



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**POSGRADO EN CIENCIAS  
BIOLÓGICAS**

Facultad de Ciencias

SERVICIOS ECOSISTÉMICOS RELACIONADOS CON EL  
RECURSO AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO MAGDALENA,  
DISTRITO FEDERAL, MÉXICO

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

**MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

**(BIOLOGÍA AMBIENTAL)**

PRESENTA

**JULIETA JUJNOVSKY ORLANDINI**

DIRECTORA DE TESIS: DRA. LUCÍA ALMEIDA LEÑERO

MÉXICO, D. F.

ABRIL 2006



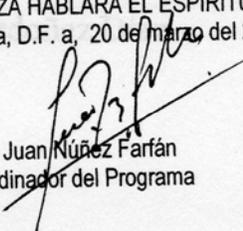
Ing. Leopoldo Silva Gutiérrez  
Director General de Administración Escolar, UNAM  
Presente

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la reunión ordinaria del Comité Académico del Posgrado en Ciencias Biológicas, celebrada el día 21 de noviembre del 2005, se acordó poner a su consideración el siguiente jurado para el examen de grado de Maestría en Ciencias Biológicas (Biología Ambiental) de la alumna **Jujnovsky Orlandini Julieta** con número de cuenta **98770234** con la tesis titulada: **"Servicios ecosistémicos relacionados con el recurso agua en el cuenca del río Magdalena, Distrito Federal, México"**, bajo la dirección de la **Dra. Lucía Almeida Leñero**.

Presidente:	Dr. José Manuel Maass Moreno
Vocal:	Dr. Jorge López Blanco
Secretario:	Dr. Lucía Almeida Leñero
Suplente:	Dra. Patricia Balvanera Levy
Suplente:	Dra. Marisa Mazari Hiriart

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cd. Universitaria, D.F. a, 20 de marzo del 2006

  
Dr. Juan Nuñez Farfán  
Coordinador del Programa

c.c.p. Expediente del interesado

Se agradece ampliamente las becas otorgadas por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (181853-CONACYT), la Dirección General de Estudios de Posgrado (DGEP), por la Comisión Nacional Forestal (Conafor-2003-C03-10196/A-1) y por la fundación PACKARD, mismas que permitieron la realización del programa de maestría en Ciencias Biológicas.

La presente investigación forma parte del macroproyecto: Manejo de Ecosistemas y Desarrollo Humano, Universidad Nacional Autónoma de México, SDEI-PTID-02.

El Comité Tutoral del presente trabajo de investigación estuvo integrado por:

- Dra. Lucía Almeida Leñero
- Dr. Manuel Maass Moreno
- Dra. Marisa Mazari Hiriart
- Dra. María de Jesús Ordoñez Díaz

# ÍNDICE

<b>RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>I.- INTRODUCCIÓN</b>	<b>2</b>
<b>I.1 Marco Conceptual</b>	<b>2</b>
<b>I.1.1 Servicios ecosistémicos</b>	<b>2</b>
<b>I.1.2 Hidrología forestal y ciclo hidrológico</b>	<b>4</b>
<b>I.2 Antecedentes</b>	<b>5</b>
<b>I.2.1 El agua en el valle de México</b>	<b>6</b>
<b>I.2.2 Historia de la cuenca del río Magdalena, México, D.F.</b>	<b>7</b>
<b>I.2.3 Características de la zona de estudio</b>	<b>8</b>
<b>1.3 Justificación y objetivo</b>	<b>16</b>
<b>II.- METODOLOGÍA</b>	<b>18</b>
<b>II.1 Caracterización ambiental y comportamiento hidrológico de la cuenca del río Magdalena</b>	<b>19</b>
<b>II.2 Identificación y localización espacial de los servicios ecosistémicos relacionados con el recurso agua que brinda la CRM.</b>	<b>24</b>
<b>II.3 Recomendaciones de manejo en la zona de acuerdo a los servicios ecosistémicos que provee</b>	<b>28</b>
<b>III.- RESULTADOS</b>	<b>28</b>
<b>III.1 Caracterización ambiental y análisis del comportamiento hidrológico de la cuenca del río Magdalena</b>	<b>28</b>
<b>III.1.1 Unidades fito altitudinales</b>	<b>28</b>
<b>III.1.2 Evaluación de características físicas</b>	<b>31</b>
<b>III.1.3 Precipitación, balance hídrico y escorrentía</b>	<b>33</b>
<b>III.2 Identificación y localización espacial de los servicios ecosistémicos relacionados con el agua que brinda la CRM</b>	<b>43</b>
<b>III.3 Recomendaciones de manejo para cada unidad ambiental de acuerdo a los servicios ecosistémicos que provee</b>	<b>51</b>

