunderland, MA.
- Tobar, J. E. 2000. Evaluación de metales pesados en dos sistemas bentónicos arrecifales de Veracruz. Tesis de Licenciatura. Biología. ENEP-Iztacala, UNAM.
- Valette-Silver N. J. 1993. The use of sediment cores to reconstruct historical trends in contamination of estuarine and coastal sediments. *Estuaries*. 16 (3B) 577-588.
- Van Seters T., L. Rocha, D. Smith y G. MacMillan. 2009. Evaluation of Green Roofs for Runoff Retention, Runoff Quality and Leachability. *Water Quality Research Journal of Canada*. 44(1): 33–48

- VanWoert N. D., D. B. Rowe, J. A. Andresen, C. L. Rugh, R. T. Fernandez y L. Xiao. 2005. Green roof storm water retention: Effects of roof surface, slope, and media depth. *Journal of Environmental Quality*. 34:1036-1044
- Vásquez, V. R. 2005. Biosorción de metales pesados en solución acuosa mediante biomasa bacteriana muerta. Tesis de Licenciatura. Biología. Departamento de Química y Biología. Escuela de Ciencias. Universidad de las Américas. Puebla, México.
- Venugopal, B. y T. d: Luckey. 1975. Toxicology of non-radioactive metals and their salts. En: *Heavy metals toxicity, safety and homology*. Luckey T. D., B. Venugopal, D. Hutchison (Eds.) Stuttgart: Thieme:4-73
- Vernet, P.-J. 1991. Heavy metals in the environment. Instituto F.-A. Forel, University of Geneva, Versoix, Switzerland. Editorial Elsevier. Nueva York, Estados Unidos de América.
- Vidal, Hernández Mónica. 2004. Aplicación de PIXE en la determinación de metales pesados y elementos traza en leche de vaca. Tesis de Licenciatura. Química de Alimentos. Facultad de Química, UNAM.
- Villarreal E. L. y L. Bengtsson. 2005. Response of a sedum green-roof to individual rain events. *Ecological Engineering* 25(1): 1-7
- Wong C. S. C., X. Li y E. I. Thornton. 2006. Urban environmental geochemistry of trace metals. *Environmental Pollution*. 142:1-16
- Yamasaki, H., K. Kuwata y H. Miyamoto. 1982. Effects of ambient temperature on aspects of airborne polycyclic aromatic hydrocarbons. *Environmental Science and Technology* 16:189-194
- Yang D. G., S.C. Chen y C. C. Chu. 2000. The study of fine and coarse particles, and metallic elements for the daytime and nighttime in a suburban area of central Taiwan, Taichung. *Chemosphere* 41: 639–644

## Anexo 1

En la siguiente tabla se muestran los huracanes, tormentas y depresiones tropicales que ocurrieron en el transcurso del período de muestreo del presente trabajo (agosto a septiembre del 2009) y el océano donde se desarrolló.

**Tabla IX.** Ciclones tropicales de 2009

Categoría	Nombre	Océano	Fecha	
			Inicio	Fin
Huracán	Jimena	Pacífico	ago-28	sep-04
	Fred	Atlántico	sep-07	sep-09
	Linda	Pacífico	sep-07	sep-10
Tormenta tropical	Bill	Atlántico	ago-15	ago-25
	Hilda	Pacífico	ago-22	ago-23
	Ignacio	Pacífico	ago-24	ago-27
	Danny	Atlántico	ago-26	ago-29
	Kevin	Pacífico	ago-29	sep-01
	Erika	Atlántico	sep-01	sep-03
	Marty	Pacífico	sep-16	sep-19
	Nora	Pacífico	sep-22	sep-25
Depresión tropical	DT8	Atlántico	sep-25	sep-26

En diversas regiones del país, las lluvias ciclónicas representan la mayor parte de la precipitación pluvial anual. Los ciclones se clasifican de acuerdo con la intensidad de los vientos máximos sostenidos. Cuando son mayores de 119 km/h (33.1 m/s) se les denominan huracanes, cuando son entre 61 km/h (16.9 m/s) y 119 km/h (33.1 m/s), son tormentas tropicales, y cuando los vientos son menores de 61 km/h (16.9 m/s), son depresiones tropicales (CONAGUA, 2008).

