



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN
EL RÍO MAGDALENA, D.F. COMO SERVICIO
ECOSISTÉMICO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

BIÓLOGA

P R E S E N T A:

GABRIELA MORALES LUQUE



Directora de tesis:

DRA. LUCÍA ALMEIDA LEÑERO

2010

HOJA DE DATOS DEL JURADO

1. Datos del alumno

Morales

Luque

Gabriela

55130342

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Biología

302501131

2. Datos del tutor

Dra.

Lucía

Almeida

Leñero

3. Datos del sinodal 1

Dra.

Josefina

Herrera

Santoyo

4. Datos del sinodal 2

M. en C.

Julieta

Jujnovsky

Orlandini

5. Datos del sinodal 3

M. en C.

María del Jazmín

Aguilar

Medina

6. Datos del sinodal 4

M. en C.

Manuel

Hernández

Quiroz

7. Datos del trabajo escrito

Evaluación de la calidad del agua en el río Magdalena, D.F. como servicio ecosistémico.

63 pp.

2010

Este trabajo se realizó gracias al apoyo del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT), UNAM: IN219809, “Propuesta metodológica para la evaluación de servicios ecosistémicos hidrológicos en el sur poniente de la Ciudad de México”.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Francisco Morales y Mercedes Luque, por el apoyo que me han brindado, especialmente en los momentos difíciles y por darme prueba de realidad.

A mi hermana Dany, una gran amiga que siempre ha logrado sacarme una sonrisa.

A toda mi familia, por estar a mi lado y no dejar que me diera por vencida.

A Miguel, a quien quiero mucho por compartir conmigo todas las experiencias buenas y malas en el tiempo que nos hemos acompañado, y que sé que puedo contar con él para todo. Pero sobretodo, porque me hace muy feliz.

A mis compañeros del Laboratorio de Ecosistemas de Montaña, Bety, Alya, NihaiB, Mónica, Rubén, Rodrigo y Carlos quienes vieron madurar este trabajo durante el tiempo que lo elaboré.

A mis amigos Verónica, Paula, Nicasio, Luis, Norma, Lucía y Erick; quienes me han hecho pasar momentos muy agradables dentro y fuera de la Facultad de Ciencias; y que por eso los tengo en gran estima.

A las chicas de servicio social Janikua, Abril y Gisela, por hacer las horas de trabajo en el laboratorio tan amenas.

A la Dra. Lucía Almeida Leñero, por darme la oportunidad de trabajar mi tesis en el Laboratorio de Ecosistemas de Montaña.

A la Dra. Josefina Herrera Santoyo, por su franqueza, y por tener la buena disposición de ayudarme a sacar lo mejor de la tesis.

A la M. en C. Julieta Jujnovsky Orlandini, por confiar en mí, y llevarme de la mano durante todo el proceso durante el cual hice la tesis.

Al M. en C. Manuel Hernández, por haberme ayudado en las determinaciones de laboratorio y en la interpretación de mis resultados, siempre de buena gana, y por todo el tiempo que me brindó.

A la Unidad de Análisis Ambiental de la Facultad de Ciencias que coordina la Dra. Claudia Ponce de León, en cuyas instalaciones pude procesar las muestras.

Al M. en C. Sebastián Zúñiga Lagunes, por ofrecerme su ayuda desinteresada cada vez que la necesité, pero sobre todo por brindarme su amistad.

A la Dra. Gabriela Castaño Meneses y al Dr. Jaime Zúñiga, por tenderme la mano y haberme asesorado en estadística.

A la M. en C. Jazmín Aguilar Medina, cuyos comentarios en la tesis fueron muy importantes y por su compañía en las salidas al campo.

A la laboratorista Laboratorio de Ecología Química Adriana Pérez Salas quien ayudó con la recolección de muestras.

Al Biól. Inti Burgos Hidalgo, quien se ha tomado tiempo para supervisar este trabajo, cuyos comentarios fueron muy importantes para mi tesis.

A la M. en C. Verónica Aguilar, por ser accesible y resolver mis dudas sobre SIG, y haber hecho posible una de las salidas al campo en la que tomé muestras.

Al Dr. Víctor Ávila Akerberg, quien me ha ayudado con las dudas surgidas de la tesis, por sus interesantes conversaciones en el laboratorio y por su buen humor.

A todos los profesores, compañeros, amigos y familiares involucrados, por tener paciencia.
¡Gracias!

INDICE

RESUMEN

I. INTRODUCCIÓN 1

I.1 Marco teórico 1

I.1.1 Servicios ecosistémicos ¿Qué son? 1

I.1.2 El agua y los servicios hidrológicos 3

I.1.3 Evaluación de la calidad del agua 6

I.2 Justificación y Objetivos 12

I.3 Antecedentes 13

II. ZONA DE ESTUDIO 14

II.1 Área natural 14

II.1.1 Características abióticas 14

II.1.2 Características bióticas 17

II.2 Zona urbana 18

III. MÉTODO 21

III.1 Selección de sitios de muestreo 21

III.2 Análisis de parámetros 21

III.2.1 Parámetros *in situ* y fisicoquímicos 21

III.2.2 Determinación de sólidos 22

III.2.3 Determinación de carbono 26

III.3 Análisis estadístico 27

III.4 Análisis de impulsores de cambio y servicios hidrológicos 28

IV. RESULTADOS 29

IV.1 Parámetros fisicoquímicos *in situ* 29

IV.2 Sólidos y carbono 31

IV.3 Análisis bacteriológicos 37

IV.4 Análisis multivariado 38

IV.5 Servicios ecosistémicos y calidad del agua 39

V. DISCUSIÓN 43

V.1 Los sólidos y parámetros fisicoquímicos *in situ* 43

V.2 Sólidos y carbono 46

V.3 Análisis bacteriológicos 48

V.4 Servicios hidrológicos e impulsores de cambio 49

VI. CONCLUSIONES 54

VII. LITERATURA CITADA 55

ANEXO I 61

ANEXO II 62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Clasificación de los servicios ecosistémicos de acuerdo al MEA (2005).....	2
Figura 2.	Localización de la zona natural de la Cuenca del río Magdalena, D.F.....	15
Figura 3.	Las comunidades vegetales de la Cuenca del río Magdalena, D.F.....	19
Figura 4.	Metodología general para evaluar la calidad del agua como servicio ecosistémico	22
Figura 5.	Sitios de muestreo de agua en el río Magdalena, D.F.....	23
Figura 6.	Temperatura promedio (°C) de los sitios de muestreo en temporada de lluvias y secas en el río Magdalena, D.F.....	30
Figura 7.	Valores de pH promedio en los sitios de muestreo en temporada de lluvias y secas en el río Magdalena, D.F.....	30
Figura 8.	Conductividad promedio ($\mu\text{S}/\text{cm}$) en los sitios de muestreo en temporada de lluvias y secas en el río Magdalena, D.F.....	31
Figura 9.	Oxígeno disuelto promedio (mg/L) en los sitios de muestreo en temporada de secas y lluvias en el río Magdalena, D.F.....	32
Figura 10.	Salinidad promedio (ups) en los sitios de muestreo en temporada de secas y lluvias en el río Magdalena, D.F.....	33
Figura 11.	Sólidos suspendidos promedio (mg/L) de los sitios de muestreo en temporada de secas y lluvias en el río Magdalena, D.F.....	33
Figura 12.	Sólidos disueltos promedio (mg/L) en los sitios de muestreo en temporada de lluvias y de secas en el río Magdalena, D.F.....	34
Figura 13.	Puntos de muestreo con colores de calidad del agua de acuerdo a los sólidos suspendidos totales.....	35
Figura 14.	Carbono orgánico total promedio (mg/L) en los sitios de muestreo en temporada de secas y lluvias en el río Magdalena.	36
Figura 15.	Carbono inorgánico promedio (mg/L) en los sitios de muestreo en temporada de lluvias y secas en el río Magdalena.	37
Figura 16.	Parámetros bacteriológicos promedio (UFC/100 ml) de los sitios de muestreo en temporada de secas y lluvias en el río Magdalena, D.F.....	38
Figura 17.	Gráfica de agrupaciones de los sitios de muestreo, área natural (AN) y zona urbana (ZU).	40
Figura 18.	La influencia de la calidad del agua en otros servicios hidrológicos y viceversa.	42

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Servicios ecosistémicos de corte hidrológico.....	3
Tabla 2.	Normas Oficiales Mexicanas y los límites máximos permisibles en materia de agua.	11
Tabla 3.	Colores indicadores de la calidad del agua de acuerdo a la cantidad de sólidos suspendidos totales (mg/L).	26
Tabla 4	Parámetros fisicoquímicos promedio determinados <i>in situ</i>	29
Tabla 5.	Sólidos y carbono promedio en el río Magdalena.	32
Tabla 6.	Varianza total explicada por tres factores extraídos.....	39
Tabla 7.	Análisis de correlación de Spearman.....	39
Tabla 8	Servicios ecosistémicos relacionados con la calidad del agua y sus impulsores de cambio.....	41
Tabla 9.	Límites máximos permisibles de sólidos suspendidos de acuerdo a su uso.	47
Tabla 10.	Coefficiente CF/EF para lluvias y secas en los sitios de muestreo del río Magdalena.	48
Tabla 11.	Características de los sitios de muestreo relacionadas con la calidad del agua.	49

LISTA DE ABREVIATURAS

ACP	Análisis de componentes principales
AN	Área natural
ANCOVA	Análisis de covarianza
APHA	American Public Health Association
CF	Coliformes fecales
CI	Carbono inorgánico
CO	Carbono orgánico
CRM	Cuenca del río Magdalena
CT	Carbono total
EF	Enterococos fecales
MEA	Millennium Ecosystem Assessment
NOM	Norma Oficial Mexicana
OD	Oxígeno disuelto
SDT	Sólidos disueltos totales
SE	Servicios ecosistémicos
SEh	Servicios ecosistémicos hidrológicos
SST	Sólidos suspendidos totales
ST	Sólidos totales
ZU	Zona urbana

RESUMEN

Los servicios ecosistémicos son los beneficios que los humanos obtienen de los ecosistemas, los que se relacionan con el agua se denominan servicios de corte hidrológico, y son generados por los ecosistemas terrestres. La calidad del agua es un servicio hidrológico muy importante porque de él depende la subsistencia de los seres vivos. Los sólidos son parámetros estándar en las valoraciones técnicas de calidad del agua, afectan en gran medida la dinámica del ecosistema acuático y sin embargo son frecuentemente sustituidos por mediciones de turbidez. Se evaluó la calidad del agua en el cauce principal del río Magdalena, D.F. durante el ciclo anual 2009. Se cuantificaron los sólidos, el carbono y parámetros fisicoquímicos medidos *in situ* en muestras de agua tomadas desde el nacimiento del río hasta Viveros de Coyoacán en la zona urbana. La información sobre calidad del agua se integró con el tipo de bosque, los servicios ecosistémicos generados y los impulsores de cambio.

Los resultados reflejaron un aumento de sólidos y carbono a partir de la parte media de la cuenca debido a una mayor influencia humana en dicha zona. Se rebasaron las normas oficiales mexicanas para sólidos en los últimos sitios de la zona urbana. No se encontraron diferencias significativas entre las épocas de lluvias y secas para ningún parámetro, posiblemente debido a una escasa precipitación durante los meses muestreados para lluvias. Los impulsores de cambio asociados a la calidad del agua más importantes fueron las descargas de aguas residuales, el crecimiento de la mancha urbana y las actividades de recreación no controladas. No se considera una amenaza crítica la agricultura, por su menor impacto. Todos los servicios culturales se encuentran afectados en la zona urbana.

Para mantener los servicios ecosistémico hidrológicos de la cuenca, tienen manejarse adecuadamente los bosques en el área natural, y rehabilitar al río en la zona baja y urbana, es necesario fomentar mediante talleres de educación ambiental una cultura de recreación no contaminante. Se propone la instalación de nuevas plantas de tratamiento a lo largo de la zona urbana.

Palabras clave: Servicios ecosistémicos hidrológicos, sólidos suspendidos, sólidos disueltos.

INTRODUCCIÓN

I.1 Marco teórico

I.1.1 Servicios Ecosistémicos ¿Qué son?

El concepto de servicios ecosistémicos (SE) surgió en los años 60 y resalta la relación del ser humano con su entorno natural (Daily *et al.*, 1997; MEA, 2005; Almeida *et al.*, 2007; Balvanera y Cotler, 2007). Todas las definiciones de SE propuestas hasta ahora implican el bienestar humano y a los ecosistemas como proveedores principales dichos servicios (Constanza *et al.*, 1997; Daily, 1997; De Groot, *et al.*, 2002; Kremen, 2005; Boyd y Banzaf, 2007; Dale y Polasky, 2007; Quétier *et al.* 2007; Paterson y Coelho, 2009). No obstante, una definición sencilla y ampliamente usada es la del *Millennium Ecosystem Assessment* (MEA), que concibe a los SE como *los beneficios que los seres humanos obtienen de los ecosistemas* (MEA, 2005). El MEA es un informe mundial solicitado por los gobiernos a través de convenciones internacionales; dada la creciente preocupación por la degradación de los ecosistemas (Mace, 2008), es el producto del trabajo de más de 1300 científicos de 95 países (Fisher *et al.*, 2009).

Clasificación

Dado que los SE están relacionados entre sí y con los procesos de los que se derivan (Daily, 1997), han surgido diversas clasificaciones. Se han realizado intentos para generar una clasificación universal, hasta ahora sin éxito (Fisher *et al.*, 2009). La clasificación del MEA (2005) es una de las más usadas y es la que se tomará en cuenta en este trabajo, por su sencillez y porque es la más adecuada para propósitos de gestión ambiental (Figura 1).

Asimismo, existen factores que afectan a los ecosistemas y por lo tanto a los servicios que proporcionan. Estos son fuerzas naturales o inducidas y se denominan impulsores de cambio; se definen como *cualquier factor natural o antropogénico, que causa un cambio directo o indirecto al ecosistema*, y por ende se afecta el otorgamiento de SE (MEA, 2005).

Daily (1997) considera entre los impulsores de cambio directos a la construcción de presas y diques, el cambio de uso de suelo, el escurrimiento de fertilizantes a los cuerpos de agua, la toma de agua indiscriminada, la introducción de especies exóticas, la contaminación, la ganadería, entre otros.

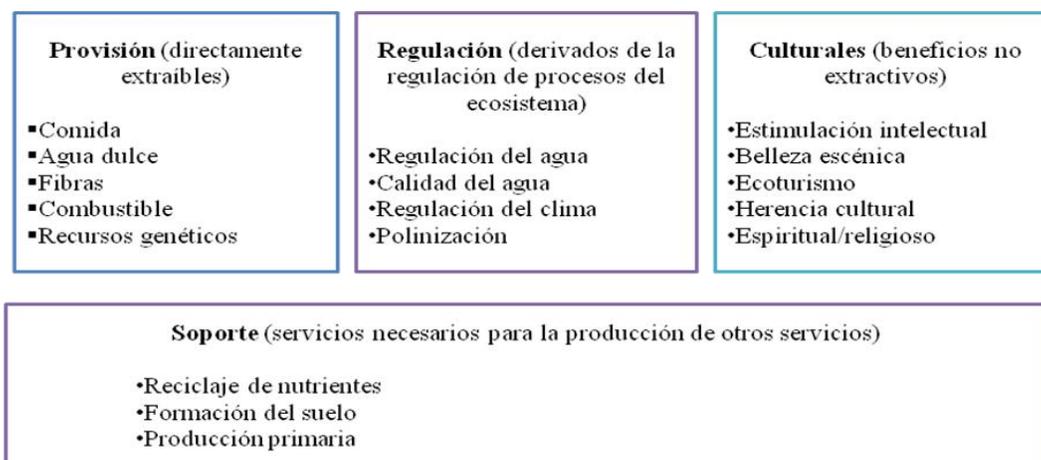


Figura 1. Clasificación de los servicios ecosistémicos de acuerdo al MEA (2005).

Ejemplos de impulsores de cambio indirectos son el aumento de la población, los subsidios a la producción, los avances tecnológicos, factores socioeconómicos y políticos, las fallas de mercado y la falta de educación ambiental (MEA, 2005; Carpenter *et al.*, 2008). De acuerdo al MEA (2005), 60% (16 de 24) de los SE evaluados han sido degradados o usados de manera no sustentable.

La intervención humana puede acrecentar la provisión de algunos servicios a costa de otros. Por ejemplo, gracias a la agricultura se ha incrementado el aprovechamiento de los servicios de extracción directa y algunos de regulación como la captura de carbono (Dale y Polasky, 2007). Las consecuencias negativas de la agricultura son la disminución de la calidad del agua, la homogenización del paisaje, y la compactación y erosión de la tierra (MEA, 2005).

Los SE son estudiados desde otras perspectivas además de la ecológica; la valoración económica es una rama en rápido desarrollo (Constanza *et al.*, 1997; James *et al.*, 2001; De Groot *et al.*, 2002; Turner *et al.*, 2003; En Chee, 2004; Boyd y Banzaf, 2007; Meynard *et al.*, 2007; Swinton *et al.*, 2007; Wunder *et al.*, 2007; Kumar y Kumar, 2008), y el componente social ha cobrado importancia y se ha incorporado a la investigación; pues son los seres humanos los que hacen uso de los ecosistemas (Castillo *et al.*, 2005).

I.1.2 El agua y los servicios hidrológicos

Los SE relacionados con el agua se conocen como servicios de corte hidrológico (SEh); pero son generados por ecosistemas terrestres (Brauman *et al.*, 2007). Todos los componentes del ecosistema tienen influencia en la generación de dichos servicios: desde los microorganismos y productores primarios hasta los consumidores secundarios y los elementos abióticos.

Los SEh ayudan a que se lleven a cabo las actividades domésticas, agrícolas e industriales; con la provisión de agua como uso directo o indirecto (Saldaña, 2008). Los diferentes usos del agua como SE se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Servicios ecosistémicos de corte hidrológico

TIPO DE SERVICIO	SERVICIO ECOSISTÉMICO
Provisión	<ul style="list-style-type: none">• Agua para beber• Agua para usos domésticos• Aseo personal• Generación de energía termoeléctrica• Usos agrícolas (ej., riego)• Usos industriales (ej., enfriamiento y lavado)• Usos científicos (ej., lavado de material)• Generación de energía hidroeléctrica• Transporte
Regulación	<ul style="list-style-type: none">• Mitigación de inundaciones• Dilución de sustancias• Regulación del ciclo hídrico• Sedimentación en cuerpos de agua• Prevención de salinización de aguas subterráneas
Culturales	<ul style="list-style-type: none">• Recreación y turismo• Belleza escénica
Soporte	<ul style="list-style-type: none">• Bienestar y estimulación intelectual• Fertilidad el suelo• Ciclo hídrico• Creación de hábitat para fauna acuática

Fuente: modificado de Daily, 1997; Brauman *et al.*, 2007.

La generación de SEh está en función de diversas condiciones relacionadas con la cantidad y calidad del recurso agua, a continuación se explica cada una de ellas.

Cantidad

La cantidad de agua es uno de los elementos que determinan su disponibilidad. En el planeta existen 1435 millones de km³ de agua; de éstos sólo 35 son de agua dulce (Simmons, 1982; Carabias y Landa, 2005). Se estima que el 75% del agua dulce se concentra en casquetes polares y glaciares, 21% en el subsuelo y el 4% que resta corresponde a cuerpos de agua superficial (Carabias y Landa, 2005; CONAGUA, 2008). Aun así, el agua aprovechable para consumo humano es del 1% (200,000 km³) y la mayor parte proviene del subsuelo (CONAGUA, 2008).

En México, hay una disponibilidad media total de 476 km³ (Carabias y Landa, 2005). Pero no se encuentra distribuida homogéneamente en el territorio nacional. La parte del Golfo, y el suroeste de México tienen grandes cantidades de cuerpos de agua y precipitación anual elevada; mientras que el norte del país es árido y semiárido (Gutiérrez, 2007). Ésta última zona es en donde se realizan más actividades productivas (Carabias y Landa, 2005), y en donde agua es un recurso limitado (De la Lanza, 2007; CONAGUA, 2008).

La distribución diferencial del agua se debe principalmente a factores biofísicos; dado que México tiene una compleja historia geológica, una accidentada orografía y es la zona de transición de dos zonas biogeográficas (neártica y neotropical), se han generado una gran variedad de climas y biodiversidad vegetal; la cual está fuertemente asociada con la retención de agua en el ecosistema, su infiltración y reciclaje (Carabias *et al.*, 1994).

Localización y distribución

La vegetación favorece la infiltración de agua mediante la porosidad creada por sus raíces en el suelo y crea un soporte que evita que éste se disgregue. Son consideradas amortiguadores porque retienen las gotas de lluvia, cortan el viento y filtran contaminantes (De la Lanza, 2007; Brauman *et al.*, 2007).

El relieve es otro factor que controla el escurrimiento (Saldaña, 2008). Dadas las geoformas, pendiente, exposición y altitud de un sitio, hay diferente proporción de cuerpos de agua subterránea y superficial (Carabias *et al.*, 1994).

La permeabilidad de la roca y las características edáficas (tamaño de grano, cantidad de materia orgánica y iones asociados) determinan la velocidad de infiltración al acuífero.

(Connell, 2005). Por otro lado, la ganadería y compactación del suelo, disminuyen el buen drenaje del agua y aumentan la erosión (Chang, 2006).