<b>IV.- DISCUSIÓN</b>	<b>54</b>
<b>IV.1 Análisis del comportamiento hidrológico de la cuenca</b>	<b>54</b>
<b>IV.2 Gestión del agua</b>	<b>55</b>
<b>IV. 3 Servicios ecosistémicos en la CRM y sus implicaciones</b>	<b>56</b>
<b>IV. 4 Recomendaciones y problemática de la restauración ecológica en la CRM</b>	<b>58</b>
<b>IV. 5 El caso de las cuencas Catskill/Delaware vs. la CRM</b>	<b>59</b>
<b>V .- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>61</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>64</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>69</b>

## RESUMEN

Los servicios ecosistémicos son todos los beneficios que los hombres obtienen de los ecosistemas. En la cuenca del río Magdalena (CRM), localizada al suroeste del Distrito Federal, con una superficie cercana a 3000 ha, se evaluaron los servicios ecosistémicos relacionados con el recurso agua. Mediante la caracterización de la cuenca en unidades fito altitudinales, con base en su comportamiento hidrológico y con entrevistas a expertos, se identificaron los servicios y se ubicaron las zonas donde se generan y consumen. Así también se dan recomendaciones de restauración para la zona. Se dividió a la cuenca en cuatro unidades fito altitudinales de acuerdo a la vegetación y relieve; y se realizaron balances hídricos para calcular cuánta agua genera cada unidad. Dichos datos se compararon con la estación de aforo del río Magdalena. Los resultados mostraron que en la CRM escurren anualmente 20 millones de m<sup>3</sup> de agua, lo cual equivale a un gasto de 0.63 m<sup>3</sup>/s. El área presenta material geológico poco permeable y suelos muy permeables, lo cual permite que el agua penetre al suelo por escurrimiento sub-superficial y al llegar a capas más profundas menos permeables escurra de manera basal. Los datos reflejan que el aporte principal de agua se hace directamente a la base de la cuenca en el río Magdalena, en lugar de infiltrarse al acuífero de valle de México. La CRM se debe restaurar de acuerdo a los servicios ecosistémicos que provee por unidad fito altitudinal. En las unidades altas de *Pinus hartwegii* se propone hacer uso forestal; en la media de *Abies religiosa*, es necesario que se realicen exclusivamente actividades para la conservación para retención de suelo y humedad, así como conservación de la cobertura vegetal, ya que es la zona donde se está captando más agua y donde existe un mayor peligro a la remoción en masa. En la unidad baja de bosque mixto, se deben conservar principalmente los servicios culturales. En lo que se refiere a actividades de restauración, es fundamental que a todo lo largo del río, desde donde nace y hasta la zona más baja, así como a ambos lados del cauce, se restaure la vegetación riparia, lo que permitirá restablecer la calidad del agua. En cuestiones de aprovechamiento y calidad del recurso, es necesario contar con sistemas eficientes de filtración, para que el agua no se contamine cuenca abajo.

**Palabras claves:** servicios ecosistémicos, agua, bosque, balance hídrico, cuenca del río Magdalena.

## **I.-INTRODUCCIÓN**

### **I.1 Marco conceptual**

La concepción de los ecosistemas, como importantes para el bienestar de los seres humanos, surge desde hace más de 40 años, pero comienza a tomar auge a finales de los 90 (Costanza et al., 1997; Daily, 1997b). Posteriormente, en la Asamblea General de las Naciones Unidas, en abril de 2000 se discutió la estrecha relación que existe entre el incremento de la pobreza mundial y el deterioro del ambiente. Debido a ello, se genera un documento elaborado por científicos de todo el mundo y avalado por la Organización de las Naciones Unidas que trata de buscar el equilibrio entre la conservación de los ecosistemas y el bienestar humano. Este informe se conoce como el *Millennium Ecosystem Assessment* (MA.), el cual inicia en el año 2000, se genera el marco conceptual en el 2003 y los primeros reportes comienzan en el 2005. Se considera como el mayor esfuerzo de colaboración internacional para evaluar el estado de salud de nuestro planeta (Sarukhán, 2004). Dentro de este marco conceptual del M.A se basa este trabajo de investigación.