## **Anexo 2**

### **Lavado del material**

Para este estudio fue necesario aplicar dos técnicas de lavado en dependencia de los compuestos a analizar.

Para el análisis de HAPs es necesario recolectar el agua de lluvia e infiltrada en envases de vidrio y embudos de lámina galvanizada, los cuales tienen que pasar por varias etapas de lavado: agua con jabón (hyclin), se enjuaga con agua de la llave y posteriormente con agua destilada, se deja escurrir el material antes de ponerlo al horno durante dos horas a 200°C. Posteriormente se enfría a temperatura ambiente enjuagando con hexano y acetona reactivo analítico (RA). Por último el material es guardado y envuelto en papel aluminio.

Para el análisis de los metales pesados es necesaria otra técnica de lavado ya que la recolección se hace en envases de plástico. Al igual que el material de vidrio, se lava con agua y jabón, después con agua de la llave y con agua destilada, se deja enjuagando en una solución de ácido nítrico al 10% por dos horas después de haber escurrido el material. Transcurrido este tiempo, el material se enjuaga nuevamente con agua destilada y se deja secar. Terminado el proceso el material se guarda en bolsas de plástico para evitar que se contamine.

Como se mencionó es indispensable que no haya interferencias entre metal-plástico y plástico-metal ya que las muestras se contaminarían.

### Anexo 3

**Tabla X.** Concentración (ppt) de los HAPs en el agua de lluvia e infiltrada de la AVE en por muestra.

Evento (horas)	24		24		24		48		48		24		24		24		48		72		24		48	
Clave de la muestra	M2		M3		M6		M7		M11		M12		M14		M15		M17		M18		M22		M24	
	lluvia	AVE	lluvia	AVE	lluvia	AVE	lluvia	AVE	lluvia	AVE	lluvia	AVE	lluvia	AVE	lluvia	AVE	lluvia	AVE	lluvia	AVE	lluvia	AVE	lluvia	AVE
HAP	Concentración ppt (ng/L)																							
Naf	5453.94	20983.89	13435.14	26217.40	23948.53	25396.33	30795.73	23336.67	11138.46	13405.70	3989.20	7802.31	6511.65	19311.32	9097.19	7273.24	7324.30	4703.17	18765.11	13813.99	9587.79	5941.52	7852.98	10369.29
Act	N.D.	1368.54	904.92	764.99	2324.21	441.73	4963.38	519.25	4218.60	654.80	1325.19	593.81	2448.17	925.89	1936.95	454.37	445.51	N.D.	13924.06	809.62	7269.46	502.03	2302.88	504.88
Acf	N.D.	N.D.	530.33	466.30	N.D.	824.28	567.37	N.D.	927.40	N.D.	484.67	N.D.	689.80	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	2898.16	490.00	1045.28	456.69	713.74	N.D.
Fln	N.D.	N.D.	1547.37	1468.48	2752.37	1932.02	3176.72	824.99	5136.69	1210.73	1870.50	N.D.	3787.71	2044.99	2087.47	1099.56	1566.19	1180.67	10990.72	1860.17	5087.98	1578.07	2944.68	1618.88
Fnt	3787.39	1773.65	4978.68	2510.77	14050.73	2523.35	15008.63	1637.46	27045.25	2750.25	10031.66	1697.47	16935.93	3462.30	9213.95	2217.42	5395.72	2708.55	169135.15	12460.14	70034.75	11525.10	41132.56	12260.10
Atc	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	2025.43	N.D.	2180.39	N.D.	N.D.	N.D.
Flt	1902.36	N.D.	3886.94	N.D.	18330.99	N.D.	17167.38	N.D.	25237.11	N.D.	8948.82	N.D.	16321.99	N.D.	4656.02	N.D.	2654.24	N.D.	48308.25	N.D.	14433.08	N.D.	10728.46	N.D.
Prn	2109.61	N.D.	3928.32	N.D.	20174.62	N.D.	19051.84	N.D.	22304.18	N.D.	6715.36	N.D.	14436.60	N.D.	4594.39	N.D.	2349.19	N.D.	43687.91	N.D.	14631.19	N.D.	10112.84	N.D.
Bat	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	3397.14	N.D.	3309.20	N.D.	2848.65	N.D.	N.D.	N.D.	1068.73	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	5097.73	N.D.	2346.50	N.D.	1070.76	N.D.
Csn	N.D.	N.D.	1382.52	N.D.	11879.98	N.D.	10849.83	N.D.	7041.09	N.D.	919.21	N.D.	1802.75	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	19948.56	N.D.	4629.60	N.D.	2257.62	N.D.
Bbf	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	7528.83	N.D.	10455.47	N.D.	3785.96	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	6923.92	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Bkf	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	2265.88	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	3649.64	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Bap	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
ldp	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	4970.90	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Dbn	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Bpl	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	2592.44	N.D.	3662.18	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	5321.44	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