En la ciudad de México, el 70% del agua consumida proviene de aguas subterráneas, y el 30% restante de agua superficial (Mazari *et al.*, 1999). Los bosques protegen al suelo de la erosión y de la pérdida de nutrientes, además de aumentar la tasa de infiltración al subsuelo (De la Lanza, 2007).

Disponibilidad

El término se refiere al momento en el que el agua puede ser aprovechada. Esto depende tanto de su distribución temporal y espacial, como del sitio de interés (CONAGUA, 2008). La precipitación por ejemplo, presenta variaciones estacionales en todo el mundo (Brauman *et al.*, 2007). La disponibilidad de agua *per cápita* en México ha disminuido de 18035 m³/hab/año en 1950 a tan sólo 4312 m³/hab/año en 2007 (CONAGUA, 2008), lo que ha propiciado su extracción de acuíferos (De la Lanza, 2007).

Los factores que intervienen en la disponibilidad del agua son principalmente los cambios de uso de suelo y la destrucción de la cobertura boscosa original, que llevan a la disminución en la precipitación y aumento en la compactación del suelo (Chang, 2006). El ciclo hídrico es uno de los SEh que no tiene valor monetario, y sin embargo es extremadamente importante pues regula la temporalidad y estacionalidad del agua en un ecosistema (Meynard *et al.*, 2007).

Calidad

Se define como las características físicas, químicas y biológicas del agua en relación a su uso específico (USDA, 1996; López, 2008). Está asociada con la disponibilidad, el agua no puede ser aprovechada si se encuentra contaminada (Carabias y Landa, 2005; Brauman *et al.*, 2007).

La contaminación se define como la introducción de sustancias que en suficiente concentración, vuelven al agua indeseable para un uso dado (USDA, 1996).

Los ecosistemas terrestres inciden en la calidad de agua, añadiendo o removiendo contaminantes de ella durante largos periodos de tiempo. La vegetación, el suelo y los microorganismos atrapan algunos contaminantes, los transforman bioquímicamente y

disminuyen la contaminación. A esta respuesta del ecosistema se conoce como resiliencia (Brauman *et al.*, 2007).

La calidad del agua puede evaluarse a partir de diversos parámetros. En México se utiliza un índice de calidad del agua (ICA) propuesto por CONAGUA (2008). Éste es un valor numérico que indica el estado actual del agua al momento de su análisis, y su posible uso en función de dicho valor (Flores, 2008). El ICA en México considera doce parámetros: temperatura, oxígeno disuelto, pH, conductividad, turbidez, demanda bioquímica de oxígeno, presencia de grasas y aceites, coliformes totales, coliformes fecales, nitrógeno total, fósforo total y sólidos suspendidos totales. Abarca un intervalo de 0-100%, en donde el 0% corresponde a agua altamente contaminada, y el 100% a agua de excelente calidad. Únicamente puede aplicarse a cuerpos de agua dulce (Flores, 2008).

La flora y fauna responden de modo específico a la contaminación y pueden servir como indicadores complementarios a los análisis químicos (Mason, 1984). Algunas especies de algas se han reportado como bioindicadoras de sustancias de interés (Bojorge-García, 2006).

La mala calidad del agua es un problema central que tiene implicaciones para la salud, y el cual suele ignorarse debido a que la atención está dirigida a los problemas en la cantidad de agua (Tortajada *et al.*, 2004). De un total de 535 cuerpos de agua en el país, únicamente el 5% son de excelente calidad y el resto presenta diferentes niveles de contaminación (CONAGUA, 2008). La evaluación de la calidad del agua no sólo es importante, sino que determina la provisión de SEh, y otros servicios asociados.

I.1.3 Evaluación de la calidad del agua

El crecimiento de la mancha urbana y las actividades que se desempeñan en ella disminuyen la calidad de los recursos hidrológicos (SMA-GDF, 2008). Se describen a continuación los parámetros específicos que en conjunto evalúan la calidad del recurso.

Temperatura

La temperatura junto con la presión, determinan el estado de agregación del agua (Chang, 2006). Su calor específico es de 1 cal/°C/g, que disminuye con la salinidad (Sandoval, 2008).

La temperatura afecta al movimiento de las moléculas, las dinámicas de flujo, las constantes de saturación de gases disueltos y las tasas metabólicas de los seres vivos (Figueruelo y Marino, 2001; Connell, 2005). Las altas temperaturas pueden provocar contaminación térmica (Figueruelo y Marino, 2001). Y disminución en la solubilidad de gases como O₂ y CO₂, incrementando la demanda de oxígeno (DO) (Weiner, 2008). En particular, la temperatura de los ríos fluctúa espacial y temporalmente debido a las corrientes (Heuer y Lamberti, 2007).

pH

Es la medida de la concentración de iones (H⁺) en una solución acuosa. Dichos iones surgen de la disociación de las moléculas de agua u otras moléculas disueltas que contengan hidrógeno (Weiner, 2008). El pH puede ser alterado por la pérdida o ganancia de CO₂ disuelto, o la oxidación de otros compuestos disueltos como el hierro (Weiner, 2008). Por eso la medición de éste parámetro es más confiable cuando se realiza *in situ* (Connell, 2005).

En los ecosistemas acuáticos naturales, el pH de aguas superficiales y subterráneas oscila entre 6.5-8.5 (Sandoval, 2008; Wetzel, 2001). No obstante si el suelo y estrato mineral son alcalinos le confieren una naturaleza similar al agua (Manahan, 2001). La acidez puede inducirse por contaminación de residuos mineros, actividad volcánica y/o lluvia ácida (Chang, 2006).

Conductividad

Se define como la capacidad de una sustancia de conducir una corriente eléctrica. Ésta depende de la concentración de iones disueltos y la temperatura del agua (Connell, 2005). La conductividad y la alcalinidad pueden expresar el grado de mineralización del agua, el cual está relacionado con la productividad primaria. Éste parámetro actúa como indicador de su estado trófico (Sandoval, 2008), y puede establecer si el agua es adecuada para la preparación de comida o para irrigación (Chang, 2006).

Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto (OD) comúnmente se expresa en mg/L. Se disuelve en agua por medio de su difusión con el aire. La solubilidad del oxígeno disminuye proporcionalmente con la

temperatura, y aumenta con la presión atmosférica y las sales disueltas en el agua, por ende a menor altura mayor solubilidad de oxígeno.

La cantidad de OD se agota con la respiración de los organismos acuáticos, la degradación de materia orgánica o restos flotantes que impiden el intercambio gaseoso y procesos de fotosíntesis (Heuer y Lamberti, 2007). Sin embargo, el flujo de corriente del río, la acción del viento, la mezcla con la precipitación, las inundaciones y la actividad fotosintética regeneran el oxígeno consumido (Chang, 2006).

Parámetros bacteriológicos

Los indicadores biológicos de la calidad del agua son bacterias y otros microorganismos asociados a los desechos que pueden causar de enfermedades (Monges, 2009). Las bacterias usualmente estudiadas son las coliformes fecales (CF) y los enterococos fecales (EF). Las primeras son un subgrupo de las coliformes totales, y están presentes en el intestino de animales homeotermos. La concentración de éste grupo de bacterias es proporcional a la contaminación por materia fecal (Mazari *et al.*, 1999).

Los EF son bacterias esféricas, anaerobias facultativas y al igual que las CF, habitan en la flora intestinal de animales homeotermos. Son resistentes a condiciones ambientales adversas, y también se les asocia a contaminación por heces (Monges, 2009).

Los sólidos y su impacto en el ecosistema

El término “sólidos” se refiere a la materia suspendida y/o disuelta, orgánica y/o inorgánica en agua o aguas residuales (APHA, 2005). Se expresan como masa (mg) o concentración (mgL^{-1}) presente en el agua (Bilotta y Brazier, 2008). Derivan de aguas residuales domésticas, industriales y comerciales; y de la disgregación del suelo. Se dividen en sólidos suspendidos (SST) y sólidos disueltos (SDT) dependiendo de su tamaño. Entre los efectos que tienen en el agua se encuentra la disminución del oxígeno y el daño a la vida acuática (Manahan, 2001).

El aumento en las cantidades normales de SST incrementa la turbidez y disminuye la penetración de luz y con ella la tasa de fotosíntesis. El arrastre de sólidos causa daños mecánicos a los órganos fotosintéticos de los productores primarios. El incremento de la turbidez obstruye la visibilidad de la fauna acuática, impidiendo que cacen eficientemente o los vuelve vulnerables a ser depredados (Bilotta y Brazier, 2008).

Los SST forman una película en el agua que absorbe la radiación solar e incrementa la temperatura del agua superficial (Chang, 2006). En todos los casos disminuye el OD (Dunne y Leopold, 1978).

Los SST se acumulan en las branquias de los peces y reducen sus tasas de crecimiento; la resistencia a enfermedades y el adecuado desarrollo de huevos y larvas. Bloquean los aparatos bucales de insectos, moluscos y crustáceos (Bilotta y Brazier, 2008). Si los sólidos se asientan en el fondo del cuerpo de agua, sofocan a las larvas de insectos y peces y al ocupar los huecos entre las rocas abaten los hogares de otras formas de vida (Dunne y Leopold, 1978).

Los SDT producen mal sabor, mayor dureza y pueden tener efecto laxante (Bilotta y Brazier, 2008). Fuera de los ecosistemas, los sólidos afectan a las industrias, tapando tuberías y maquinaria. El agua altamente mineralizada es inadecuada para aplicaciones industriales.

Dado lo anterior, la presencia de sólidos es importante y cuantificarlos proporciona información adicional sobre las consecuencias para el ecosistema.

Factores que afectan a los sólidos suspendidos totales

La velocidad de flujo del cuerpo de agua es un factor determinante para las concentraciones de SST. Los flujos rápidos acarrear partículas y sedimento de mayor tamaño de grano. Las lluvias intensas propician el arrastre de arena, limos, arcilla y materia orgánica. Si la dirección de la corriente del agua cambia o la velocidad aumenta, la materia asentada en el fondo puede re-suspenderse (Dunne y Leopold, 1978).

Asimismo, la erosión de la tierra y las descargas de aguas residuales añaden SST; los organismos en descomposición o sus secreciones, añaden sólidos también (Bilotta y Brazier, 2008). Se encuentran fuertemente relacionados con el carbono orgánico, el cual está constituido por compuestos orgánicos oxidados en procesos químico-biológicos (Sandoval, 2008). La medición de carbono complementa al estudio de los sólidos.

Factores que afectan a los sólidos disueltos totales

Las rocas y el tipo de suelo en el que se encuentra inmerso el río son dos de los factores más importantes que influyen en la presencia de SDT; ciertos tipos de roca se disuelven fácilmente

y liberan iones al agua. Los fertilizantes arrojados directa o indirectamente se suman a la cantidad de SDT; especialmente si hay erosión (Bilotta y Brazier, 2008). A pesar de que los iones orgánicos son necesarios para la vida, los cambios en sus concentraciones resultan perjudiciales porque la densidad del agua determina su flujo al interior de las células. Si las concentraciones de SDT cambian, el crecimiento y/o supervivencia de los organismos se condiciona (Dunne y Leopold, 1978). El carbono inorgánico está fuertemente relacionado con los SDT.

Relación del carbono con los sólidos

El carbono es de los elementos más abundantes de la Tierra (Simmons, 1982). Forma parte de los compuestos estructurales de los seres vivos y el suelo. Puede ser orgánico o inorgánico, ejemplos del primero son la materia orgánica y del segundo iones como el bicarbonato y el CO₂ (Barnes y Raymond, 2009). Dado que el carbono forma parte de la materia viva y no viva, se encuentra fuertemente relacionado con los sólidos, que pueden ser virtualmente cualquier material flotante o disuelto (Bilotta y Brazier, 2008), ello incluye partículas de suelo, restos de organismos, carbonatos desprendidos de las rocas, entre otros (APHA, 2005).

El problema de agua en México y como se evalúa la calidad.

Desde el siglo XX ha habido un mal manejo del agua en el Distrito Federal. Tan sólo en el valle de México, por sus condiciones climáticas, los recursos hídricos corresponden a menos de 1000 m³/hab/año lo que se considera una situación de estrés hídrico (SEMARNAT, 2008). La demanda de agua debido al incremento poblacional han llevado por una parte al incremento en la contaminación y por otra a la extracción intensiva de las fuentes subterráneas locales y externas (Jiménez y Marín, 2004).

En la actualidad, los requerimientos de agua para el abastecimiento de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México son de 72.5 m³s⁻¹, de los cuales, 72% provienen de los sistemas de agua subterránea de la propia cuenca, 18% del Sistema Cutzamala, 8% del río Lerma, y 2% de escurrimientos superficiales de la Cuenca del Valle de México (Jiménez y Marín, 2004).

Otro de los problemas serios es la calidad del agua, que se ha convertido en un tema de preocupación porque involucra la salud de la población (De la Lanza, 2007). Las principales normas oficiales mexicanas (NOM) en materia de calidad del agua se muestran en Tabla 2:

Tabla 2. Normas oficiales mexicanas y los límites máximos permisibles en materia de agua.

Norma Oficial Mexicana	Lo que dicta
NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1997)	Contaminantes en las descargas residuales en aguas y bienes nacionales.
NOM-002-SEMARNAT-1996 (DOF, 1998)	Contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.
NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF, 1998b)	Contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.
NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 2000)	Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano.

Fuente: Gutiérrez, 2007.

Parte de la demanda de agua superficial del Distrito Federal la satisface el río Magdalena, el único río limpio en su parte alta, y que se encuentra en el sur-poniente del Distrito Federal. La cuenca del río Magdalena (CRM) es una unidad fisiográfica en cuyo cauce principal se encuentra un río y afluentes que lo alimentan. La CRM provee múltiples SE (Almeida *et al.*, 2007). Sin embargo, en su parte baja presenta un gradual deterioro de calidad del agua, lo que afecta a otros servicios. El cauce principal del río Magdalena es el sitio en donde se centra este trabajo.

I.2 Justificación y Objetivos

El río Magdalena se considera el único río del Distrito Federal que aun no ha sido entubado y mantiene buena calidad del agua en su parte alta. Sin embargo, la parte del río que atraviesa la zona urbana tiene serios problemas de calidad, que tienen que ser resueltos para evitar que se pierdan los SE que aporta. Los SE son muy importantes para la supervivencia de los seres humanos (Daily *et al.*, 1997).

Aunque se han realizado numerosos estudios de calidad del agua en el río Magdalena (Bojorge-García, 2006; Flores, 2008; SMA-GDF, 2008; Monges, 2009; Rentería, 2009; Velázquez, 2009) ninguno ha contemplado la medición de sólidos y carbono a lo largo de todo el cauce del río, ni se han incluido a los SE como una de las variables afectadas por la calidad del agua. Además, la calidad del agua debe ser monitoreada cada año para observar si ha habido cambios y en dado caso establecer a que se deben.

Las ventajas del uso de sólidos como herramienta para evaluar la calidad, son su bajo costo y fácil realización, y que aportan información adicional a otros parámetros de calidad (Tchobanoglous, 2003). El carbono acompaña a la medición de sólidos, porque ambos se encuentran relacionados. El carbono disuelto de los ríos es una vía de transferencia lateral de carbono relacionada con el secuestro de CO₂ atmosférico y el ciclo global del carbono. Las alteraciones al carbono disuelto pueden afectar a la calidad del agua y se han relacionado con actividades agrícolas (Barnes y Raymond, 2009) u otros cambios de uso de suelo.

El objetivo de este trabajo fue evaluar la calidad del agua en el cauce principal del río Magdalena en temporada de lluvias (agosto-septiembre) y secas (marzo-abril) durante el 2009. Los objetivos particulares fueron:

1. Cuantificar los sólidos suspendidos (SST) y disueltos (SDT) en el río durante el ciclo anual 2009.
2. Determinar la cantidad de carbono total (CT), carbono orgánico total (CO) y carbono inorgánico (CI) en el río.
3. Analizar e interpretar los datos bacteriológicos y fisicoquímicos de los mismos sitios de muestreo generados durante el 2009.
4. Relacionar a los servicios ecosistémicos hidrológicos con la calidad del agua y sus posibles impulsores de cambio.

I.3 Antecedentes

Los trabajos en la CRM se remontan a mediados de siglo XX y tienen diferentes enfoques. Han aumentado rápidamente en los últimos 10 años y se encuentran orientados a la recuperación ambiental del bosque y del río. A continuación se resaltan los que se encuentran relacionados con la calidad del agua y/o sus SE, de mayor a menor antigüedad:

AUTOR	TRABAJO REALIZADO
Jujnovsky, 2006	Servicios ecosistémico relacionados con el recurso agua en la cuenca del río Magdalena, Distrito Federal, México.
Bojorge-García, 2006	Indicadores biológicos de la calidad del agua en el río Magdalena, D.F.
Gómez, 2007	Redefinición de los ríos de la Ciudad de México como solución hidráulica y urbana: caso de estudio río de la Magdalena.
Flores, 2008	Evaluación de la calidad del agua en el río Magdalena.
González, 2008	Modelación hidrológica como base para el pago por servicios ambientales en la microcuenca del río Magdalena, Distrito Federal.
SMA-GDF, 2008	Plan Maestro de Manejo Integral y Aprovechamiento Sustentable de la Cuenca del río Magdalena.
Monges, 2009	Calidad del agua como elemento integrador para la rehabilitación del río Magdalena, Distrito Federal.
Rentería, 2009	Diagnóstico de plaguicidas y fenoles como parte de la estrategia para la restauración del río Magdalena.
Velázquez, 2009	Propuesta de plantas de tratamiento para el saneamiento del río Magdalena
Ávila-Akerberg, 2009	Forest quality southwest Mexico City. Assessment towards ecological restoration of ecosystem services.

II. ZONA DE ESTUDIO

El cauce principal del río Magdalena tiene una longitud de 21.6 kilómetros, y se extiende desde su nacimiento en el Cerro Palma (a 3500 m) hasta el entronque con río Churubusco (Gómez, 2007; Santibañez, 2009). Atraviesa bosque y ciudad, y las condiciones ambientales en cada una son totalmente diferentes. El contexto socio-ambiental y los impulsores de cambio en ambas zonas tienen influencia en las características del agua que corre por el cauce. Por ello en este trabajo se toman en cuenta dos áreas principales: el área natural (AN) y la zona urbana (ZU).

II.1 Área natural

A ésta zona también se le denomina Cuenca del río Magdalena (CRM) o de forma popular “los Dinamos” (Ramos, 2008). Es una red hidrológica en el suroeste de la Ciudad de México; abarca las delegaciones Magdalena Contreras, Álvaro Obregón y Cuajimalpa y forma parte del Cinturón Neovolcánico Transmexicano. El río en esta sección es perenne de aguas limpias en una zona boscosa, y por tanto es considerado uno de los cuerpos de agua más importantes para el Distrito Federal (Ávila-Akerberg, 2004). Es considerado proveedor de varios SE (Almeida *et al.*, 2007), y un refugio de fitodiversidad, con cerca de 87 familias de plantas vasculares (Ávila-Akerberg *et al.*, 2008). El AN a su vez se divide en parte alta, media y baja, correspondiendo con las 3 comunidades vegetales identificadas, que se explicarán más adelante.