#### ***1.1.1 Servicios ecosistémicos***

El MA (2003) define a los servicios ecosistémicos como todos los beneficios que los hombres obtienen de los ecosistemas; es decir, las condiciones y procesos en donde los ecosistemas naturales y las especies que habitan en ellos satisfacen las necesidades del hombre. Esta definición retoma dos principios básicos: el concepto de “ecosistema” de Costanza et al. (1997) que incluye tanto ambiente natural como transformado y el concepto de “servicio” de Daily, el cual puede ser tanto tangible como intangible (Daily, 1997b). Los servicios ecosistémicos se pueden clasificar como:

*Servicios de provisión.*- productos obtenidos directamente del ecosistema.

*Servicios de regulación.*- aquellos que se derivan de los procesos ecosistémicos.

*Servicios culturales.*- productos intangibles que se obtienen de los ecosistemas.

Los servicios de soporte son los que ayudan a mantener todos los demás servicios, son los procesos controladores del ecosistema (MA., 2003).

Los ecosistemas boscosos brindan numerosos servicios tanto en escala temporal como espacial. Para Bishop y Landell-Mills (2002), los tres servicios más importantes que proveen los

bosques son: la protección de cuencas hidrográficas, la conservación de la biodiversidad, y la captura y almacenamiento de carbono atmosférico.

Dentro de la clasificación del MA los servicios ecosistémicos más importantes que proveen los bosques son (Tabla 1):

Tabla 1. Servicios ecosistémicos que proveen los bosques

<b>Provisión</b>	<b>Regulación</b>	<b>Culturales</b>
agua dulce	control de erosión y mantenimiento de suelo	belleza escénica
Madera	Almacenamiento de nutrientes	ecoturismo
Alimento	control de plagas y enfermedades	educacional
productos no maderables	control de sequías control de inundaciones y remoción en masa regulación de los regímenes de lluvia y el efecto de albedo mantenimiento de la productividad de los ecosistemas acuáticos controlando la concentración de limo y nutrientes, la temperatura del agua y turbidez. purificación del aire a través de la captura y almacenamiento de carbono atmosférico. calidad del agua regulación del agua superficial, subterránea, sub-superficial y basal	

En los servicios ecosistémicos que proporcionan los bosques existe una estrecha relación entre el agua, la vegetación y el suelo, el cambio en alguno de ellos modificaría el comportamiento de los otros (Brooks *et al.*, 1997). Existe la creencia popular de que el papel hidrológico de los bosques como un complejo terreno-raíces-detritus actúa como una “esponja” que se llena de agua durante el tiempo de lluvias y la liberan uniformemente durante los periodos secos y que con la tala del bosque se pierde el “efecto esponja” a través de la rápida oxidación (descomposición) de la materia orgánica, la compactación por maquinaria o el establecimiento de pastos, etc., dando como resultado una disminución en la producción de agua (Bruijnzeel, 2004). En realidad, los bosques tienen dos impactos principales en los flujos de agua: tienden a incrementar la infiltración y la retención de suelo, contribuyendo con la recarga de los acuíferos y reduciendo el escurrimiento; y a la vez utilizan el agua para la evapotranspiración reduciendo la recarga del agua subterránea (Bishop y Landell-Mills, 2002). Estudios realizados en distintas partes del mundo demuestran que el rendimiento anual de agua se modifica cuando la vegetación es alterada en una cuenca hidrológica (Bruijnzeel, 2004). En general, los cambios que reducen la evapotranspiración incrementan la cantidad de agua que llega a la parte baja de las cuencas. Este proceso puede reducirse cambiando la estructura y/o composición de la vegetación. El aporte de