**Tabla XI.** Límites de detección para los 16 HAPs cuantificados.

HAP	LD	LC	HAP	LD	LC
Naf	293.16	977.21	Bat	258.32	861.05
Act	50.41	168.03	Csn	244.08	813.59
Acf	135.70	452.34	Bbf	833.39	2777.97
Fln	227.58	758.59	Bkf	512.47	1708.23
Fnt	304.95	1016.49	Bap	1449.64	4832.14
Atc	517.46	1724.87	ldp	682.49	2274.98
Flt	269.65	898.85	Dbn	886.98	2956.59
Prn	431.40	1438.01	Bpl	691.43	2304.76

## Anexo 4

**Tabla XII.** Concentración (ppb) de los metales pesados en el agua de lluvia e infiltrada de la AVE en por muestra. Sombreado se muestra los eventos 48 h y no sombreados los de 24 h.

Metal	Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ]													
	Mn		Ni		Cr		Co		Zn		Pb		Cd	
	Lluvia	AVE	Lluvia	AVE	Lluvia	AVE	Lluvia	AVE	Lluvia	AVE	Lluvia	AVE	Lluvia	AVE
M2	5.100	4.959	0.846	1.821	0.109	0.468	N.D.	0.090	0.226	0.553	0.975	N.D.	0.053	N.D.
M3	6.047	5.940	0.766	2.411	0.221	0.616	0.270	0.039	0.406	0.497	1.145	N.D.	0.045	0.109
M6	8.767	15.479	0.410	9.811	1.729	2.226	5.413	30.863	14.988	3.995	1.953	0.451	N.D.	0.097
M7	4.139	20.794	N.D.	7.555	0.359	1.786	16.949	5.884	32.751	26.758	3.132	N.D.	N.D.	N.D.
M11	11.446	18.377	16.350	11.893	1.292	3.227	N.D.	N.D.	70.424	7.631	1.659	N.D.	N.D.	N.D.
M12	4.927	2.990	3.051	48.287	0.303	0.778	N.D.	N.D.	207.099	18.962	1.689	N.D.	N.D.	N.D.
M14	6.528	9.495	6.988	9.813	0.271	1.587	N.D.	1.099	70.188	73.108	3.174	N.D.	N.D.	0.562
M15	4.425	7.572	1.999	7.602	0.381	1.483	N.D.	N.D.	460.276	79.980	5.437	N.D.	N.D.	0.342
M17	1.826	4.056	1.445	2.209	N.D.	0.543	N.D.	N.D.	16.571	390.276	0.515	N.D.	0.055	N.D.
M18	6.372	16.852	N.D.	17.105	N.D.	2.312	N.D.	N.D.	109.615	148.302	3.662	N.D.	N.D.	N.D.
M22	3.880	4.236	0.291	6.735	N.D.	0.659	N.D.	N.D.	44.073	43.425	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
M24	2.137	2.828	1.457	1.480	0.095	0.327	N.D.	N.D.	28.466	36.398	1.267	N.D.	N.D.	N.D.
LD	0.881		0.102		0.099		0.115		0.1774		0.115		0.098	