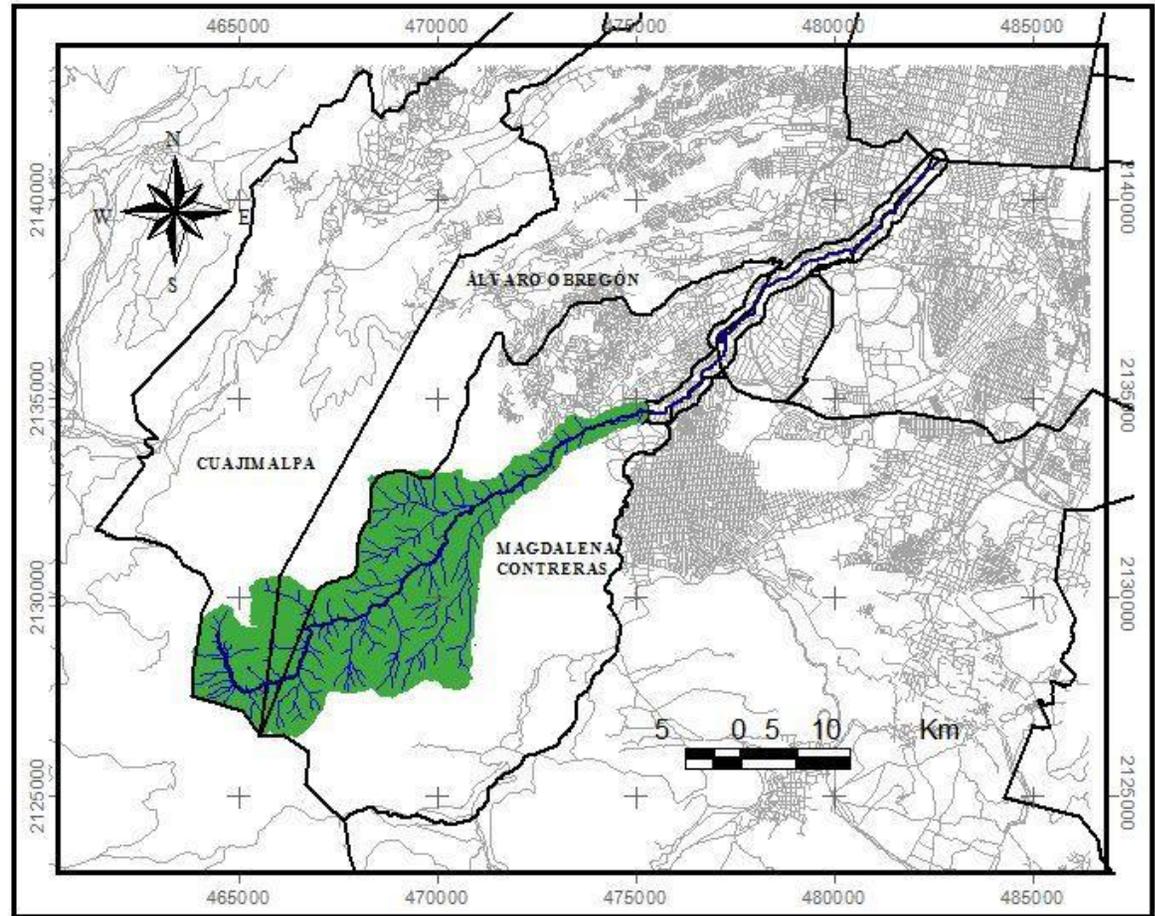
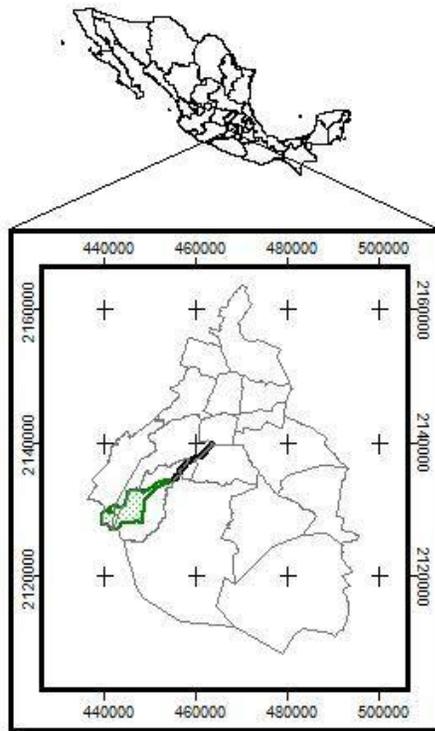
El AN de la CRM se localiza entre 99°14'50'' y 99°20'30'' N y 19°13'53'' y 19°18'12'' W. Limita al Norte con la Sierra de la Cruces, San Bartolo Ameyalco, Santa Rosa Xochiaca y el Desierto de los Leones; al Sur con el Ejido San Nicolás Totolapan y montes de la hacienda Eslava. Tiene una extensión aproximada de 2925 ha (Ávila-Akerberg, 2002). (Figura 2).

II.1.1 Características abióticas

Clima

Debido al relieve, existen dos tipos de climas predominantes: desde la zona urbana y hasta los 3100 msnm se presenta un clima templado sub-húmedo (Temperatura media anual 12-18°C), y de los 3100 a los 3800, clima semi-frío (Temperatura media anual 5-12°C), existe un régimen de lluvias en verano y la precipitación aumenta con la altitud (Dobler, 2010).

Dados los sistemas de circulación atmosférica, se presenta la época de lluvias o húmeda de junio a octubre, y la seca de abril a mayo (Dobler, 2010).



Cuenca del río Magdalena

- Área natural
- Cauce principal río Magdalena

Figura 2. Localización del área natural de la Cuenca del río Magdalena, D.F.

Hidrología

El río Magdalena nace en las faldas del cerro Palma, de sus 21.6 km de longitud, 13 km recorren los bosques de la cuenca alta (Santibañez, 2009). Los manantiales Cieneguillas, los Cuervos, San Miguel Ceresia, Tamascalco, San José, Potrero, Apapatxla, las Ventanas y Pericos son fuentes de alimentación para el río (Álvarez, 2000). En la parte baja los principales afluentes son el río Eslava, Texcalatlaco, Anzaldo y Guadalupe (Fernández, 1997).

La parte alta de la cuenca provee alrededor de $0.63 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$; lo que equivale al 50% de la demanda de agua superficial de la ciudad de México (Jujnovsky, 2006), similar a las estimaciones del PNUMA (2003). La dirección de flujo del agua subterránea es hacia la planicie, a partir de las Sierras Chichinautzin y de las Cruces.

En cuanto a calidad, en la parte alta se considera satisfactoria (Bojorge-García, 2002; Flores, 2008; Monges, 2009), y disminuye gradualmente, conforme el cauce del río entra en contacto con actividades humanas (Monges, 2009). El problema de contaminación que existe en la CRM se debe a descargas urbanas, desechos domésticos y agrícolas. Más del 50% de su cauce principal se encuentra contaminado (Velázquez, 2009).

Geología, tipo y usos de suelo

La CRM presenta gran complejidad geológica. Se reconocen varias etapas de evolución estratigráfica relacionadas con la formación del Valle de México (Ontiveros, 1980). Presenta múltiples fracturas a lo largo de la cuenca y el suelo es muy permeable. Su origen es volcánico: Andosol húmico; considerado fértil por su alta superficie específica, y se origina a partir de vidrios volcánicos (Fernández, 1997). En la parte media y baja de la cuenca se suma la presencia de litosoles arenosos y arcillosos. Existen estratos de distintas épocas geológicas y material ígneo extrusivo (Álvarez, 2000). Lo que hace al suelo de la CRM susceptible de erosión. La cantidad de materia orgánica es variable: de 1 a 47% (Jujnovsky, 2003). Los tipos de roca predominantes son andesitas y diacitas (Ontiveros, 1980; Álvarez, 2000).

Las actividades desarrolladas en la CRM incluyen ganadería, agricultura, piscicultura, recolecta de hongos y leña (Fernández, 1997; Acosta 2001; Ramos, 2008). El régimen de tenencia de la tierra es de tipo comunal y ejidal, lo que ha conllevado a litigios por las tierras (Fernández, 1997)

II.1.2 Características bióticas

Tipos de vegetación

Con el fin de facilitar el estudio de la CRM, se le dividió en tres comunidades vegetales principales, reconocidas por Ávila-Akerberg (2002) y Nava (2003) en zona baja (bosque mixto y de *Quercus* spp), media (bosque de *Abies religiosa*) y alta (bosque de *Pinus hartwegii*).

Zona alta: Bosque de *Pinus hartwegii*

El bosque de *P.hartwegii* corresponde a la parte más alta de la cuenca, de 3500-3850 msnm. Ocupa una extensión de 943 ha. Presentan suelos tipo andosol húmico y ocrico con 15-30% de materia orgánica y un pH de 4.1-4.5. Con profundidad menor a 40 cm. Es la comunidad con mayor permeabilidad de suelos (Jujnovsky, 2006). Aunque es la parte más alta de la cuenca, tiene menor precipitación que la parte media (Dobler, 2010), y abarca menor superficie con respecto a otras comunidades vegetales. La cobertura vegetal se encuentra más abierta que en la parte media (Galeana, 2008).

Los SE otorgados por el bosque de *P.hartwegii* son provisión de agua dulce, mantenimiento del suelo, y regulación de la erosión, regulación de la calidad del agua y escurrimiento sub-superficial y basal y captura de carbono (Jujnovsky, 2006).

Zona media: Bosque de *Abies religiosa*

El bosque de *A.religiosa* corresponde a la zona media, a 3000-3500 msnm. Es la comunidad más diversa de la zona de estudio y la más densa también (hasta 100% de cobertura) (Nava, 2006). Posee alta heterogeneidad ambiental a varias escalas (Santibañez, 2009), y es la de mayor extensión de las 3 comunidades, ocupando 1459 ha, que corresponde a un 40% de cobertura (Galeana, 2008). Los suelos de tipo Andosol, poseen de 15-30% de materia orgánica con una profundidad de 50 cm y pH de 4.6-5.1 (Jujnovsky, 2006).

Éste bosque convive con otras especies, principalmente *Pinus* y *Cupressus* (Nava, 2006). Genera los SE de provisión de agua dulce, provisión de alimento, almacén de carbono; control de la erosión, mantenimiento del suelo y control de masa (Jujnovsky, 2006).

Zona baja: Bosque mixto y de *Quercus* spp.

El bosque de *Quercus* spp es poco denso, con un dosel de 5.20 m (Nava, 2003). Se encuentra en la zona baja de la CRM, entre los 2570-3000 msnm. Tiene una extensión de 485 ha. Posee suelo tipo Andosol mezclado con litosoles y un pH de 5.2-6.1 (Jujnovsky, 2006). Se encuentra bajo influencia humana (Jujnovsky, 2003). Hay un contenido de materia orgánica de 4-8% y profundidad de 40 cm (Jujnosvsky, 2006).

Se generan diferentes servicios, pero es la más importante en cuanto a consumo de los mismos. Se hace hincapié en los servicios culturales entre los que destacan la belleza escénica, el ecoturismo y la recreación (Jujnosvsky, 2006). Las tres comunidades vegetales de la cuenca se aprecian en la Figura 3.

II.2 Zona urbana

Comienza a partir del pueblo de la Magdalena, después de la segunda planta potabilizadora, y termina en su entronque con río Churubusco. Se encuentra entre los 99°14'4.8'' N y 19°17'58.7'' W, y los 99°13'9.47'' N y 19°19'5.7'' W (Anexo I). De los 21.6 km totales que tiene el río casi la mitad se encuentran en la zona urbana. En toda la parte baja del río, el 70% ha sido entubado y sustituido por vialidades (Gómez, 2007).

Después de su incorporación a la zona urbana, los afluentes del río Magdalena son el sistema de drenaje y viviendas. Las corrientes hidrológicas como el río Eslava se encuentran tan contaminadas que se consideran descargas (Velázquez, 2009).

El crecimiento de la mancha urbana sobre el suelo de conservación, provoca un acelerado deterioro del río. Hay una mala regulación de los residuos sólidos y la población tira basura a los alrededores (SMA-GDF, 2008).

La obra de protección contra inundaciones más importante de la cuenca es la presa Anzaldo, en donde el río es entubado para posteriormente recorrer Av. Río Magdalena, que se convierte en Av. Del Río. Vuelve a estar a cielo abierto en Av. Universidad y viveros de Coyoacán, en donde entronca con río Churubusco.

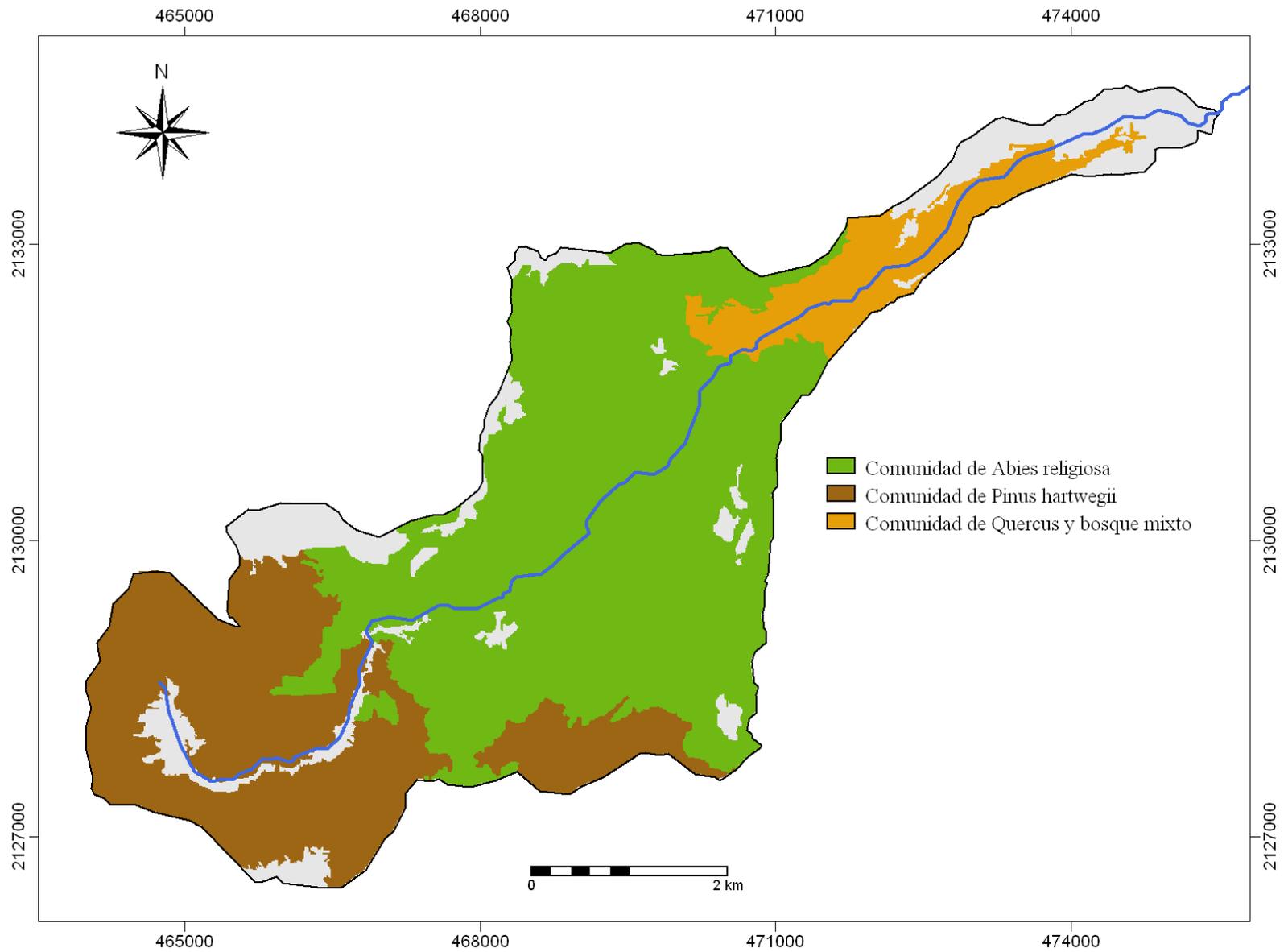


Figura 3. Las comunidades vegetales de la Cuenca del río Magdalena, D.F.

Elaboró: Carlos Dobler.

En cuanto a la vegetación urbana, Flores (en prensa), realizó un listado florístico desde la calle de Francisco Sosa hasta Viveros de Coyoacán y encontró diversas familias que constituyen a la vegetación ribereña, siendo las mejor representadas la familia Asteraceae, Cruciferae, Monocotiledonae, Solanaceae y Fabaceae. Las especies de árboles dominantes existentes hasta viveros de Coyoacán son *Fraxinus uhdei*, *Casuarina equisetifolia*, *Eucaliptus* sp y *Taxodium mucronatum*. Vázquez (en prensa) realizó otro listado desde la Cañada hasta la Av. Periférico, y reporta 78 especies agrupadas en 43 Familias, las mejor representadas en esta sección de la zona urbana son Asteraceae (13 spp), Brassicaceae (7 spp), Rosaceae (5 spp), Malvaceae y Solanaceae (3 spp) y las Familias Cupressaceae, Fabaceae, Myrtaceae, Olaceae, Polygonaceae, Salicaceae y Ulmaceae.

III. MÉTODO

III.1 Selección de sitios de muestreo

Se seleccionaron 12 sitios de muestreo a lo largo del cauce principal del río Magdalena, siete de los cuales pertenecen a la zona urbana y cinco al área natural (Anexo I, Figura 5). Los puntos de muestreo corresponden a los del Plan maestro de rescate al río Magdalena (SMA-GDF, 2008). Usar los mismos sitios permite hacer comparaciones posteriores y usarlas con fines de monitoreo de la calidad del agua en la zona.

La toma de las muestras se realizó de acuerdo a la NOM-014-SSA1-1993, la cual dicta los procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados (DOF, 1994), y la APHA (2005) que dicta que la muestra debe tomarse a $\frac{3}{4}$ partes del total de profundidad del río, en caso de no ser posible por accesibilidad, se toma de 15 a 30 cm de profundidad, con la boca del contenedor hacia abajo, en contra corriente y procurando no mover sedimentos de la orilla ni tomar la muestra de los bordes. Se tomaron muestras por triplicado en cada uno de los sitios, y se realizaron dos rondas de muestreo; una cada dos semanas. La toma de muestras se realizó durante el periodo de secas (marzo-abril 2009) y lluvias (agosto-septiembre 2009).

Las muestras se mantuvieron a baja temperatura en una hielera durante su transporte al laboratorio y se almacenaron en un refrigerador a 4°C hasta su análisis, el cual se realizó dentro de las 48 horas posteriores a la toma de la muestra, para evitar degradación de compuestos por acción microbiana. La Figura 4 muestra la metodología general para evaluar la calidad del agua mediante la cuantificación de sólidos.

III.2 Análisis de parámetros

III.2.1 Parámetros fisicoquímicos *in situ*.

Se midió la temperatura (°C), pH, conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$), sólidos disueltos totales (mgL^{-1}), oxígeno disuelto (mgL^{-1} y %), y salinidad (ups), con un detector multiparámetros (HACH Loveland, US).

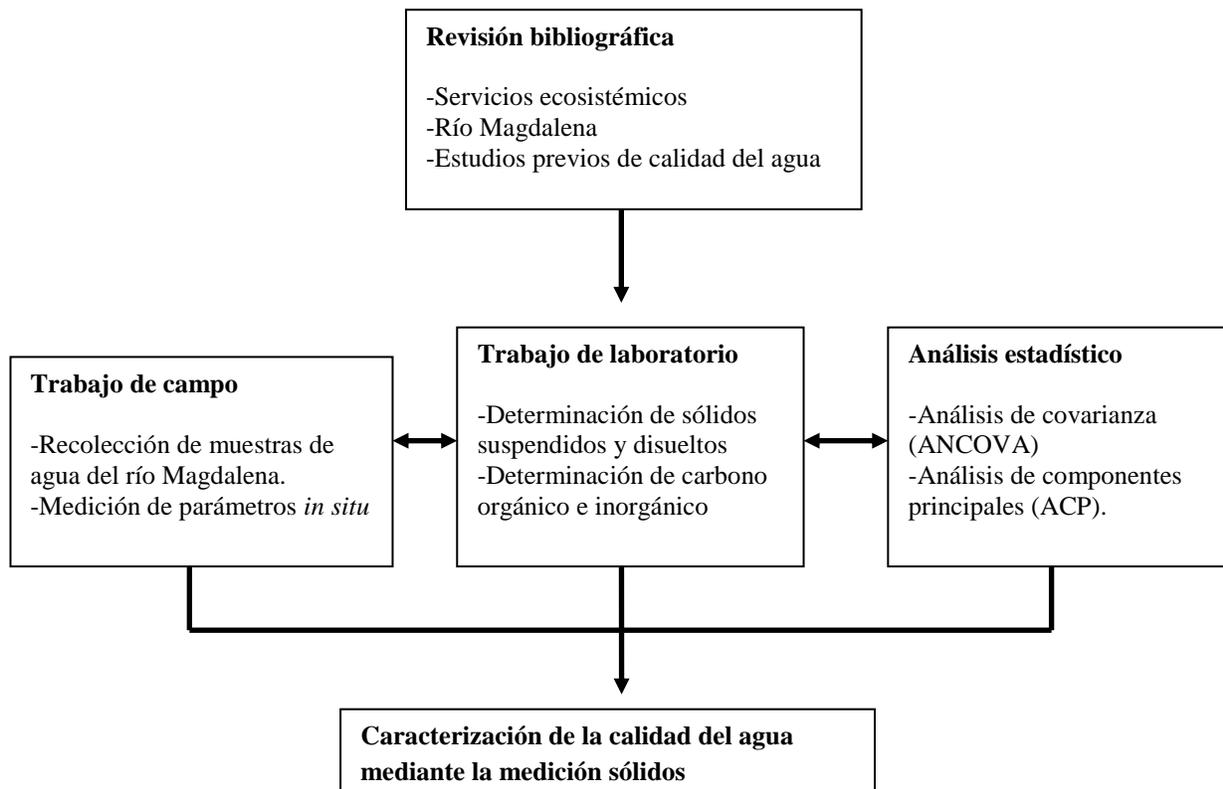


Figura 4. Metodología general para evaluar la calidad del agua como servicio ecosistémico.

III.2.2 Determinación de sólidos

Se realizó de acuerdo con la NMX-AA-034-SCFI-2001, la cual dicta en el análisis de agua, la determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas (DOF, 2002).

Para ello se utilizaron cápsulas de porcelana o crisoles, que fueron llevados a peso constante, que se define como el peso del crisol después de haber sido desecado a una temperatura constante (APHA, 2005). Dicho peso es estable y no está influenciado por factores como la humedad atmosférica. La determinación de cada muestra fue realizada por duplicado.

El término “sólidos totales” (ST) es empleado para referirse al material remanente en una muestra de agua que ha sido evaporada en un horno a una temperatura definida (APHA, 2005). Este valor abarca tanto sólidos disueltos como suspendidos.