agua en una cuenca cambia dependiendo del suelo y las condiciones climáticas. Los bosques pueden mitigar el peligro a inundaciones ya que reducen el volumen del flujo de agua durante las tormentas. Generalmente una buena cobertura vegetal es capaz de prevenir la erosión superficial y en aquellos casos donde esta cobertura está bien desarrollada, se pueden evitar igualmente los deslizamientos, aunque aquellas remociones en masa (mayor de 3 m de profundidad) están determinadas más bien por los factores geológicos y climáticos que por la vegetación misma (Bruijnzeel, 2004). La presencia de cobertura vegetal puede ayudar a reducir el impacto de la lluvia en los suelos así como la cantidad de partículas sueltas, la erosión superficial rara vez es significativa en las áreas donde la superficie del suelo se encuentra protegida contra el impacto directo de la lluvia, ya sea por una capa de hojarasca producida por la vegetación o a través de la aplicación de material (paja y material orgánico) en áreas agrícolas. Según Brooks *et al.* (1997) los aportes más altos de agua se esperarían en regiones con suelos profundos y con altos niveles de precipitación pluvial anual.

El presente estudio se enfocará en evaluar los servicios ecosistémicos que proporcionan los bosques templados pero únicamente aquellos que están relacionados con el recurso agua, de acuerdo al marco teórico del MA (2003).

### ***1.1.2 Hidrología forestal y ciclo hidrológico***

Con base en la relación vegetación-agua-suelo mencionada anteriormente, existe una ciencia enfocada al estudio cualitativo y cuantitativo de la influencia de la cobertura vegetal y su manejo en la distribución, circulación, propiedades y características del agua y sus repercusiones en el ambiente (Sánchez-Vélez, 1987). Los fenómenos hidrológicos no ocurren aislados, se relacionan con los factores ambientales y se encargan de acelerar o detener a diferentes niveles la frecuencia y desarrollo de los eventos que forman parte del ciclo hidrológico en el bosque. La dinámica del ciclo hidrológico en los bosques es un equilibrio entre los valles y las montañas, en el cual se gestan fenómenos que pueden ser definitivos para la vida y economía de una zona. Dentro de este dinamismo hay factores que tienen un carácter medianamente permanente como son: la forma de la cuenca, su relieve y litología y otros más variables como la precipitación media y su cobertura vegetal (Sánchez-Vélez, 1987).

El ciclo hidrológico a escala global, es el proceso de recirculación de agua que se concibe como un sistema cerrado, compuesto por diferentes trayectorias a través de las cuales se mueve y transforma el agua en cualquiera de sus tres estados. Estos procesos ocurren en la atmósfera,

litósfera e hidrósfera renovando los recursos hídricos del planeta (Sánchez-Vélez, 1987). El ciclo hidrológico está condicionado a las características específicas de orografía, geología, tipos y estados en los que se encuentra el suelo, tipo y cantidad de la cobertura vegetal y las características climáticas propias de cada región. Consta de siete fases fundamentales: precipitación, evaporación, intercepción, infiltración, percolación, escurrimiento y recarga subterránea. El agua que se evapora de diversos reservorios se precipita sobre la superficie terrestre y se distribuye de la siguiente forma: una parte es interceptada por la vegetación y retenida en las hojas, de allí una parte se evapora; el resto cae al suelo y se infiltra, otra más escurre superficialmente y el resto que llena los espacios del suelo percola para recargar los depósitos subterráneos. El agua que queda en el suelo es posteriormente evaporada o transpirada por la vegetación, cerrándose finalmente el ciclo (Sánchez-Vélez, 1987).

Warren Thornthwaite en 1944 introduce el término de balance hídrico para referirse al balance entre la ganancia de agua por precipitación, menos la pérdida de agua por evapotranspiración, escurrimiento y cambio en la humedad del suelo (Dunne y Leopold, 1978). Es una herramienta muy útil en el análisis de los problemas de agua en una región. El conocimiento del déficit de humedad es primordial para comprender la factibilidad de irrigación, ya que provee información sobre el volumen total de agua necesaria en cualquier época del año. A su vez, los datos sobre los excedentes de agua y la cantidad por la cual la precipitación excede las necesidades de humedad, cuando el suelo está en su capacidad de campo, es fundamental en todo estudio hidrológico.