Los “sólidos suspendidos totales” (SST) están constituidos por materia orgánica, sedimentable y/o coloidal retenidas en un elemento filtrante según la NMX-AA-034-SCFI-2001 (DOF, 2002). Su determinación se realiza por medio de una muestra homogenizada

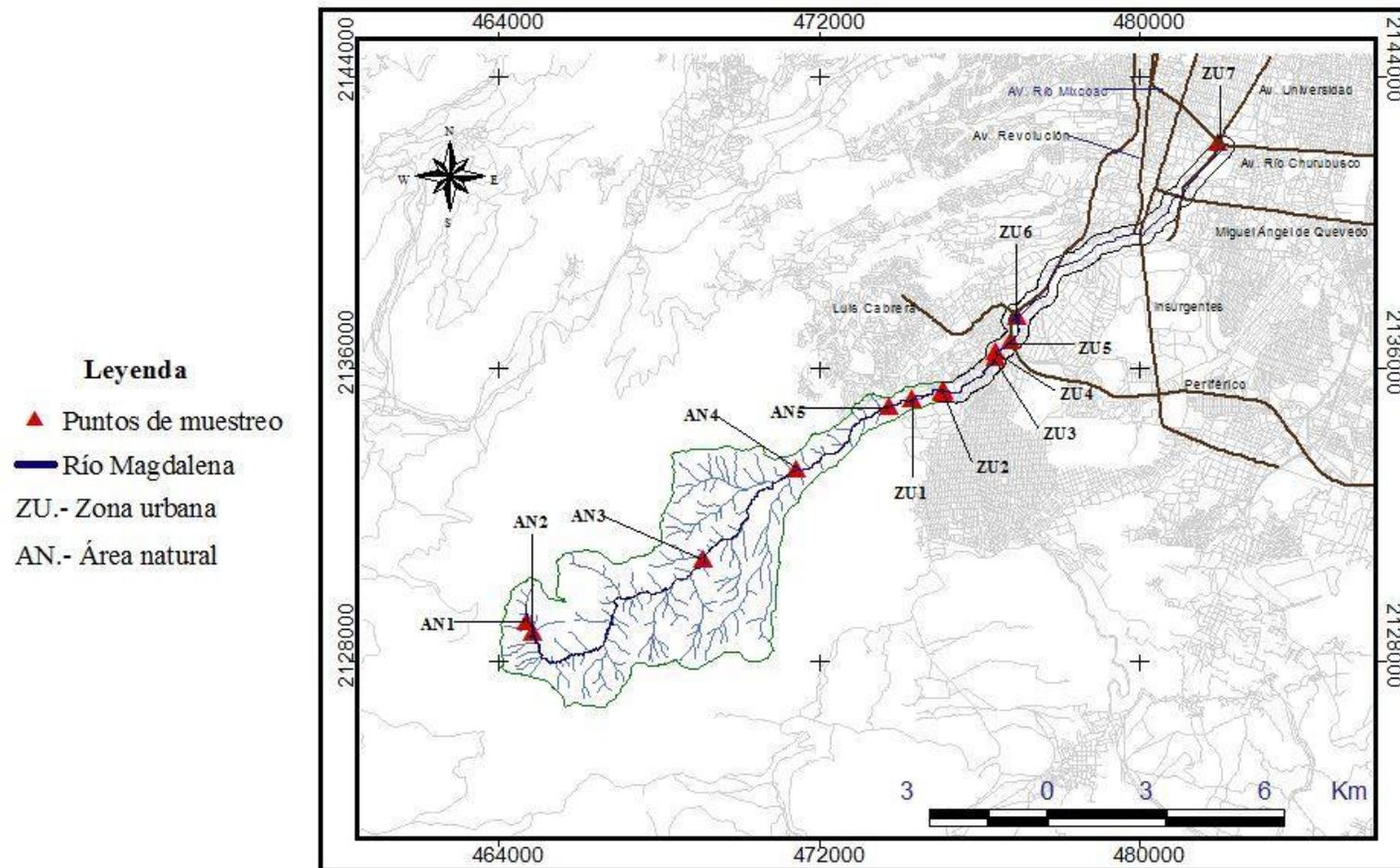


Figura 5. Sitios de muestreo de agua en el río Magdalena, D.F

que pasa a través de un filtro de fibra de vidrio (Tchobanoglous, 2003). Los SST comprenden una amplia gama de materia: limos, materia orgánica en descomposición, aguas residuales y desechos industriales (Bilotta y Brazier, 2008).

Los “sólidos disueltos totales” (SDT), se definen como la cantidad de material en el agua que puede pasar por un filtro de acuerdo a la NMX-AA-034-SCFI-2001 (DOF, 2002). El filtro debe tener un tamaño de poro de 2.0 μm o menor. Los SDT se componen de sales minerales, nutrientes, derivados de fertilizantes y plaguicidas. Ejemplos de SDT son carbonatos, sulfatos, bicarbonatos, cloro, fosfatos, calcio, magnesio, sodio, iones orgánicos, y otros (APHA, 2005).

Determinación de sólidos totales (ST)

- (1) Los crisoles se mantuvieron en un horno a 105-110°C durante dos horas. Se les dejó enfriar una hora en un desecador con microcápsulas de gel de sílice en la base, para evitar su rehidratación.
- (2) Se les pesó en una balanza analítica una vez enfriados. Éste procedimiento se realiza dos veces antes de obtener el peso final. La diferencia entre ambas medidas tiene que ser menor a 0.5 mg, y se promedian (DOF, 2002).
- (3) Se adicionaron 20 ml del agua muestreada a los crisoles, y se metieron al horno a una temperatura de 105-110°C durante 12 horas. Se dejaron enfriar en un desecador por una hora y se registró el peso final. La diferencia de pesos corresponde a la cantidad de ST. Sin embargo, para conocer la concentración exacta de acuerdo al volumen agregado, debe hacerse el siguiente cálculo (Ec. 1).

$$(Ec.1) \quad \mathbf{ST = ((Pf-Pi) * 1000)/V}$$

Donde:

ST= Sólidos totales (mg l^{-1})

Pf = Peso final, después de colocar la muestra de agua (mg)

Pi = Peso inicial de los crisoles limpios (mg)

V= Volumen de agua agregado a los crisoles (ml)

Determinación de sólidos suspendidos (SST)

- (1) Se utilizaron filtros de fibra de vidrio (Whatman 125 mm 934-AH) con un tamaño de poro de 1 μm . Cada filtro fue colocado dentro de un crisol y llevado al horno a 105-110°C durante dos horas, dejándolos enfriar en un desecador durante una hora.
- (2) Se midió el peso del crisol con el filtro y se repitió el procedimiento. La diferencia entre pesos debe ser menor a 0.5 mg (DOF, 2002).
- (3) Se colocó el filtro en un embudo de vidrio (Kimax o Pyrex), se humedeció con agua desionizada (Millipore) para que se adhiriera a las paredes del embudo, y se montó sobre una probeta de 1L. Se filtraron de 500 ml de agua, haciendo lavados con agua desionizada en caso requerido.
- (4) Una vez terminado el filtrado, se colocaron los filtros en sus crisoles correspondientes, y fueron llevados a 105-110°C en un horno durante 12 horas. Se dejaron enfriar en un desecador durante una hora y se midió el peso final en una balanza analítica. La diferencia de pesos corresponde a los SST. El cálculo para determinar la concentración exacta se encuentra en (Ec.2).

$$(Ec.2). \quad SST = ((Pf-Pi) * 1000) / V$$

Donde:

SST= Sólidos suspendidos totales (mgL^{-1})

Pf= Peso final, después del filtrado y secado en horno (mg)

Pi= Peso inicial crisol limpio a peso constante (mg)

V= Volumen de agua filtrado (ml)

La diferencia entre sólidos totales y suspendidos da como resultado a los sólidos disueltos (Ec.3).

$$(Ec. 3). \quad SDT = ST - SST$$

La clasificación de calidad de agua basada en SST de CONAGUA (2008) (Tabla 3). es general para todos los usos del agua y fue utilizada para determinar la calidad según los sólidos suspendidos.

Tabla 3. Colores indicadores de la calidad del agua de acuerdo a la cantidad de sólidos suspendidos totales (mg/L).

SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST)		
SST < 25	Excelente Clase de excepción, muy buena calidad.	AZUL
25 < SST > 75	Buena calidad Aguas superficiales con bajo contenido de sólidos suspendidos, generalmente en condiciones naturales. Favorece la conservación de comunidades acuáticas, y el riego agrícola irrestricto.	VERDE
75 < SST > 150	Aceptable Aguas superficiales con indicio de contaminación. Con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente. Condición regular para peces. Riego agrícola restringido.	AMARILLO
150 < SST > 400	Contaminada Aguas superficiales de mala calidad, con descargas de aguas residuales crudas. Agua con alto contenido de material suspendido.	NARANJA
SST > 400	Fuertemente contaminada Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales con alta carga de contaminante. Mala condición para peces.	ROJO

III.2.3 Determinación de carbono

Para conocer la cantidad de carbono total (CT) y carbono orgánico (CO) presente en las muestras, se tomaron de 30-40 ml de agua por cada sitio, y se mantuvieron en un refrigerador a -60°C hasta su análisis. Se mantienen a una temperatura bajo cero para evitar que los compuestos con carbono se degraden por acción bacteriana.

El equipo utilizado para determinar la concentración de CT y CO fue el TOC (*Total Carbon Analysis*) Apollo 9000, el cual basa sus determinaciones en la combustión a una temperatura de 680°C para convertir el carbono de una muestra a su estado de moléculas elementales (CO₂) (Apollo, 2003).

Para calibrar al equipo, se realizó una curva con una solución estándar. El reactivo estándar usado fue biftalato de potasio (1KOCOC₆H₄-2COOH). También es necesario el uso de un blanco (agua desionizada) para establecer una línea base de lectura. Las concentraciones empleadas abarcaron de 0-20 ppm. Se hicieron diluciones 1:10 de cada muestra, excepto las del

área natural por su bajo contenido de carbono. En el caso de haber hecho diluciones, el resultado debe ser recalculado al multiplicarse por el factor de dilución.

Para la obtención de los datos de CT, se inyecta una muestra en la mufla del equipo que es oxidada completamente a CO₂, desechando el agua como residuo. La cantidad de CO₂ es registrada por el detector del equipo y constituye la totalidad del carbono presente en una muestra. Para la obtención de CO, se acidifica la muestra con ácido fosfórico (H₃PO₄), llevándola a pH 3.

El equipo canaliza el CO directamente a la mufla y desecha el CI. Por diferencia CT-CO se conoce la cantidad de CI. La presencia de CI en el agua indica que hay carbonatos y bicarbonatos en ella, mientras que el CO es indicador de materia orgánica.

III.3 Análisis estadístico

Para comparar los resultados de lluvias y secas, se utilizó un análisis de covarianza (ANCOVA) de una vía con el paquete estadístico SPSS v.15. Ésta es una prueba estadística derivada del ANOVA, y es usado cuando existe algún factor en el experimento, además de los tratamientos, que puede estar afectando la variable de interés. Las variables cuantitativas que no son de la manipulación experimental directa, pero que tienen una influencia en la variable dependiente se consideran co-variables (Towend, 2006).

El ANCOVA corrige cualquier sesgo producido por las co-variables. La co-variable tomada en cuenta en éste trabajo es la altitud, porque tiene influencia en muchos de los parámetros fisicoquímicos, y es una manera de explicar los cambios graduales en algunos de ellos. Las variables dependientes son cada una de las variables medidas *in situ* y en laboratorio, mientras que las independientes corresponden a la temporada de lluvias y secas.

Posteriormente, para conocer qué parámetros explican mejor la varianza de los resultados, se recurrió al análisis de componentes principales (ACP) de tres factores con el paquete estadístico SPSS v.15. Éste método se basa en la similitud de las variables originales para crear nuevas, llamadas “factores o componentes principales”, los cuales explican la mayor varianza posible del fenómeno estudiado. Se analizaron sitios de muestreo y variables en gráficas, que se realizaron con el programa STATISTICA v.7.

El análisis multivariado también incluyó la correlación entre el conjunto de variables, por lo que se llevó a cabo un análisis de correlación de Spearman (ρ), el cual utiliza el mismo coeficiente que el análisis de correlación de Pearson, pero sustituyendo los valores originales por rangos (Martínez *et al.*, 2006). Este coeficiente estima las asociaciones en general entre dos variables, no únicamente relaciones lineales.

III.4 Análisis de impulsores de cambio y servicios hidrológicos

La información obtenida de la medición de los sólidos y el carbono orgánico, se relacionó los cambios en la calidad del agua y evaluaciones previas de calidad en el río Magdalena (Flores, 2008; Monges, 2009; Velázquez, 2009) para observar los cambios en diferentes años. También se relacionó a los sólidos y el carbono con su posible origen en el río, y se determinó si son buenos indicadores de contaminación.

Asimismo, se realizó un análisis a partir de la información del MEA (2005) y otros autores (Brauman *et al.*, 2007) sobre las interacciones de la calidad del agua con otros servicios de tipo hidrológico, los cuales fueron identificados previamente en la cuenca (Jujnovsky, 2006), y valorar si la calidad del agua se está perdiendo como un servicio ecosistémico de regulación.

Con toda la información reunida se realizó un diagnóstico ambiental de todo el río que incluye factores de deterioro y contaminación, servicios ecosistémicos, impulsores de cambio y posibles soluciones.

IV. RESULTADOS.

IV.1 Parámetros fisicoquímicos *in situ*

Los resultados de los parámetros fisicoquímicos determinados *in situ* se aprecian en la Tabla 4. Son el promedio de dos muestreos; se comparan secas (S) y lluvias (LL) para cada sitio, y la altitud a la que se encuentran.

Tabla 4. Parámetros fisicoquímicos promedio determinados *in situ*.

Variable	Altitud	pH		T (°C)		σ ($\mu\text{S}/\text{cm}$)		OD (mg/L)		S (ups)	
		S	LL	S	LL	S	LL	S	LL	S	LL
AN-1	3570	7.6	8.4	11.5	12.3	28.7	19.4	3.7	5.5	0.1	0.5
AN-2	3560	7.5	7.6	15	12.5	57.2	38.8	2.4	6.2	0.1	0.5
AN-3	3100	7.8	7.7	10.9	12.8	48.9	53	6.2	7.7	0.1	0.5
AN-4	2770	7.4	7.7	13.5	14.4	53.8	59.7	7.1	6.3	0.1	0.5
AN-5	2540	7.2	7.1	10.1	14.4	61.5	65.4	6.8	6.0	0.1	0.5
ZU-1	2510	7.0	6.9	10.9	12.9	65.4	63.8	4.6	7.2	0.1	0.1
ZU-2	2470	7.4	7.3	12.9	14.4	189.4	130.5	4	6.8	0.1	0.1
ZU-3	2470	7.4	7.5	13.2	14.5	205.5	166.7	4.1	5.5	0.1	0.1
ZU-4	2405	6.7	7.4	13.8	14.7	165.2	179.5	4.2	ND	0.1	0.1
ZU-5	2400	6.9	7.5	17.5	15.7	466	274	1.0	ND	0.2	0.1
ZU-6	2250	7.4	7.6	20.3	19.6	473.5	532.5	2.7	ND	0.2	0.3
ZU-7	2380	7.2	7.1	20.7	19.1	498	466	0.6	ND	0.2	0.3

En donde: pH (potencial de hidrógeno), T (temperatura), σ (conductividad), OD (oxígeno disuelto), y S (salinidad). ND: No hay dato.

Ni el pH, la salinidad o el OD presentan una tendencia clara conforme disminuye la altitud. La temperatura y la conductividad aumentan. De acuerdo al ANCOVA, sólo se encontraron diferencias significativas entre distintas altitudes para la temperatura ($F= 6.3$, $p = 0.02$), pH ($F=7.7$, $p=0.01$) y conductividad ($F= 13.3$, $p=0.001$) (Figuras 6,7 y 8). No se encontraron diferencias significativas entre lluvias y secas para ningún parámetro.

Existe mayor heterogeneidad en temporada de secas para los parámetros fisicoquímicos *in situ*, a excepción del OD (Figura 9).

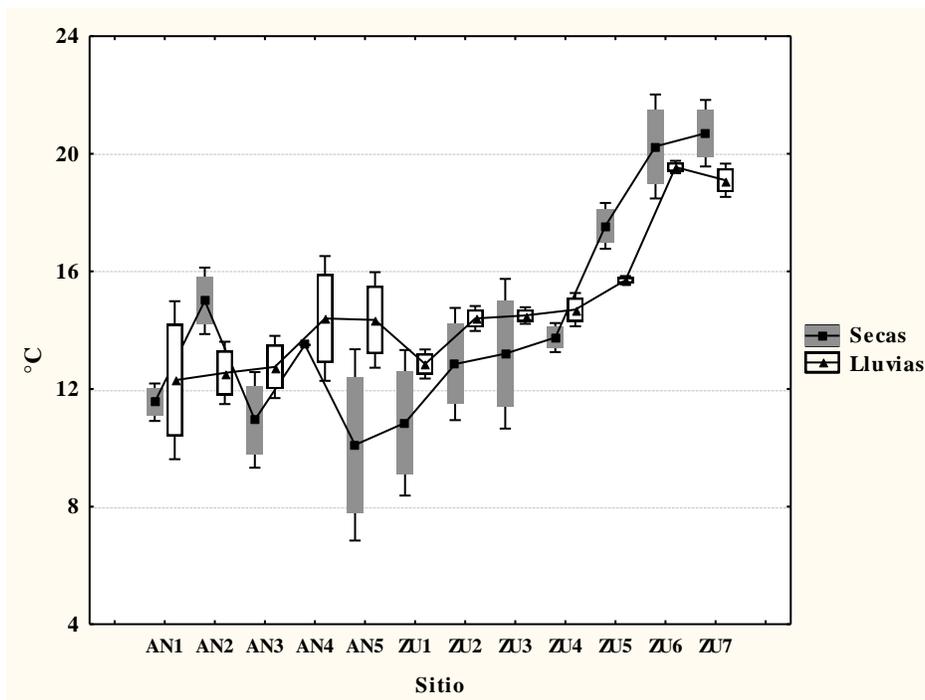


Figura 6. Temperatura promedio (°C) de los sitios de muestreo en temporada de lluvias y secas en el río Magdalena, D.F.

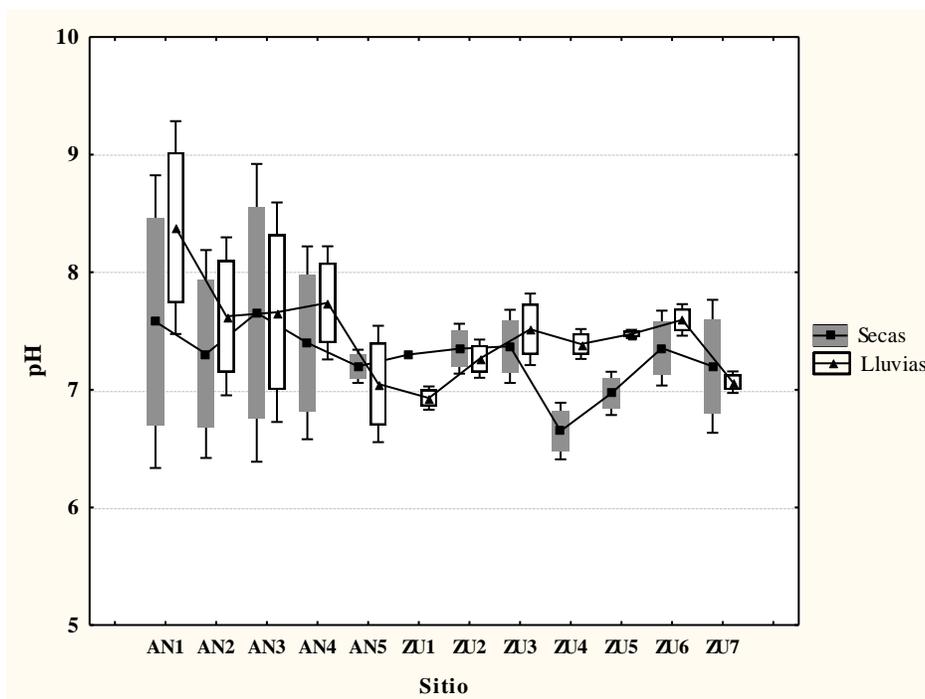


Figura 7. Valores de pH promedio en los sitios de muestreo en temporada de lluvias y secas en el río Magdalena, D.F.

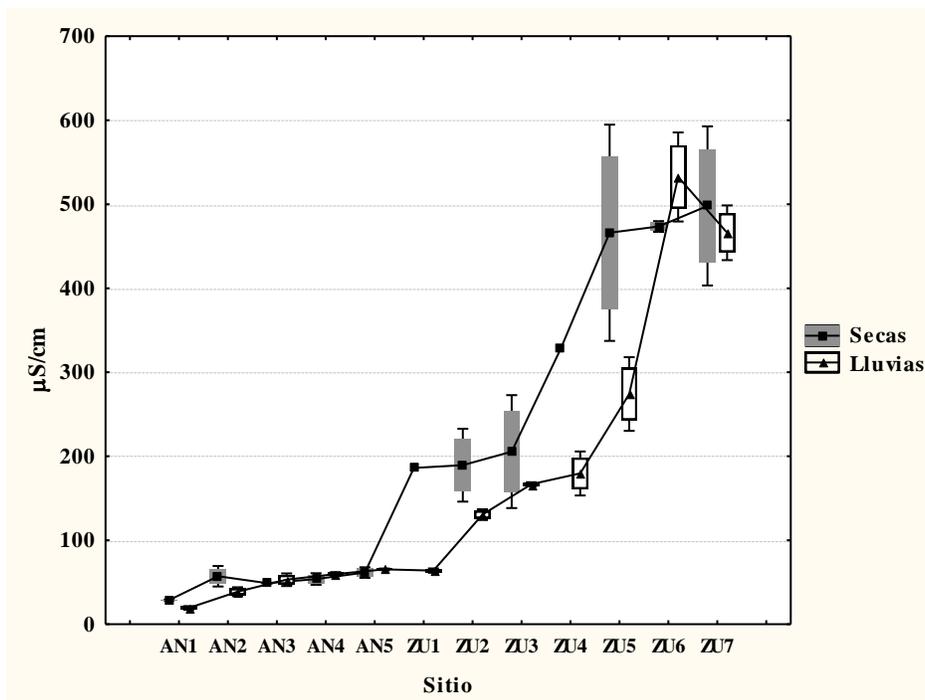


Figura 8. Conductividad promedio ($\mu\text{S}/\text{cm}$) en los sitios de muestreo en temporada de lluvias y secas en el río Magdalena, D.F.

La salinidad es uno de los parámetros más estables de las mediciones, y es el que menos varió a lo largo del año y entre los sitios de muestreo (Tabla 3, Figura 10).

IV.2. Sólidos y carbono

Los resultados de los sólidos y el carbono se encuentran en la Tabla 5. Son el promedio de dos muestreos, en lluvias (LL) y secas (S) durante el 2009. Hay un incremento gradual de los sólidos y el carbono conforme disminuye la altitud, disminuyen ligeramente en la temporada de lluvias y ello es más evidente en la ZU. En cambio, en el AN los valores de sólidos y carbono son más homogéneos.

Durante la temporada de secas la concentración de sólidos suspendidos y disueltos es mayor que en lluvias (Figura 11 y 12). El ANCOVA encontró diferencias significativas en la altitud para SST ($F= 17.3$, $p= 0.0004$) y SDT ($F= 18.1$, $p= 0.0003$), mientras que la temporada fue indistinta para ambas.

Tabla 5. Sólidos y carbono promedio en el río Magdalena, D.F.

Variable	Altitud	SST		SDT		CO		CI	
Sitio	m.s.n.m.	S	LL	S	LL	S	LL	S	LL
AN1	3570	4.3	1.5	54.4	50.2	1.7	3.9	38.2	ND
AN2	3560	2.4	1.8	88.4	80.7	5.9	4.9	62.7	0.9
AN3	3100	4.1	2.3	87.2	56.5	8.7	2.8	43.8	3.2
AN4	2770	4.3	8.45	111.2	51.1	5.0	2.2	63.1	5.3
AN5	2540	1.2	13.4	94.8	82.9	1.5	5.9	36.6	2.6
ZU1	2510	4.9	9.0	116.3	69.3	8.4	10.7	20.1	ND
ZU2	2470	95.9	35.1	158.6	112.0	29.3	17.9	57.5	14.5
ZU3	2470	100.7	43.4	353.4	122.9	40.3	21.6	48.6	19.7
ZU4	2405	129.1	40.2	252.5	182.3	48.5	22.9	46.2	12.1
ZU5	2400	160.6	71.8	366.9	244.4	73.0	29.2	65.0	33.3
ZU6	2250	138.4	57.7	362.0	333.9	45.7	25.7	80.4	51.9
ZU7	2380	190.8	94.3	413.4	353.2	83.5	40.2	97.9	67.8

En donde: SST (sólidos suspendidos), SDT (Sólidos disueltos), CO (Carbono orgánico) y CI (Carbono inorgánico) y ND (No hay dato).

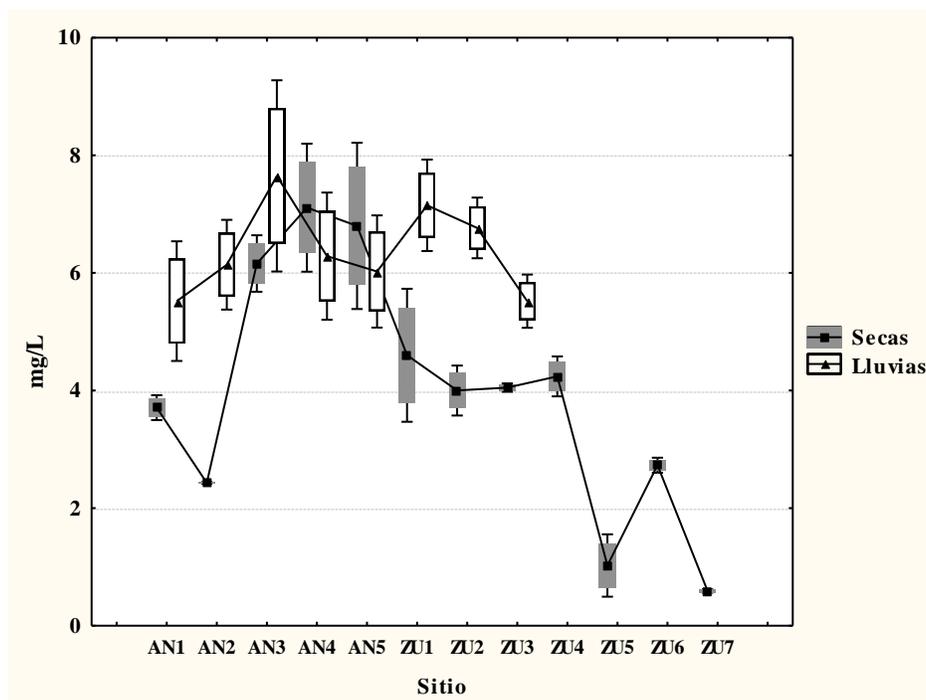


Figura 9. Oxígeno disuelto promedio (mg/L) en los sitios de muestreo en temporada de secas y lluvias en el río Magdalena, D.F. Los sitios ZU4 a ZU7 no tienen datos de OD.

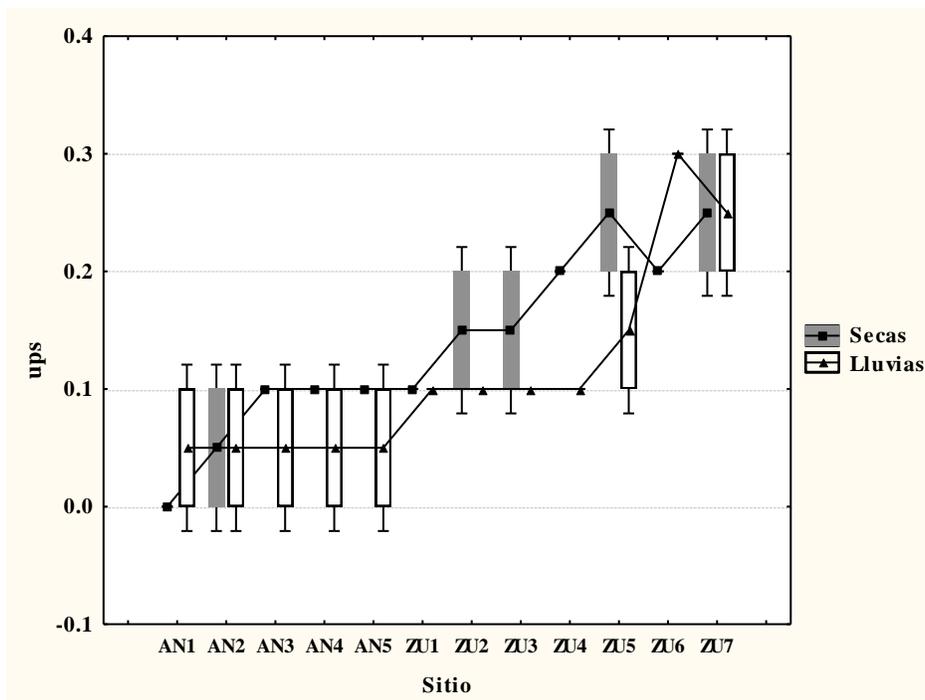


Figura 10. Salinidad promedio (ups) en los sitios de muestreo en temporada de secas y lluvias en el río Magdalena, D.F.

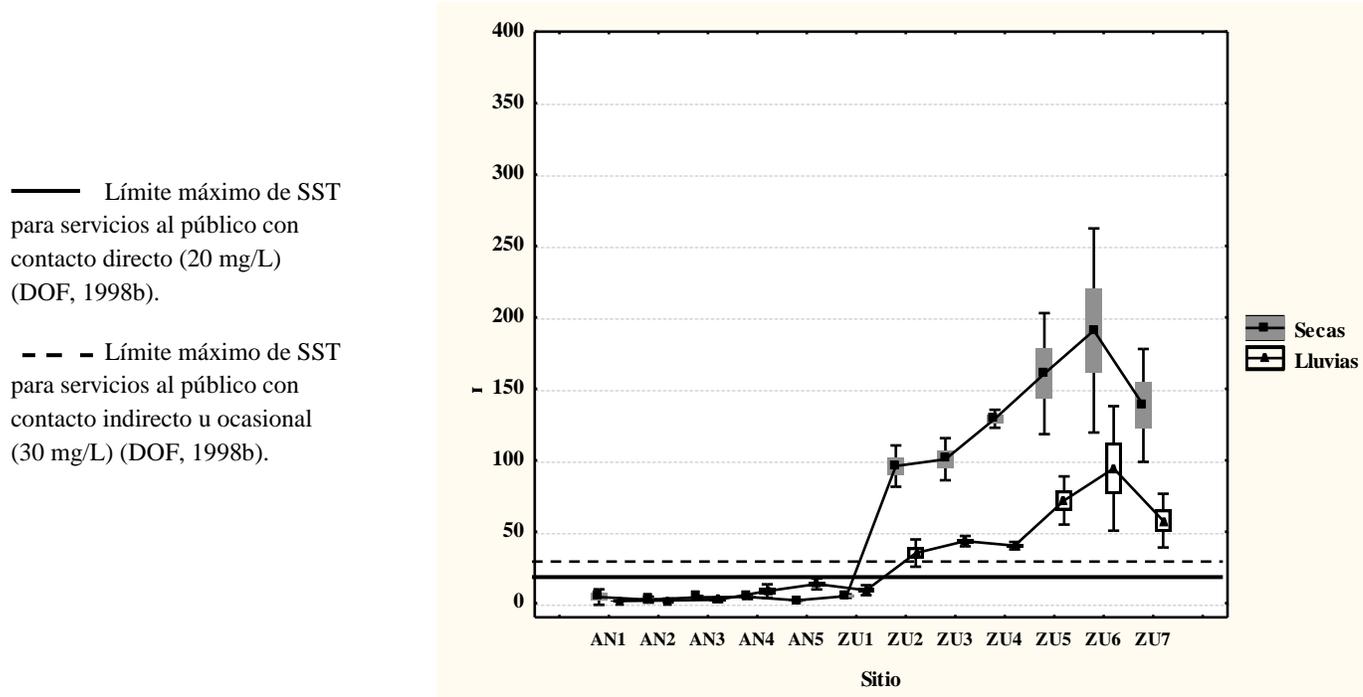


Figura 11. Sólidos suspendidos promedio (mg/L) de los sitios de muestreo en temporada de secas y lluvias en el río Magdalena, D.F.

En la Figura 11 se observan los resultados de los SST. Desde el AN1 hasta la ZU1, la concentración de sólidos es aceptable (DOF, 1997; DOF, 1998b). En el resto de los sitios, se sobrepasa la norma para aguas de reúso (DOF, 1998b). El sitio en donde hay más SST en lluvias y secas es la Presa Anzaldo (ZU6), mientras que en Viveros de Coyoacán disminuye la concentración (ZU7). De acuerdo con la clasificación de CONAGUA (2008) todos los puntos del AN y la ZU1 son de calidad excelente. Los puntos ZU2, ZU3 y ZU4 se consideran de calidad aceptable, mientras que los puntos ZU5, ZU6 y ZU7 están contaminados (Figura 13).

En la Figura 12 se muestran los SDT; al igual que los SST, hay un aumento gradual en su concentración a lo largo del cauce. Durante la temporada de secas los valores son más heterogéneos, especialmente en los sitios ZU2 y ZU3.

Tanto para SST como para SDT existe una diferencia marcada entre temporadas en la ZU, siendo la temporada de secas en la que hay menor variabilidad de datos.

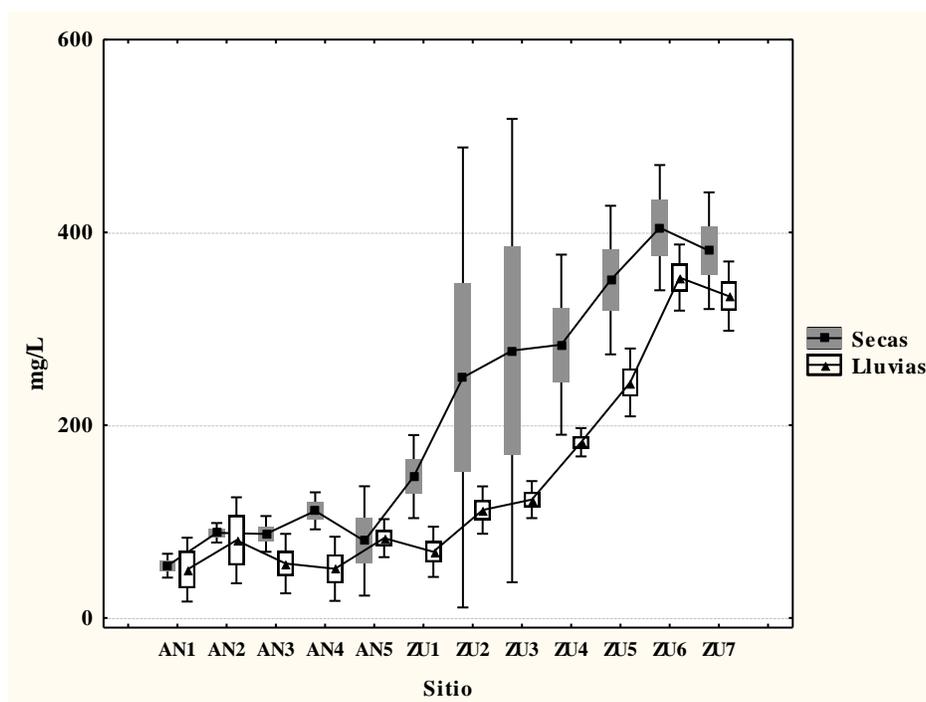


Figura 12. Sólidos disueltos promedio (mg/L) en los sitios de muestreo en temporada de lluvias y de secas en el río Magdalena, D.F.

**Clasificación de calidad del agua
basado en sólidos suspendidos
según CONAGUA (2008).**

- ▲ Excelente
- ▲ Aceptable
- ▲ Contaminada

Características del río

-  Río a cielo abierto
-  Río entubado
-  Río contaminado

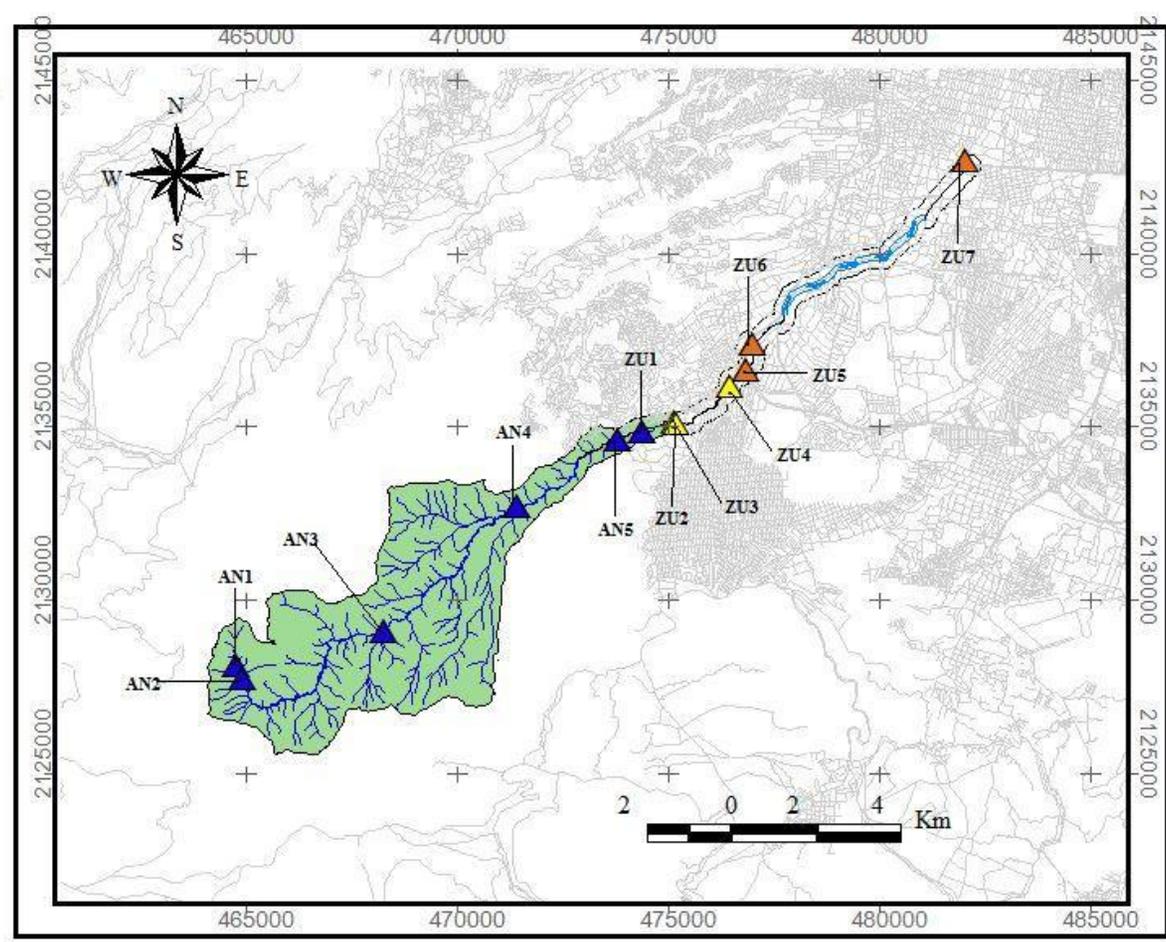


Figura 13. Puntos de muestreo con colores de calidad del agua de acuerdo a los sólidos suspendidos totales.

Fuente: CONAGUA, 2008. Estadísticas de agua en México

El CO se encuentra estrechamente relacionado con los SST, por lo que ambas gráficas tienen tendencias similares (Figura 14). Se encontraron diferencias significativas en la altitud ($F=14.7$, $p=0.001$), pero no entre temporadas. Hay más heterogeneidad en los datos de secas.

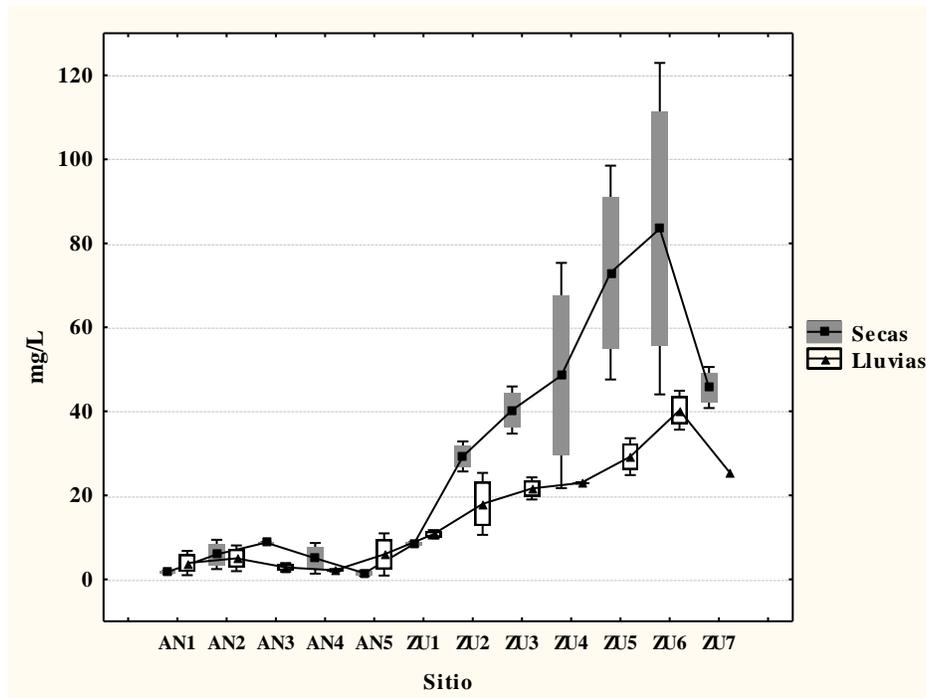


Figura 14. Carbono orgánico total promedio (mg/L) en los sitios de muestreo en temporada de secas y lluvias en el río Magdalena, D.F.

El CI es el producto de la descomposición de residuos vegetales; es más estable por su tasa de descomposición (Hernández, com. Pers). Los valores más altos de CI en temporada de secas están entre AN1 y AN4 (> 40 mg/L) (Tabla 5, Figura 15), mientras que en lluvias todos los sitios del AN y la ZU1 tienen valores bajos (< 6 mg/L).

En la ZU se aprecian algunas diferencias entre lluvias y secas, con una disminución de la concentración de CI durante las lluvias. No obstante dicha diferencia no es significativa, lo cual es el caso para la altitud ($F= 5.1$, $p= 0.035$).