El método de Thornthwaite utiliza la temperatura del aire como un índice de la energía disponible para la evapotranspiración asumiendo que dicha temperatura se relaciona con los efectos de la radiación neta y que, la energía disponible se comparte en proporciones iguales entre el calor atmosférico y la evapotranspiración. Sin embargo este método no contempla diferentes tipos de vegetación (Dunne y Leopold, 1978).

El uso más obvio que tiene este método es que hace una descripción básica de la hidrología de un lugar, a la vez los patrones espaciales dentro de una región pueden utilizarse en la planeación de la distribución de los recursos.

## **1.2 Antecedentes**

En las últimas décadas, se han realizados diversos estudios para evaluar qué tanto la sociedad le da una valoración económica a los servicios hidrológicos. Quizá el estudio más

conocido es el de las cuencas Cattskill/Delaware, el cual es un modelo de manejo de cuencas con base en la compensación por servicios ambientales hidrológicos ([www.nyc.gov/html/dep/watershed/](http://www.nyc.gov/html/dep/watershed/)). También en Latinoamérica, Jiménez (1996), plantea que estos estudios son importantes para proveer indicadores de la valoración hídrica que permita promover mecanismos para el reconocimiento y la apreciación económica de los servicios ecosistémicos. Salas (2000), hace un aporte a la comprensión de la dinámica de las cuencas hidrográficas caracterizando hidrológicamente un sistema de microcuencas, con énfasis en el estudio comparativo del balance hídrico en zonas con diferentes tipos de cobertura vegetal. Cabe mencionar que no hay estudios sobre los servicios ecosistémicos que generan los bosques templados relacionados con el recurso agua en la Ciudad de México, la cual tiene una crisis hidrológica bastante severa. Por ello, a continuación se menciona el problema del agua en la Ciudad de México y el caso concreto de la cuenca del río Magdalena, D.F.

### ***1.2.1 El agua en la cuenca de México***

La falta de un suministro de agua adecuado es uno de los grandes problemas generados por la explosión demográfica y el desorganizado crecimiento urbano en la zona metropolitana de la Ciudad de México. Esta gran urbe cuenta actualmente con cerca de 27 millones de habitantes (Gobierno del Distrito Federal, 2004), muchos de ellos instalados en barrios mal comunicados con la red de agua potable. A pesar de que las redes de distribución de agua o de desagüe se extienden cada vez más, en estos barrios, los servicios sanitarios son casi inexistentes (Musset, 1992).

La ciudad de México está edificada en el lecho de una cuenca endorreica, de lo que fue un sistema de cinco lagos quedan reminiscencias en Xochimilco, Chalco y Zumpango. Aunque para muchos habitantes de la capital, el agua es un problema crucial, esto resulta paradójico ya que se requirieron tres siglos de obras para expulsar el agua de esta cuenca y ahora importa de zonas circundantes a precios altos. Cuando los españoles llegaron a la cuenca de México en 1519, Tenochtitlan se hallaba rodeada de grandes extensiones lacustres que los conquistadores rápidamente decidieron secar. Según el etnohistoriador Ángel Palerm, la destrucción del sistema de diques construido por los antiguos mexicanos había contribuido enormemente a la desecación parcial de las zonas lacustres. Cuando llegaron a la cuenca de México, los españoles destruyeron los diques de tierra. Estos diques protegían a la ciudad de las inundaciones y a la vez servían para

retener las aguas durante la temporada de secas, con el fin de mantener los cultivos de riego (Palerm, 1973).

Humboldt atribuía la desaparición de los lagos en el valle de México a fenómenos naturales como la elevada evaporación que sufren a esta altitud y latitud; envejecimiento de los lagos; déficit de precipitación; la infiltración a capas más profundas por múltiples fallas. Todo esto se vio incrementado con la deforestación que ha sufrido la cuenca de México desde la conquista. Con el tiempo, la disminución de las zonas lacustres ha ido reduciendo la red hidrográfica. Musset (1992), divide la cuenca de México en 10 grandes zonas hidrológicas de acuerdo con los ríos más importantes, y que ha resistido grandes obras de construcción de diques y de canalización y estos son: San Juan Teotihuacan, Tlalmanalco y Amecameca, en la vertiente oriental, y Cuautitlán, Tepoztlán, Remedios, Hondo, Mixcoac, Tacubaya y el río Magdalena en la vertiente occidental (Musset, 1992).

### ***1.2.2 Historia de la cuenca del río Magdalena, México, D.F.***

Los antecedentes históricos de la cuenca del río Magdalena datan desde el año 1303, cuando el monarca de Culhuacán permitió a los aztecas que habían sido expulsados de la zona de Azcapozalco, asentarse en un área pedregosa junto a un río donde prosperaron y fundaron cuatro pueblos: Atlitic, “piedra de agua”, Aculco, “lugar del cuculin”, Ocotepec, “lugar de ocotes” y Totolapan, “lugar de totoles o guajolotes” (Garza, 2000). Después de la conquista española se inició la evangelización del área y se construyó un templo dedicado a Santa María Magdalena, pronto se denominó al lugar la Magdalena Atlitic. Posteriormente, en la segunda década del siglo XVII, se empezó a difundir el nombre de Contreras, apellido de Tomás y su hijo Diego, que poseían una fábrica textil y que fueron muy apreciados por sus obreros por el buen trato que les daban. Ya entrado el siglo XX, el 10 de diciembre de 1927, se publicó en el Diario Oficial de la Federación, un decreto para la creación del municipio de la Magdalena, pero un año después se transformó en la delegación Magdalena Contreras, al entrar en vigor la primera Ley Orgánica del Distrito Federal de 1928 (Garza, 2000).

Una de las principales causas del florecimiento agrícola e industrial del pueblo de la Magdalena Contreras fue la presencia del río Magdalena ya que las labores productivas desarrolladas, como obrajes, ladrilleras, explotación de carbón, huertas, se encontraban en función y aprovechamiento del río. La utilización de las aguas del mismo fue causa de numerosos conflictos desde esa época (Ontiveros, 1980).

A finales del siglo XIX, Porfirio Díaz otorga la concesión del uso del agua del río a varias fábricas de tejidos de algodón. Estas empresas generaban energía hidroeléctrica mediante dinamos, los cuales sumaban cuatro y estaban distribuidos a lo largo del cauce del río Magdalena. Estas plantas dejaron de funcionar a comienzos de los años sesenta (Ontiveros, 1980).

### ***1.2.3 Características del área de estudio***

**Localización geográfica.-** La cuenca del río Magdalena (CRM) geográficamente se localiza en 19°15'00'' N y 99°17'30'' W, con una superficie cercana a las 3000 ha. Recibe diversos nombres tales como “Cañada de Contreras”, “Zona Protectora Forestal Cañada de Contreras” o “Los Dinamos”. En el presente trabajo se denomina cuenca del río Magdalena con base en su caracterización hidrológica. Alrededor del 60% de la cuenca se encuentra en la delegación Magdalena Contreras, 30% en Álvaro Obregón y un 10% en la delegación Cuajimalpa (Figura 1).

El área de estudio se encuentra en la Sierra de las Cruces en el límite sur–occidental del Distrito Federal dentro de la cuenca de México. Es de forma alargada, su eje mayor va de suroeste a noroeste y su eje menor de norte a sur (Ontiveros, 1980). Colinda al sureste con la cuenca del río Eslava, al noroeste con las cabeceras de las cuencas de los ríos Hondo, Mixcoac, Barranca de Guadalupe y San Miguel; estos se unen al río Magdalena en la parte baja y forman el río Churubusco donde son entubadas.

**Características físicas y biológicas.-** La cuenca del río Magdalena es una formación de material ígneo extrusivo, producto de manifestaciones volcánicas del Terciario y Cuaternario, predominando las Andesitas y Dacitas. Se configuran en un relieve montañoso, la altitud mínima que presenta es de 2 500 m snm en el NE y en el SW lleva un continuo ascenso, allí alcanza las mayores cotas con un registro máximo de 3 810 m snm en las cumbres cercanas al Estado de México (Álvarez, 2000).