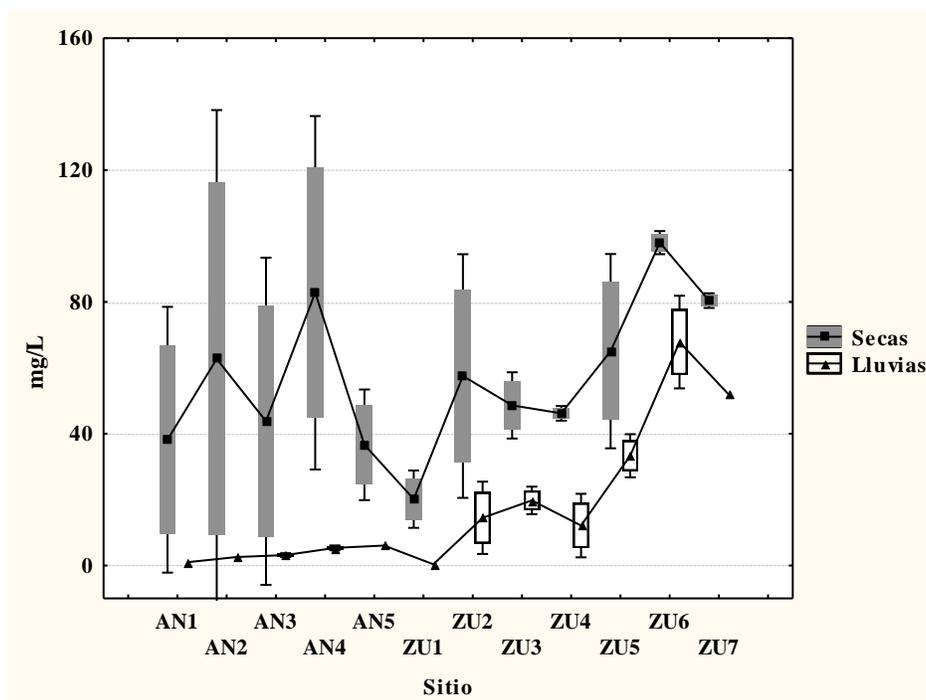


Figura 15. Carbono inorgánico promedio (mg/L) en los sitios de muestreo en temporada de lluvias y secas en el río Magdalena, D.F.

IV.3 Análisis bacteriológicos

Finalmente, en cuanto a los datos bacteriológicos generados por Aguilar *et al.*, 2009; éstos aumentan drásticamente conforme se acerca el cauce a la parte baja y atraviesa la mancha urbana; comenzando el incremento en el sitio ZU1 (~ 60,000 UFC/100ml) a diferencia de AN5 (hasta 8800 UFC/100 ml). Y tanto CF como EF se comportan de manera similar en cada sitio a lo largo del año (Figura 16).

A partir de la ZU1, las concentraciones bacterianas sobrepasan las normas oficiales mexicanas (DOF, 1997 y DOF, 1998). Tanto CF como EF cambian con respecto a la altitud ($F= 9.8$, $p=0.005$ y $F= 9.2$, $p= 0.006$), no existiendo diferencias entre temporadas.

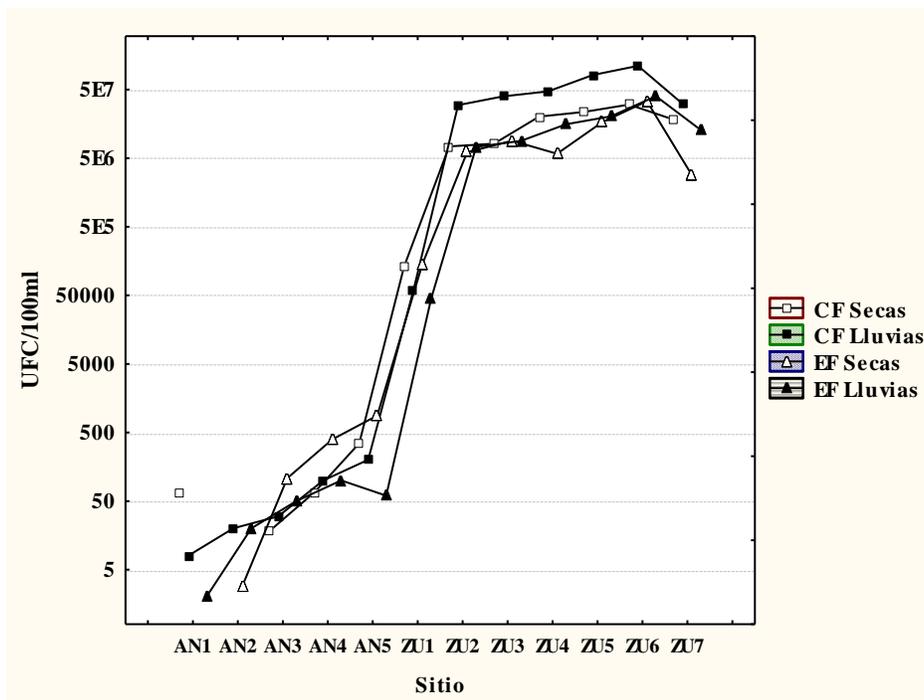


Figura 16. Parámetros bacteriológicos promedio (UFC/100 ml) de los sitios de muestreo en temporada de secas y lluvias en el río Magdalena, D.F. CF (coliformes fecales) y EF (enterococos fecales).

IV.4. Análisis multivariado

Los resultados del análisis de componentes principales (ACP), muestran que el primer factor, o componente principal, explica el 55% de la variación total, el segundo explica el 15% y el tercero 12%; dando un total de 82% de la variación total (Tabla 6).

El factor 1 está conformado por SST, SDT, CO, CI, temperatura, conductividad, CF, EF y altitud. El factor 2 se compone de OD y salinidad y el tercero abarca únicamente al pH. Esto se complementa con el análisis de correlación de Spearman (Tabla 7), el cual indica el grado de correlación de las variables al 95 y 99% de confianza. Se encontraron correlaciones significativas en todas las variables, a excepción de la salinidad. Las correlaciones pueden o no ser lineales

Tabla 6. Varianza total explicada por tres factores extraídos.

Componente	Autovalores iniciales			Sumas de las saturaciones al cuadrado de la extracción		
	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	% acumulado
1	6.6	55.3	55.3	6.6	55.322	55.322
2	1.8	14.7	70.0	1.8	14.710	70.032
3	1.5	12.1	82.1	1.5	12.041	82.073
4	.893	7.4	89.5			
5	.399	3.3	92.8			
6	.336	2.8	95.6			
7	.204	1.7	97.3			
8	.136	1.1	98.5			
9	.097	.807	99.3			
10	.061	.505	99.8			
11	.021	.174	99.9			
12	.005	.040	100.0			

Método de extracción: Análisis de Componentes principales.

Tabla 7. Análisis de correlación de Spearman. Donde SST (Sólidos suspendidos), SDT (Sólidos disueltos), CO (Carbono orgánico), CI (Carbono inorgánico), Temp (Temperatura), pH, σ (Conductividad), OD (Oxígeno disuelto), sal (salinidad) CF (Coliformes fecales), EF (enterococos fecales y Alt (altitud).

	SST	SDT	CO	CI	Temp	pH	σ	OD	Sal	CF	EF	Alt.
SST	1.0											
SDT	0.831**	1.0										
CO	0.921**	0.827**	1.0									
CI	0.556**	0.725**	0.606**	1.0								
Temp	0.697**	0.610**	0.662**	0.519**	1.0							
pH	-0.464*	-0.493*	-0.435*	-0.199	-0.137	1.0						
σ	0.915**	0.894	0.860**	0.598**	0.761**	-0.478*	1.0					
OD	-0.294	-0.248	-0.377	-0.546**	-0.183	0.115	-0.219	1.0				
Sal	0.191	-0.035	0.049	-0.299	0.309	0.166	0.161	0.103	1.0			
CF	0.784**	0.778**	0.715**	0.338	0.639**	-0.397	0.871**	0.086	0.080	1.0		
EF	0.849**	0.854**	0.811**	0.473	0.643**	-0.374	0.908**	0.011	0.059	0.940**	1.0	
Alt.	-0.913**	-0.907**	-0.860**	-0.547	-0.740**	0.498*	-0.971**	0.096	-0.0160	-0.915**	-0.936**	1.0

La correlación * es significativa al 0.05

La correlación ** es significativa al 0.01

De todos los parámetros, la salinidad es el único que no tiene correlación alguna. El OD está correlacionado con el CI y la altitud se correlaciona con todos los parámetros a excepción del CI, la salinidad y el OD. La altitud es una variable que aporta mucha información sobre el comportamiento de los parámetros, y se verá porqué.

Por último, se realizó una proyección para ver si había agrupaciones entre los sitios de muestreo; usando como ejes los factores 1 y 2 del análisis de ACP, distinguiéndose lluvias (azul) de secas (anaranjado).

La separación de los sitios con respecto a la temporada es muy clara; aunque mantienen la misma posición con respecto al factor 1. Los sitios agrupados se encuentran encerrados en un círculo (Figura 17).

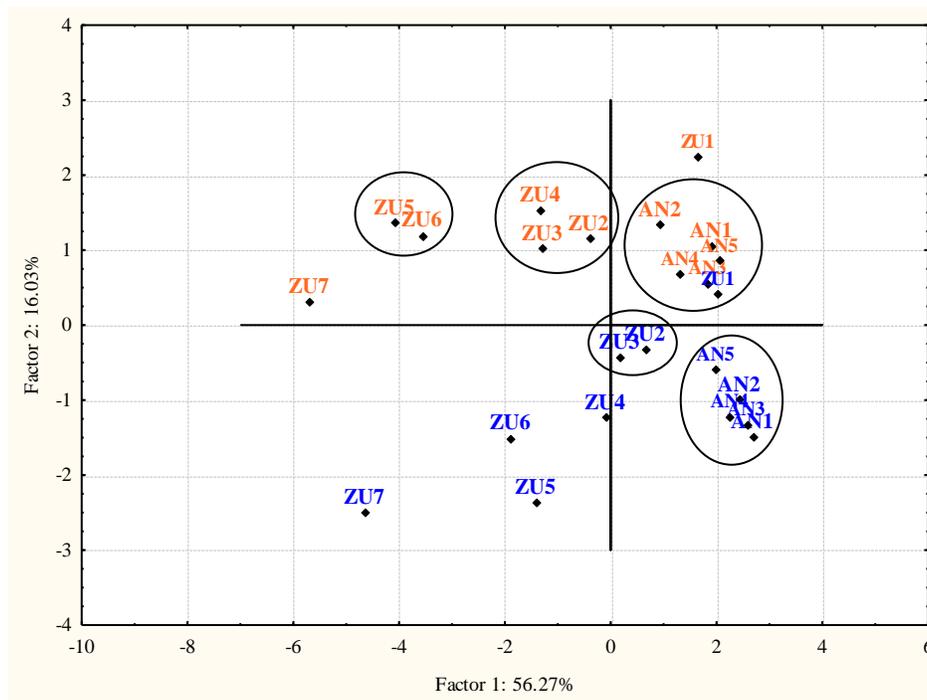


Figura 17. Gráfica de agrupaciones de los sitios de muestreo, área natural (AN) y zona urbana (ZU). En azul se encuentran los correspondientes a lluvias, y en naranja los de secas.

Las AN en lluvias están en una agrupación, mientras que las AN en secas y ZU1 de lluvias forman otra. La similitud entre ellas es valorada usando todas las variables medidas, que fueron reducidas a componentes principales.

Otras agrupaciones abarcan a ZU5 y ZU6 de secas, ZU2 y ZU3 de lluvias y ZU2, ZU3 y ZU4 de secas en ésta última agrupación, lo que coincide con el hecho de que los sitios se encuentran espacialmente cercanos entre sí (Anexo I).

IV.5 Servicios ecosistémicos y calidad del agua

Los SEh ya fueron identificados en la CRM (Jujnovsky, 2006) junto con los impulsores de cambio (Almeida *et al.*, 2007). Estos se relacionaron con los resultados de sólidos obtenidos. De acuerdo a las características de la CRM y los resultados de la determinación de sólidos, carbono y fisicoquímicos *in situ*, se identificaron aquellos servicios que son directamente afectados por la variación de la calidad (Tabla 7). La calidad del agua afecta y es afectada por casi todos los tipos de SEh (Figura 18).

Tabla 8. Servicios ecosistémicos relacionados con la calidad del agua y sus impulsores de cambio directos

Tipo de servicio	Impulsor (es) de cambio
PROVISIÓN	
Agua dulce	Extracción directa, descarga de agua residual, turismo no controlado, crecimiento de la mancha urbana, ganadería.
REGULACIÓN	
Control de la erosión y mantenimiento del suelo	Deforestación, tala ilegal, prácticas agropasotiles.
Calidad del agua	Basura, heces, agua residual y doméstica.
Remoción de masa	Construcción de obras y caminos, asentamientos irregulares
CULTURALES	
Recreación	Incendios forestales, contaminación del río..
Belleza escénica	

Modificado de Jujnovsky (2006) y Almeida *et al.*, 2007.

El servicio de provisión directamente afectado por la calidad del agua es la provisión de agua. Este servicio se genera en toda la cuenca con un total de $0.65 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Jujnovsky, 2006). Los impulsores de cambio que afectan a la provisión de agua son la extracción intensiva del acuífero, y los impulsores relacionados con la calidad del agua. La disminución de la calidad influencia la posibilidad de aprovechamiento del recurso; y el crecimiento de la mancha urbana propicia mayor extracción de agua para satisfacer las necesidades de una población creciente.

Los servicios de regulación considerados son tres: control de la erosión y mantenimiento del suelo, calidad del agua y remoción de masa. El primero se genera y consume en las tres comunidades, pero es más importante en la parte alta y media que tienen buena cobertura vegetal.

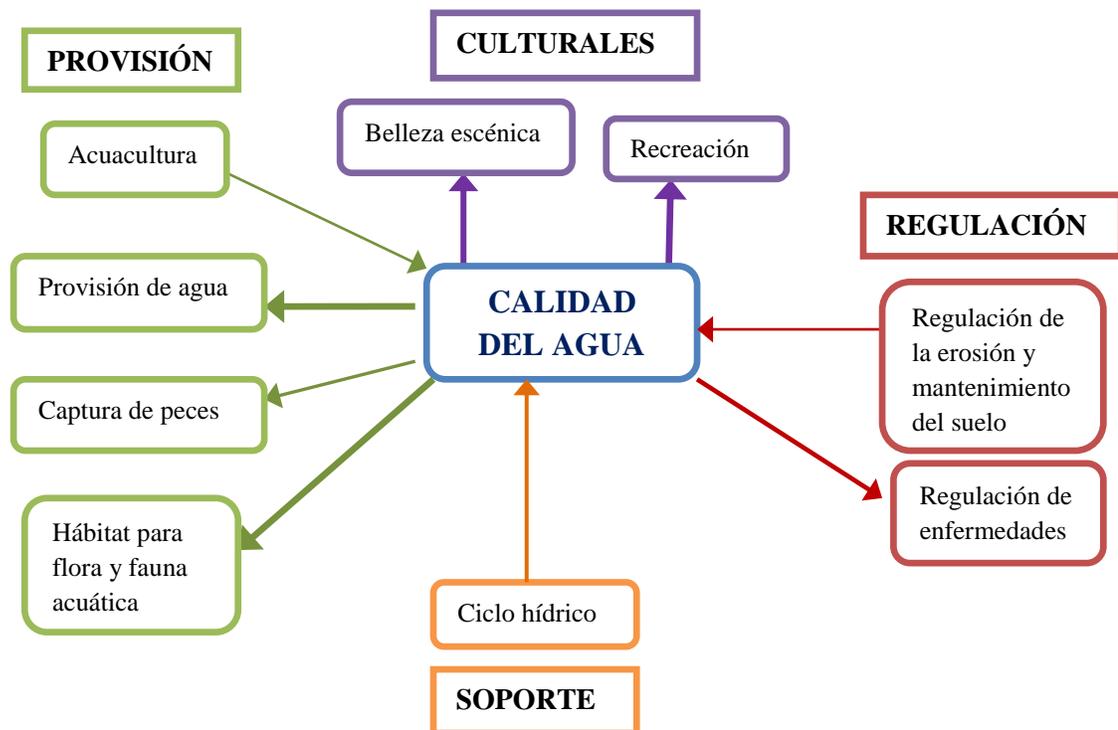


Figura 18. La influencia de la calidad del agua en otros servicios hidrológicos y viceversa. (MEA, 2005). El grosor de las flechas indica el grado de impacto.

La deforestación y tala ilegal favorecen a la compactación y erosión del suelo, altamente erosionable. Las prácticas agropastoriles implican una deforestación previa para poder realizar los sembradíos e introducir ganado. La **calidad del agua** es un servicio generado en la parte media y alta, pero en la parte baja se está perdiendo. La contaminación al río es el impulsor de cambio más directo que afecta a la calidad, y abarca las descargas domésticas y la basura arrojada al río. La **remoción de masa** es más importante que se mantenga en la parte media del bosque, en donde hay laderas más pronunciadas (Almeida *et al.*, 2007). Los impulsores de cambio de este servicio son la construcción de obras y caminos y los asentamientos irregulares. Los caminos además de provocar disgregación del suelo, también favorecen la accesibilidad para visitantes.

Los servicios culturales identificados en la cuenca son recreación y belleza escénica. La **recreación** se da en la parte media y baja de la cuenca, en donde hay actividades de ecoturismo. Los impulsores de cambio que afectan a este servicio son los incendios forestales y la contaminación del río, éste último puede resultar en una amenaza para la salud humana por la materia fecal presente en el agua. La **belleza escénica** ha sido identificada en la parte media y baja por Jujnovsky (2006), que es en donde se consume el servicio. Sus impulsores de cambio son contaminación del agua del río y los incendios forestales.

V. DISCUSIÓN

La calidad del agua a lo largo del río Magdalena disminuye gradualmente con la altitud, lo que ya se ha reportado en trabajos anteriores (Bojorque, 2006; Flores, 2008; Monges, 2009; Velázquez, 2009). Esto se encuentra asociado a las actividades humanas en la parte baja del río (SMA-GDF, 2008) y se refleja en cambios en los parámetros fisicoquímicos (Aguilar *et al.*, 2009) y biológicos (Bojorge-García, 2006).

A continuación se discuten las variaciones encontradas en dichos parámetros y se plantean los posibles impulsores de cambio relacionados con la calidad del agua como servicio ecosistémico.

V.1 Los sólidos y parámetros fisicoquímicos *in situ*

No todos los parámetros medidos siguen la misma tendencia, aunque se observó que la mayoría tiene una mayor concentración durante la temporada de secas y cuando el río entra a la zona urbana; lo que es consistente con otras evaluaciones de calidad.

Conforme disminuye la altitud, los sólidos, la temperatura y la conductividad aumentan. Esto se debe a que a diferentes altitudes, las condiciones ambientales y las actividades realizadas en la CRM son distintas, por lo que el comportamiento de las variables que se midieron será diferente para cada sitio. El contexto socio-ambiental está ligado a los impulsores de cambio, que serán explicados más adelante.

La temperatura y la conductividad aumentan conforme el cauce entra en contacto con la ZU. En el caso de la temperatura, ésta se encuentra influenciada por factores biofísicos como la presión debido a la altitud y la temperatura atmosférica. Esto se observa con frecuencia en ecosistemas montañosos en cuyas zonas altas se presentan temperaturas bajas tanto del aire como del agua (Chang, 2006). Heuer y Lamberti (2007) sostienen que la corriente de los ríos favorece las variaciones espaciales de temperatura, la corriente suele incrementarse durante las lluvias por lo que se esperan más fluctuaciones durante dicha temporada.

Los factores antropogénicos que intervienen en el incremento de temperatura están relacionados con la presencia de sólidos en las aguas residuales. Estos absorben la radiación solar en el agua superficial. Además, las aguas residuales suelen tener una temperatura diferente a la de los ríos de ecosistemas templados, cambiando directamente la temperatura del agua mediante contaminación térmica.

A pesar del aumento de temperatura conforme disminuye la altitud, en ninguno de los puntos se sobrepasó la norma NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1997), que indica un límite de 40°C para protección a la vida acuática o uso público urbano. La relación entre temperatura y altitud es inversa ($r = -0.741$, $p < 0.01$). Durante las lluvias hubo ligeros aumentos de temperatura en algunos de los puntos, pero estas diferencias entre temporadas no resultaron significativas. Dobler (2010) reporta que los meses más lluviosos de acuerdo a las estaciones meteorológicas de Ciudad Universitaria y el Desierto de los Leones abarcan de mayo a octubre. Estos meses coinciden con los del muestreo de agua (septiembre-octubre). No obstante, la temperatura fluctúa a nivel local y dependiendo de la hora del día a la que es tomada la muestra.

La conductividad, se encuentra directamente relacionada con los sólidos disueltos y el carbono inorgánico. En el AN estos elementos se encuentran representados por carbonatos y bicarbonatos derivados del CO₂, producto de la respiración de organismos acuáticos. Las andesitas que caracterizan a la mayor parte de la cuenca, son poco solubles en agua y se intemperizan con dificultad, así que aportan poco a la cantidad de SDT. No obstante, se han reportado actividades agrícolas y ganaderas en la parte alta y media de la cuenca, que corresponden al bosque de *Pinus* y *Abies* (Almeida *et al.*, 2007). Dichas prácticas favorecen la compactación y erosión del suelo, y por lo tanto el arrastre de sólidos hacia el agua. A lo que se suma la presencia de plaguicidas (Rentería, 2009).

Por otro lado, en la ZU son los aportes de agua residual los que más contribuyen al aumento de conductividad. Este parámetro junto con los SDT, tuvieron mayor concentración durante la época de secas, posiblemente por el menor volumen de agua en el cauce, mientras que durante las lluvias los sólidos se diluyeron. La conductividad también se encuentra correlacionada con los SST ($r = 0.915$, $p = 0.01$).

Aunque frecuentemente se relaciona a la conductividad con el estado trófico de un cuerpo de agua (Sandoval, 2008); en las partes bajas del río no se han reportado organismos animales ni vegetales (SMA-GDF, 2008) e incluso se piensa que la cantidad de especies de algas pudiera reducirse a cero (Bojorge-García, 2006). De acuerdo al análisis de correlación de Spearman la conductividad tiene fuerte correlación con las bacterias CF ($r = 0.871$, $p = 0.001$) y EF ($r = 0.908$, $p = 0.01$). Es posible que el consumo de nutrientes, y por tanto, el aumento en el estado trófico del agua se deba en parte al metabolismo de microorganismos.

El pH se mantiene alrededor de la neutralidad a lo largo del cauce. Existe ligeramente mayor alcalinidad en las AN por los sólidos disueltos en dichas zonas. A pesar de que en la ZU existen

muchos compuestos disueltos (Flores, 2008), el pH no varía. Se mantuvo dentro del intervalo de 6.5 y 8 a lo largo del río, lo cual se considera normal para cuerpos de agua dulce en buen estado (Wetzel, 2001), y no rebasa los valores de la NOM-001-SEMARNAT-1996, que recomiendan un intervalo de 5-10 para la protección a la vida acuática (DOF, 1997).

El pH del agua es ligeramente más elevado en temporada de lluvias, y es más notorio en la ZU, en donde la oxidación de la materia orgánica y otros sólidos permite que esta variable cambie con frecuencia. La respiración de organismos también favorece cambios recurrentes en el pH (Connell, 2005). Aunque hubo ligeras diferencias entre lluvias y secas éstas no fueron significativas. El pH monitoreado durante los ciclos anuales 2007 (Monges, 2009) y 2008 (Flores, 2008; Rentería, 2008) se mantuvo alrededor de 7.

La salinidad tiene un comportamiento similar al pH. Dado que el río Magdalena es un sistema de agua dulce, la salinidad no aporta información adicional para fines de evaluación de calidad del agua. No tiene correlación alguna con ningún parámetro.

El OD disminuye su solubilidad al aumentar la temperatura (Wetzel, 2001), es de esperar que durante la época seca su concentración sea menor por ser los meses más calurosos (marzo-mayo; Dobler, 2010). No se estableció una tendencia muy clara a que el OD disminuyera con la altitud, aunque es más evidente en la ZU por el consumo bacteriano de materia orgánica que es un factor del agotamiento del OD.

Otro factor que debe tomarse en cuenta es que en los sistemas lóticos como los ríos, el constante flujo de agua ingresa con mayor frecuencia oxígeno al sistema, y por ello las lluvias presentan mayores niveles de OD (Connell, 2005). Las concentraciones de OD oscilaron entre 0.6 y 7.1 mg/L en secas y 5.5 y 7.7 mg/L en lluvia, el aumento en la concentración de OD se da en el AN, en donde no hay tanto consumo de oxígeno. Las diferencias entre temporadas o altitud no fueron significativas. En otras estimaciones (Monges, 2009) se encontraron diferencias entre lluvias y secas, pero no fueron contemplados los sitios más contaminados del río.

V.2 Sólidos y carbono

Tanto los sólidos como el carbono aumentaron conforme disminuyó la altitud. En el caso de los SST, en las AN se mantuvieron con baja concentración, y por debajo de la norma para aguas de reúso (DOF, 1997). Los SDT tienen límites máximos permisibles que no aplican para todos los cuerpos de agua dulce (DOF, 2000), por lo que las normas oficiales mexicanas son poco específicas para este parámetro.

De acuerdo a los sólidos suspendidos, la ZU1 tiene comportamiento de área natural, de hecho bajo las normas de CONAGUA (2008), es de excelente calidad. Para el resto de los sitios, tanto para SST como para SDT existe mayor variabilidad en los datos durante la temporada seca y en la ZU. La variabilidad en la ZU se explica porque el agua tiene componentes más heterogéneos, y al tomar muestras en diferentes días, la cantidad de sólidos fue variable.

La corriente re-suspende los sólidos y revuelve material asentado en el fondo (Dune y Leopold, 1978), y en los sitios de depósito, hay menos posibilidad de encontrar sólidos en agua superficial, a menos de que haya niveles altos de contaminación. Monges (2009) midió la descarga *in situ* en las AN del río Magdalena, y demuestra que hay diferencias en la temporada de lluvias oscilando de uno hasta 17 m³/s en el sitio más caudaloso. La ZU no tiene datos de velocidad de flujo, sin embargo se observó que en algunas partes del río el agua se encontraba estancada.

Los sólidos del AN probablemente se constituyen de sedimentos, hojarasca, disolución de la roca (en menor proporción) y restos de organismos. En la ZU también están presentes dichos componentes, pero se encubren por sólidos provenientes de aguas residuales.

El carbono orgánico, que forma parte de los sólidos, funciona como indicador de materia orgánica y está presente en sedimentos y lixiviados. Tienen una fuerte correlación con los SST (0.921, $p < 0.01$). En las AN el CO es menos abundante, probablemente debido a que la descomposición de materia orgánica es menor en dicha área. La materia orgánica se constituye de restos vegetales y animales (i.e., excretas animales). En la ZU hay mayor concentración de CO porque parte de lo que constituye al agua residual es materia fecal, rica en carbono. El CI está relacionado con los SDT (0.725 $p < 0.01$). En las AN hay poca materia orgánica pero gran cantidad de sales, cuya concentración aumenta durante la temporada seca.

Dado el bajo grado de deterioro de la calidad del agua en las AN, el origen del CI puede ser derivado de la mineralización previa de materia orgánica del suelo del bosque que rodea al río

(M. Hernández com. pers.). Si hay intemperismo químico de la roca, el agua adquiere sólidos con carbono inorgánico.

Los datos de los sólidos suspendidos se complementan con la de la norma NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles en descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales (DOF, 1997). Esta norma si distingue entre tipos de uso estipulado para ríos, y son (a) uso en riego agrícola, (b) uso público urbano y (c) prevención para la vida acuática. Durante las lluvias algunos de los sitios disminuyeron su concentración de sólidos al grado de encontrarse por debajo de la norma para uso público urbano y protección a la vida acuática. (Tabla 9).

Tabla 9. Límites máximos permisibles de sólidos suspendidos de acuerdo a su uso.

Sitio SECAS	(A)	(B)	(C)	Sitio LLUVIAS	(A)	(B)	(C)
AN1				AN1			
AN2				AN2			
AN3				AN3			
AN4				AN4			
AN5				AN5			
ZU1				ZU1			
ZU2			X	ZU2			
ZU3			X	ZU3			
ZU4		X	X	ZU4			
ZU5		X	X	ZU5			
ZU6		X	X	ZU6			
ZU7		X	X	ZU7			X

Fuente: DOF, 1997. SEMARNAT.

Donde: (A) uso en riego agrícola, (B) uso público urbano y (C) protección a la vida acuática. Nota: el tache denota que se sobrepasa la norma.

La Tabla 9 indica que durante la temporada seca hay más sitios que sobrepasan la norma para uso público urbano y protección a la vida acuática; durante la época de lluvias sólo el sitio ZU7 sobrepasa la norma para protección a la vida acuática. Todos los sitios son aptos para riego en secas y lluvias. . La ZU se encuentra excesivamente contaminada de acuerdo al ICA calculado durante el 2008 (Flores, 2008).

V.3 Análisis bacteriológicos

La concentración de bacterias CF y EF aumenta a lo largo del AN. El origen de las bacterias es predominantemente animal, lo que puede deberse al ganado presente en éstas zonas (Tabla 11).

Tabla 10. Coeficiente CF/EF para lluvias y secas en los sitios de muestreo del río Magdalena.

Sitio	CF/EF		Sitio	CF/EF	
	SECAS	LLUVIAS		SECAS	LLUVIAS
AN1	0	3.159	ZU2	1.216	4.063
AN2	0	0.643	ZU3	0.908	4.445
AN3	0.168	0.642	ZU4	3.474	3.011
AN4	0.169	0.861	ZU5	1.416	3.996
AN5	0.395	3.096	ZU6	6.471	2.405
ZU1	0.941	1.285	ZU7	0.893	2.760

Nota: La escala de categorías del coeficiente es de > 4 origen humano, 2-4 mezcla predominantemente humana, 0.7-2 mezcla predominantemente animal, y <0.7 origen animal (Modificado de SMA-GDF, 2008).

La diferencia en las concentraciones bacterianas entre lluvias y secas no resultó significativa. Los datos bacteriológicos revelan que aunque el agua tenga baja concentración de sólidos, no es de excelente calidad por que las bacterias, de acuerdo a la NOM-SEMARNAT-003-1996, deben de estar ausentes por completo (DOF, 1997). Sin embargo la concentración de colonias bacterianas disminuyó durante las lluvias.

A partir del sitio ZU1 se observa un aumento grande en las concentraciones de EF y CF, y a partir de ZU3 se rebasan los límites máximos permisibles en agua residual (DOF, 1997). El origen de las bacterias en la ZU oscila entre animal y humana predominando ésta última (Tabla 10). La presencia de bacterias en la ZU se explica con la cantidad de materia orgánica desechada en el río por medio del desagüe.

En la Tabla 11 se muestran las características relacionadas con la calidad del agua para cada sitio de muestreo. Están basadas en reportes de calidad anteriores (Flores, 2008; Monges, 2009; Velázquez, 2009) datos generados durante el 2009 y se incluye la clasificación de calidad del agua de CONAGUA (2008).

Tabla 11. Características de los sitios de muestreo relacionadas con la calidad del agua

Sitio	Calidad según sólidos (CONAGUA, 2008)	Bacterias coliformes fecales (Aguilar <i>et al</i> , 2009)	Bacterias enterococos fecales (Aguilar <i>et al</i> , 2009)	No de especies de algas (SMA-GDF, 2008)	No. tubos de descarga (Velázquez, 2009)	ICA (%) (Flores, 2008)
AN1	Excelente	3.74E+01	1.00E+00	ND	0	94
AN2	Excelente	1.00E+01	1.14E+01	ND	0	86
AN3	Excelente	2.41E+01	7.90E+01	82	0	92
AN4	Excelente	8.35E+01	2.48E+02	66	0	ND
AN5	Excelente	2.74E+02	4.71E+02	16	1	70
ZU1	Excelente	9.48E+04	9.24E+04	ND	1	49
ZU2	Aceptable	1.86E+07	6.70E+06	3-5 ^a	0*	34
ZU3	Aceptable	2.40E+07	8.97E+06	3-5 ^a	0*	30
ZU4	Aceptable	3.37E+07	1.07E+07	3-5 ^a	2	30
ZU5	Contaminada	5.26E+07	1.86E+07	0 ^a	3	21
ZU6	Contaminada	7.06E+07	3.70E+07	0 ^a	0	15
ZU7	Contaminada	2.45E+07	7.81E+06	0 ^a	0**	20

Donde ICA (Índice de calidad del agua), ND= No hay datos. (*) No hay descargas, se encuentra el río Eslava. (**) Presa Anzaldo, las descargas no fueron tomadas en cuenta por Velázquez, 2009.

Superíndice a: Cálculo del número probable de especies de acuerdo al Plan Maestro.

La calidad del agua disminuye conforme la altitud. Esto coincide con la disminución de especies de algas, el aumento de sólidos, carbono y bacterias asociadas a desechos, y el aumento en el número de tubos de descargas. Debido a que el origen bacteriano es humano en las ZU, se atribuye el las aguas residuales y a los comerciantes en la zona vierten agua sucia directamente al río. Algunas especies de algas son resistentes a la contaminación, pero no sobreviven en los últimos sitios urbanos (SMA-GDF, 2008).

V.4 Servicios ecosistémicos hidrológicos e impulsores de cambio

Con toda la información recabada sobre las características de la cuenca y de calidad del agua; así como de la información generada durante el monitoreo del ciclo anual 2009, se realizó una integración de la información que abarca desde el nacimiento el río en la parte alta hasta la zona

urbana en viveros de Coyoacán, para determinar el comportamiento de la calidad del agua como servicio ecosistémico, y su relación con otros servicios e impulsores de cambio directos.

Área natural: Zona alta (bosque *Pinus hartwegii*)

Esta zona corresponde a la comunidad de *P. hartwegii* a 3500-3850 msnm. Tiene suelos ácidos (andosoles) de poca profundidad. A pesar de ser la comunidad que se desarrolla en sitios más altos, no es la que recibe mayor precipitación, y el clima es semifrío (Dobler, 2010). El estrato arbóreo es abierto, con 65% de cobertura vegetal (Nava, 2003). El relieve se caracteriza por laderas con una inclinación no mayor a los 30° (Jujnovsky, 2006), los sitios que corresponden a esta zona son AN1 y AN2 (Anexo I). La calidad del agua es excelente según los sólidos y tiene bajo contenido de bacterias (<8 UFC/100ml). El ICA calculado va de 94-86%, considerada “excelente” para casi todos los usos, aunque requiere tratamiento previo para consumo humano porque hay contaminación fecal de origen animal (Flores, 2008). La calidad del agua es uno de los servicios ecosistémicos de regulación más importantes.

Otros servicios generados en esta zona son provisión de agua, control de la erosión y mantenimiento del suelo, regulación sub superficial y basal (Jujnovsky, 2006). Siendo una comunidad con un alto porcentaje de suelo desnudo (~35%), y compuesta de un tipo de suelo altamente erosionable, es muy importante que se conserve el servicio de mantenimiento del suelo. Los impulsores de cambio identificados en esta zona fueron la erosión, la deforestación, la tala ilegal y la ganadería. Dichas actividades aceleran la pérdida de los servicios mencionados porque le restan estabilidad al suelo.

Otros factores de deterioro fueron identificados por Briones en la zona ribereña (en prensa), son de tipo pecuario, con actividades de pastoreo y compactación del suelo por caminos de terracería; el difícil acceso a la parte más alta de la cuenca ha impedido el desarrollo de actividades de recreación. Hay autores (Jujnovsky, 2006) que han propuesto crear programas de reforestación en la parte alta de la cuenca, y evitar tirar basura a los alrededores.

Área natural: Zona media (bosque *Abies religiosa*)

La zona media se encuentra a 3100 msnm y es la comunidad con mayor superficie, abarcando el 40% de la cuenca (Galeana, 2008). Posee una densa de cobertura vegetal (Nava, 2003). Tiene laderas pronunciadas, en ocasiones con 45° de inclinación (Jujnovsky, 2006) con suelos ácidos y someros. Ésta comunidad es la que presenta mayor precipitación (Dobler, 2010) y en donde se reporta gran deterioro, se han identificado asentamientos humanos, caminos, excretas

humanas y el establecimiento de un truchero que usa el agua del río (Briones, en prensa). Esta zona está representada por el sitio AN3, cuya calidad de agua es excelente según los sólidos, presenta menos de 80 UFC/100 ml, por lo que no es recomendable para consumo humano sin un tratamiento previo. El ICA calculado para este sitio es de 92%, lo que quiere decir que sigue siendo excelente para la mayoría de los usos (Flores, 2008) y el número de especies de algas reportadas es de 82 (SMA-GDF, 2008).

Los servicios ecosistémicos generados en la zona media son provisión de agua, control de la erosión y mantenimiento del suelo, provisión y calidad del agua, remoción de masa, recreación y belleza escénica (Jujnovsky, 2006), también es un importante reservorio de carbono (Nava, 2006; Galeana, 2008). Dadas sus abruptas pendientes, es importante que la cobertura vegetal siga siendo densa y así evitar deslaves. Todos los servicios se mantienen, pero el de calidad del agua puede perderse gradualmente si sigue habiendo actividades de recreación. Entre los impulsores de cambio directos están la tala clandestina y la construcción de obras y caminos.

Se recomienda conservar la cobertura vegetal y promover el ecoturismo de forma sustentable, que impacte al mínimo la calidad del agua. El pago por servicios ambientales (PSA) en la cuenca puede ser una vía para conservar la calidad del agua, ya que es la zona media una de las más importantes para la provisión de agua (González, 2008).

Área natural: Zona baja (bosque mixto y de *Quercus* spp)

Esta es la comunidad vegetal más baja de toda la cuenca (2570-3000 msnm). Tiene suelo somero: Andosol y Litosol, con pH ácido. Presenta gran influencia humana, tanto para la realización de actividades agrícolas como turísticas (Almeida *et al.*, 2007). En esta comunidad hay una mezcla de diferentes especies arbóreas, la cobertura promedio es de 80% (Nava, 2003). No obstante existen indicadores de deterioro que son compartidos con la zona media de la cuenca, estos abarcan los caminos y terracerías y los asentamientos humanos (Briones, en prensa). Los impulsores de cambio directos identificados son la agricultura, los incendios forestales, la contaminación del río y el crecimiento de la mancha urbana (Almeida *et al.*, 2007).

Los sitios de muestreo correspondientes a esta zona son el AN4 y AN5, en donde hay excelente calidad de agua de acuerdo a los sólidos. Sin embargo las algas reportadas por el plan maestro de rescate al río Magdalena (SMA-GDF, 2008), van de 66 especies en el 2° dinamo (AN4) a 16 en la cañada (AN5). El ICA calculado para la cañada es de 70%, lo que se considera levemente

contaminada para consumo humano y agrícola, pero excelente para pesca y recreación (Flores, 2008). La agricultura en la parte baja favorece el arrastre de lixiviados, con frecuencia hay plaguicidas en el suelo que son llevados por escurrimiento al río, como ha reportado Rentería (2009) en la parte media y baja de la cuenca, y en la zona urbana.

Los incendios en esta zona puede que sean son más frecuentes debido a la influencia humana (Almeida *et al.*, 2007). La tasa de incendios no es alta, pero afecta a la vegetación, que se ha mencionado tiene un papel fundamental en la protección contra erosión hídrica y disgregación del suelo.

En esta zona hay mayor consumo de servicios ecosistémicos, siendo estos el control de inundaciones, recreación y belleza escénica. Sin embargo, la contaminación al río se hace más evidente, disminuyendo el valor estético del lugar. Esto se da porque existen asentamientos humanos dentro el suelo de conservación, que a pesar de que no están permitidos son rápidamente regularizados (Aguilar, 2008).

El origen de la contaminación bacteriana es humano, a partir del AN5 comienzan los tubos de agua residual. Esto se suma con las aguas domésticas clandestinas y el agua sucia desechada por los comerciantes de esta zona. Al igual que en la zona media, deben promoverse las actividades de recreación de forma sustentable y realizar campañas de educación ambiental para los visitantes y residentes de la zona.

Zona urbana

Se considera como zona urbana la región en donde ya no hay comunidades vegetales predominantes. La vegetación reportada es ribereña, principalmente herbácea y con algunos ejemplares arbóreos (Flores y Vázquez, en prensa). Los sitios de muestreo de esta zona son todos los delimitados como ZU (Anexo I). En esta región hay múltiples tubos de descarga (Velázquez, 2009), por lo que las concentraciones bacterianas aumentan considerablemente superando los 7.06×10^7 UFC/100 ml (Aguilar *et al.*, 2009). El ICA del río Magdalena a partir de la ZU hasta su entronque con río Churubusco va de 49% y alcanza un valor máximo de 15%; éste último es inaceptable para todos los usos contemplados por CONAGUA (Flores, 2008). Por el contrario, los sólidos indican un estado aceptable-contaminado en exactamente los mismos sitios. Esto indica que el sistema de clasificación basado en sólidos es más laxo que la evaluación en conjunto con otros parámetros. Las especies de algas calculadas para la ZU van de 3-5, con géneros como *Nitzschia*, *Fragilaria* y *Cymbella*, consideradas cosmopolitas y resistentes a la contaminación (Bojorge-García, 2006; SMA-GDF, 2008). Es probable que las

algas dejen de existir en los sitios más contaminados, como lo son aquellos después del río Eslava (ZU3).

Ni los servicios ecosistémicos ni los impulsores de cambio han sido identificados en la zona urbana, sin embargo puede inferirse que están perdiéndose. No hay provisión ni calidad del agua por la intensiva contaminación, y la recreación tampoco es recomendable. El mal olor y poco valor estético del río a esta altura de la cuenca impiden que se desarrolle el turismo. El impulsor de cambio más importante es el crecimiento de la mancha urbana, del cual se desprenden otros impulsores como las descargas de agua residual, la basura arrojada a los alrededores y las excretas humanas y de animales.

Algunas de las soluciones al grave problema de calidad del río son restablecer la vegetación ribereña en el cauce, para ayudar a mantener el suelo, e incluso usar especies bioremediadoras como parte de la estrategia de rehabilitación. La implementación de otras plantas de tratamiento pudiera ayudar a la purificación del agua, como ya ha sugerido Velázquez (2009).

Frente a los escenarios expuestos, los SEh pueden perderse debido a la intervención humana, los principales aportadores de contaminantes del agua. Hace falta mayor difusión de la educación ambiental y plantas de tratamiento a lo largo de la ZU. Los límites máximos permisibles de las NOM no toman en cuenta las particularidades del sitio en donde se está caracterizando la calidad del agua. Conocer las características de los sistemas naturales antes del deterioro es fundamental para establecer si se encuentran en estado alterado o no.

Se debe mejorar la calidad del agua en la ZU y mantenerla en el AN, en donde todavía es satisfactoria. Para lograr esto, deben conservarse las comunidades vegetales, que son las que proveen los servicios ecosistémicos y no contaminar el agua.

VI. CONCLUSIONES

La cantidad de sólidos, carbono y bacterias en el río Magdalena aumenta cuando entra en contacto con actividades humanas. En el área natural la calidad es excelente de acuerdo a los sólidos, por debajo de la norma para aguas de reúso. Los SDT tienen límites máximos permisibles que no aplican para todos los cuerpos de agua dulce, por lo que las normas oficiales mexicanas son poco específicas para éste parámetro. Las bacterias del área natural son de origen animal mientras que en la zona urbana son de origen humano y la cantidad de sólidos es alta, por lo que se le considera contaminada.

La disminución de calidad del agua del río se debe principalmente a las descargas residuales de la zona urbana. La zona urbana es más heterogénea que el área natural por los constantes aportes de los tubos de descarga. El agua de lluvia diluyó los sólidos, aunque las diferencias entre lluvias y secas no fueron estadísticamente significativas.

La agricultura y ganadería aportan plaguicidas y bacterias respectivamente, pero su contribución a la contaminación del río es proporcionalmente menor.

Las normas oficiales mexicanas en materia de sólidos son poco específicas con respecto al tipo de cuerpo de agua superficial, debe haber una estandarización para los sistemas lóticos y tomar en cuenta la geología y edafología del ecosistema.

Se sugiere que se tomen medidas de manejo muy estrictas para la conservación del bosque en el área natural con el fin de mantener los servicios ecosistémicos, en particular el de calidad del agua.

En la zona baja y urbana deben establecerse lineamientos de obras de ingeniería para mejorar el drenaje, así como plantas de tratamiento y establecer una estrategia de educación ambiental. Se propone la utilización de especies ribereñas depuradoras que puedan ayudar a mejorar la calidad del agua en la zona urbana y aumentar el valor estético del sitio, así como de recuperar los servicios de provisión y calidad del agua.

VII. LITERATURA CITADA

- Acosta, S. 2001. *Las tierras comunales de la Magdalena contreras*. Tesis de licenciatura en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras. UNAM.
- Aguilar, A.G. 2008. Peri-urbanization, illegal settlements and environmental impact in Mexico City. *Cities* 25: 133-145.
- Aguilar, M.J., D.E., Torres y H.M. Mazari. 2009. *Informe técnico de la calidad del agua del río Magdalena durante el periodo 2009*. Instituto de Ecología, UNAM.
- Álvarez, K. 2000. *Geografía de la educación ambiental: algunas propuestas de trabajo en el Bosque de los Dinamos, área de conservación ecológica de la delegación Magdalena Contreras*. Tesis de licenciatura en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM.
- Almeida, L.L., Nava, M., Ramos, A., Espinosa, M., Ordoñez, M.J. y Jujnovsky, J. 2007. Servicios ecosistémicos en la cuenca del río Magdalena, D.F. México. *Gaceta Ecológica edición especial*. 84-85: 53-64.
- APHA (American Public Health Association), 2005. *Standard methods for examination of water and wastewater*. 21a edición. Port City Press. EEUU.
- Apollo 9000 TOC combustion analyzer User Manual. 2003. Teledyne Tekmar. Mason, Ohio USA.: 157 p
- Ávila-Akerberg, V.D. 2004. *Autenticidad de los bosques en la cuenca alta del río Magdalena: diagnóstico hacia la restauración ecológica*. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias, UNAM.
- Ávila-Akerberg, V.D. 2002. *La vegetación de la cuenca alta del río Magdalena: un enfoque florístico, fitosociológico y estructural*. Tesis de licenciatura en Biología. Facultad de Ciencias, UNAM. 86 pp.
- Ávila-Akerberg, V. 2010. *Forest quality in the southwest of Mexico City. Assessment towards ecological restoration of ecosystem services*. Culterra, Band 56, Institut für Landespflege, University of Freiburg, Germany, 200 pp.
- Ávila-Akerberg, B. G. Hidalgo, M.N. López y L.Almeida-Leñero. 2008. Refugio de fitodiversidad en la ciudad de México, el caso de la cuenca del río Magdalena. *Journal of Botanical Resources Institute Texas*. 2: 605-619.
- Balvanera, P. y Cotler, H. 2007. Acercamiento al estudio de los servicios ecosistémicos. *Gaceta ecológica edición especial*. 84-85: 8-15.
- Barnes, R.T. y P.A. Raymond. 2009. The contribution of agricultural and rural activities to inorganic carbon influxes within temperate watersheds. *Chemical Geology*. 266: 318-327.
- Bilotta, G.S. y R.E., Brazier. 2008. Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota. *Water Research*. 42: 2849-2861.
- Bojorge-García, M.G. 2002. *Ecología de comunidades algales en una localidad del río Magdalena, D.F.* Tesis de licenciatura en Biología. Facultad de Ciencias, UNAM.
- Bojorge-García, M.G. 2006. *Indicadores biológicos de la calidad del agua en el río Magdalena, México, D.F.* Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias, UNAM.

- Boyd, J. y Banzhaf, S. 2007. What are ecosystem services?. The need for standardized environmental accounting units. *Ecological Economics* 63: 616-626.
- Brauman, K.A., Daily, G.C., Duarte, T.K. y Mooney, H.A. 2007. The nature and value of ecosystem services highlighting hydrologic services. *Annual. Environmental Resources*. 32: 67-98.
- Briones, G.J.A. en prensa. *Deterioro ambiental de la vegetación ribereña del río Magdalena, D.F. México*. Tesis de licenciatura en Biología. Facultad de Ciencias, UNAM.
- Carabias, L.J., V. Arriaga y V. Cervantes. 1994. Los recursos naturales de México y el desarrollo. en: Pascual Moncayo P.y J. Woldenberg. (coords.) Desarrollo, desigualdad y medio ambiente. Ed. Cal y arena. México. Pp. 303-345.
- Carabias, L.J. y R. Landa 2005. Cap.2 Situación de los recursos hídricos en México. en: Carabias y ed. *Agua medio ambiente y sociedad: hacia una gestión integral de los recursos hídricos en México*. Colegio de México-UNAM. México. Pp. 23-43.
- Carpenter, S.R., H.A. Mooney, J. Agard, D. Capistrano, R.S. DeFires, S. Díaz, T. Dietz, A.K. Duraiappah, A. Oteng-Yeboah, H.M. Pereira, Ch. Perring, W.V. Reid, J. Sarukhan, R.J. Scholes y A. Whyte. 2008. Science for managing ecosystem services: beyond the Millennium Ecosystem Assessment. *PNAS*.
- Castillo, A., Magaña, A., Pujadas, A., Martínez, L., y Godínez, C. 2005. Understanding the interaction of rural people with ecosystems. A case study in a tropical dry forest in Mexico. *Ecosystems*.8: 630-643.
- Chang, M. 2006. *Forest hydrology. An introduction to water and forests*. 2a edición. Taylor and Francis. EUA. 442 pp.
- Connell, Des W. 2005. *Basic concepts of environmental chemistry*. 2a edición. CRC Taylor & Francis group. EUA. 462 pp.
- CONAGUA, 2008. *Estadísticas de agua en México*. México. 233 pp.
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B. Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V. Paruelo, J. Raskin, R.G. Sutton, P. y van den Belt, M. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*. 387: 253-260.
- Daily, G. C. (ed.) 1997. *Nature's services. Societal dependence on natural ecosystems*. Island Press. EUA. 392 pp.
- Daily, G.C., P. Alexander, L. Ehrlich, L. Goulder, P.A. Matson, H. Mooney, S. Postel, S.T. Scheneider, D. Tilman y G.M. Woodwell. 1997. Ecosystem services: Benefits supplied to human societies by natural ecosystems. *Issues in Ecology*. 2:16.
- Dale, H.V. y Polasky, S. 2007. Measures of the effects of agricultural practices on ecosystem services. *Ecological Economics* 64: 286-296.
- Dunne, T. y L.B. Leopold. 1978. *Water in environmental planning*. W.H. Freeman and Company. EEUU. 796 pp.
- De Groot, R.S. M.A. Wilson, y R.M.J. Boumans. 2002. A typology of the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*. 41: 393-408.
- De la Lanza, E.G. 2007. *Las aguas interiores de la Ciudad de México: conceptos y casos*. Ed. AGT, S.A. Pp. 77-92.

- Dobler, M.C. E. 2010. *Caracterización del clima y su relación con la distribución de la vegetación en el suroeste del D.F. México*. Tesis de licenciatura en Biología. Facultad de Ciencias, UNAM. 55pp.
- DOF (Diario Oficial de la Federación) 1994. NOM-014-SSA1-1993. Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de aguas públicos y privados. México, D.F.
- DOF (Diario Oficial de la Federación) 1997. NOM-001-SEMARNAT-1996 la cual establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales en aguas y bienes nacionales. México, D.F.
- DOF (Diario Oficial de la Federación) 1998. NOM-002-SEMARNAT-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. México, D.F.
- DOF (Diario Oficial de la Federación) 1998b. NOM-003-SEMARNAT-1997 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. México, D.F.
- DOF (Diario Oficial de la Federación) 2000. Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM 014-SSA1-1993. Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamiento a los que debe someterse el agua para su potabilización. México, D.F.
- DOF (Diario Oficial de la Federación) 2001. NMX-AA-034-SCFI-2001 la cual dicta en el análisis de agua, la determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
- En Chee, Y. 2004. An ecological perspective on the valuation of ecosystem services. *Biological conservation* 120: 549-565.
- Fernández, G.M.T. 1997. *Programa de manejo para la conservación de la zona protectora forestal cañada de contreras*. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias, UNAM.
- Figueruelo, J.E. y Marino, M.D. 2001. *Química física del medio ambiente*. Ed. Reverté. México. 333 pp.
- Fisher, B., Turner, R.K. y Morling, P. 2009. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*. 68: 643-653.
- Flores, G.N. en prensa. *Estado de la vegetación arbórea del río Magdalena desde Francisco Sosa hasta los límites de viveros de Coyoacán*. Tesis de licenciatura en Biología. Facultad de Ciencias, UNAM.
- Flores, P. Ma de los A. 2008. *Evaluación de la calidad del agua en el río Magdalena*. Tesis de licenciatura. Facultad de Químico farmacéutica biológica, UNAM.
- Galeana, P.J.M. 2008. *Estimación del contenido y captura potencial de carbono, su valoración económica en la cuenca del río Magdalena, D.F., México*. Tesis de licenciatura en Geografía. Facultad de filosofía y letras, UNAM.
- Gómez, S.P. 2007. *Redefinición de los ríos de la Ciudad de México como solución hidráulica y urbana: estudio de caso el río de la Magdalena*. Tesis de Maestría. Facultad de Arquitectura, UNAM.
- González, M.T.M. 2008. *Modelación hidrológica como base para el pago por servicios ambientales en la microcuenca del río Magdalena*. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Querétaro. 137 pp.

- Gutiérrez, N.R. 2007. *Introducción al estudio del derecho ambiental*. Ed. Porrúa. México. 576 pp.
- Heuer, F.R. y Lamberti, G.A. (eds). 2007. *Methods in stream ecology*. Academic Press. 2ª edición. EEUU.
- James, A., Gaston, K.J. y Balmford, A. 2001. Can we afford to conserve Biodiversity?. *Bioscience*. 51: 43-52.
- Jímenez y Marin (Eds), 2004. *El agua en México vista desde la academia*. México. 177pp.
- Jujnovsky, J. 2003. *Las unidades del paisaje en la cuenca alta del río Magdalena, México, D.F. Base fundamental para la planificación ambiental*. Tesis de licenciatura en Biología. Facultad de Ciencias, UNAM.
- Jujnovsky, J. 2006. *Servicios ecosistémicos relacionados con el recurso agua en la cuenca del río Magdalena, Distrito Federal, México*. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias, UNAM.
- Kremen, C. 2005. Managing ecosystem services: what do we need to know about their ecology?. *Ecology letters* 8: 468-479.
- Kumar, M. y P. Kumar. 2008. Valuation of ecosystem services: a psycho-cultural perspective. *Ecological economics*. 64: 808-819.
- López, T. D. M. 2008. *Elaboración de criterios para la restauración de la cuenca del río Cuizmalá, Jalisco con base en un análisis de agua*. Tesis de Maestría. Instituto de Ecología, UNAM.
- Mace, G.M. 2008. *Millenium ecosystem assesment*. en: Encyclopedia of life sciences. (ELS). John Wiley and Sons, Ltd: Chishester.
- Martínez, M.A.G., A.S. Villegas y F.J. Faulin. 2006. *Bioestadística amigable*. 2ª edición. Díaz de Santos. España. 908 pp.
- Mason, A.F.A. 1984. *Biología de la contaminación del agua dulce*. Ed. Alhambra. España. 285 pp.
- Manahan, S.E. 2001. *Environmental chemistry*. CRC Press. EEUU.
- Mazari-H.M., B. Torres-Beristain, E. Velázquez, J.J. Calva y S.D. Pillai. 1999. Bacterial and viral indicators of fecal pollution in Mexico City's southern aquifer. *Journal of Environmental Science Health*. A34 (9): 1715-1735.
- Meynard, Ch.N., Lara, A., Pino, M., Soto, D., Nahuelhual, L., Núñez, D., Echeverría, C. Jara, C., Oyarzún, C., Jiménez, M., y Morey, F. 2007. La integración de la ciencia, la economía y la sociedad: Servicios ecosistémicos en la ecoregión de los bosques lluviosos valdivianos en el cono sur de Sudamérica. *Gaceta Ecológica edición especial*. 84-85: 29-38.
- MEA (Millenium Ecosystem Assesment). 2005. *Ecosystems and human well-being*. Cap2
- Monges, M.Y.L. 2009. *Calidad del agua como elemento integrador para la rehabilitación del río Magdalena, Distrito Federal, México*. Tesis de Maestría. Instituto de Ecología, UNAM.
- Nava, L.M.Z. 2003. *Los bosques de la cuenca alta del río Magdalena, D.F. México. Un estudio de vegetación y fitodiversidad*. Tesis de licenciatura en Biología. Facultad de Ciencias, UNAM.

- Nava, L.M.Z. 2006. *Carbono almacenado como servicio ecosistémico y criterios de restauración, en el bosque Abies religiosa de la cuenca del Río Magdalena, D.F.* Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias, UNAM.
- Ontiveros, D.A.1980. *Análisis físico y algunos aspectos socioeconómicos de la cuenca del río Magdalena, México.* Tesis de licenciatura en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM.
- Paterson, T.M. y Coelho, D.L. 2009. Ecosystem services: foundation, opportunities and challenges for the forest products sector. *Forest Ecology and Management* 257: 1637-1646.
- PNUMA, 2003. *GEO Ciudad de México, perspectivas del medio ambiente: una visión territorial del sistema urbano ambiental.* PNUMA.
- Postel, S.L. y Thompson, Jr. B.H. 2005. Watershed protection: capturing the benefits of nature's water supply services. *Natural Resources Forum.* 29: 98-108.
- Quétier, F., Tapella, E., Conti, G., Cáceres, D., y Díaz, S. 2007. Servicios ecosistémicos y actores sociales. Aspectos conceptuales y metodológicos para un estudio interdisciplinario. *Gaceta ecológica edición especial.* 84-85: 17-27.
- Ramos, E. A. 2008. *Propuesta de reclasificación y zonificación participativa en la zona protectora forestal Cañada de Contreras, Distrito Federal, México.* Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias, UNAM.
- Rentería, M.J. 2009. *Diagnóstico de plaguicidas y fenoles como parte de la estrategia para la restauración del río Magdalena, México.* Tesis de licenciatura en Química Farmacéutica Biológica. Facultad de Química, UNAM.
- Saldaña, A. 2008. *Prioridades de restauración para la recuperación de servicios ecosistémicos asociados a los aspectos hidrológicos de la cuenca del río Cuitzmala, en el pacífico mexicano.* Tesis de Maestría. Centro de Investigaciones en Ecosistemas, UNAM. 150 pp.
- Sandoval, C.J. 2008. *Evaluación de la calidad del agua en los canales de Xochimilco para su recuperación ecológica.* Tesis de Maestría. Instituto de Ecología, UNAM.
- Santibañez, A.G. 2009. *Composición y estructura del bosque de Abies religiosa en función de la heterogeneidad ambiental y determinación de su grado de conservación en la cuenca del río Magdalena, México D.F.* Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias, UNAM.
- SEMARNAT, 2008. *Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales.* GDF-SEMARNAT. 380 pp.
- Simmons, I.G. 1982. *Ecología de los recursos naturales.* Ediciones Omega. España.
- SMA-GDF. 2008. Plan Maestro de manejo integral y aprovechamiento sustentable de la cuenca del río Magdalena, D.F. México. Secretaría del Medio Ambiente. Gobierno del Distrito Federal.
- Swinton, S.M., Lupi, F., Robertson, G.P. y Hamilton, S.K. 2007. Ecosystem services and agriculture: cultivating agricultural ecosystem for diverse benefits. *Ecological Economics.* 64: 245-252.
- Tchobanoglous, G. 2003. *Wastewater treatment engineering and reuse.* M^cGraw Hill. 4a edición. 1750 pp.

- Tortajada, C., Guerrero, V. y Sandoval, R. 2004. *Hacia una gestión integral del agua en México: retos y alternativas*. Centro del Tercer Mundo para el manejo de agua, A.C. Porrúa-Cámara de diputados, México.
- Towend, J. 2006. *Practical statistics for environmental and biological scientists*. Ed. John and Wiley. 273 pp.
- Turner, R.K., Paavola, J. Cooper, P., Farber, S., Jessamy, V. y Georgou, S. 2003. Valuing nature: lessons learned and future research direction. *Ecological economics*. 46: 493-510.
- USDA (United States Department of Agriculture). 1996. *National Handbook of water quality monitoring*. EUA. 229 pp.
- Vázquez, M.M. en prensa. Vegetación ribereña en el río Magdalena de la Cañada a Periférico, México D.F. Tesis de licenciatura en Biología. Facultad de Ciencias, UNAM.
- Velázquez, P.K. 2009. *Propuesta de plantas de tratamiento para el saneamiento del río Magdalena*. Tesis de licenciatura en Ingeniería Química. FES Zaragoza, UNAM.
- Weiner, E.R. 2008. *Applications of environmental aquatic chemistry. A practical guide*. 2ª edición. CRC Press. EUA.
- Wetzel, R.G. 2001. *Limnology: lake and river ecosystems*. 3a edición. Academic. EUA. 1006 pp.
- Wunder, S., Wertz-Kanounnikoff, S. y Moreno-Sánchez, R. 2007. Pago por servicios ambientales: una nueva forma de conservar la biodiversidad. *Gaceta ecológica. Número especial*. 84-85: 39-52.

ANEXO I

Tabla A-1. Sitios de muestreo representativos del Área Natural y la Zona Urbana a lo largo del río Magdalena, Distrito Federal.

Sitio	Descripción	Coord X	Coord Y	Altitud
AN1	Origen del río	464725	2128479	3570
AN2	Cieneguillas	464869	2128198	3560
AN3	Cuarto Dinamo antes del puente	469127	2130034	3100
AN4	Segundo Dinamo, antes de la obra de toma de la planta potabilizadora en Los Dinamos	471435	2132264	2770
AN5	Primer Dinamo, antes de la obra de toma de la nueva planta potabilizadora en La Cañada	473758	2133833	2540
ZU1	Terminal de autobuses Contreras, puente entre la terminal y la zona de casas	474345	2134026	2510
ZU2	Río Magdalena antes de la confluencia con el río Eslava	475101	2134234	2470
ZU3	Río Magdalena después de la confluencia del con el río Eslava	475145	2134208	2470
ZU4	Después del puente de Camino a Santa Teresa y Av. México	476433	2135075	2405
ZU5	Hospital Ángeles del Pedregal a un costado de salida del estacionamiento a lateral del Periférico	476794	2135467	2400
ZU6	Afluente río Magdalena a la Presa Anzaldo	481982	2140427	2250
ZU7	Viveros de Coyoacán	476962	2136084	2380

ANEXO II

Fotografías de los sitios de muestreo.



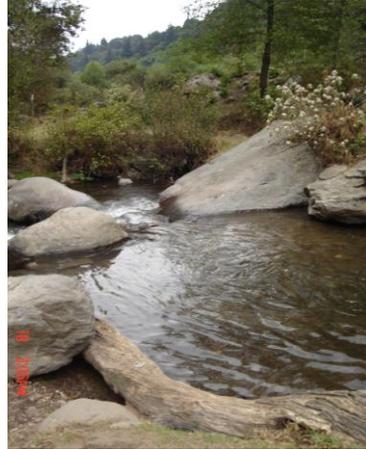
AN1. Origen del río



AN2. Cieneguillas



AN3. 4° dinamo antes del puente



AN4. 2° Dinamo



AN5. 1° dinamo. Antes de la nueva planta potabilizadora



ZU1. Terminal de autobuses "Benito Juárez"



ZU2. Río Magdalena antes de la confluencia con el río Eslava



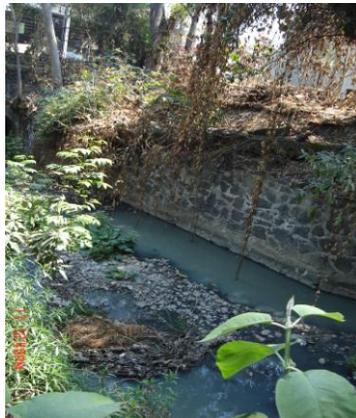
ZU3. Río Magdalena después de la confluencia con el río Eslava



ZU4. Camino Santa Teresa y Av. México



ZU5. Hospital Ángeles del Pedregal



ZU6. Viveros de Coyoacán



ZU7. La presa Anzaldo