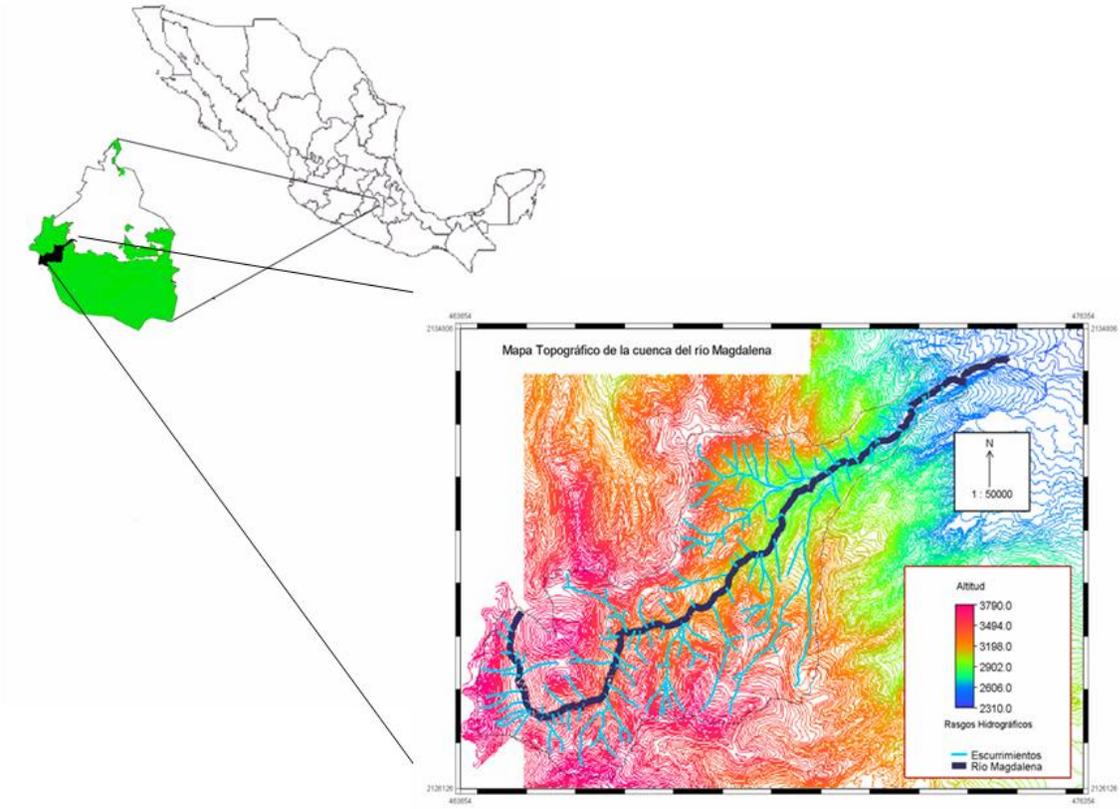


Figura 1. Localización geográfica de la cuenca del río Magdalena, D.F.

Los suelos de la CRM son en su mayoría de tipo Andosol húmico, aunque también hay presencia de Andosoles mólico y ócrico y mezclas con Litosoles, de textura franco, migajón arcilloso y arenoso. El migajón limoso sólo se encuentra en la porción SO y el migajón arenoso en la porción NE. Los suelos con textura de tipo Franco se encuentran distribuidos en toda la región. La profundidad varía de 5 a 50 cm. El pH del suelo es ácido con valores desde 3 hasta 6.1 y el contenido de materia orgánica varía de 1 a 47% dependiendo de la zona. En las partes más altas de la cuenca, el pH es más ácido y el contenido de materia orgánica es más elevado (Jujnovsky, 2003).

Por el gradiente altitudinal existen dos tipos de clima, según la clasificación climática de García (1988): En la parte urbana y hasta los 3 050 m snm se presenta el clima templado subhúmedo, el más húmedo de los subhúmedos C (w2)(w)b(i'') y en la parte más alta entre los 3 100 a los 3 800 msnm, se presenta el clima semifrío (C (b') (w) b i), en ambos casos con régimen de lluvias en verano y porcentaje de lluvia invernal menor al 5%. El verano es fresco y largo y hay poca oscilación térmica. La precipitación en la CRM aumenta en cantidad conforme hay ascenso de altitud, el menor valor se tiene a la altura del primer dínamo donde cruza la isoyeta de los 1 000 mm, en el cuarto dínamo la isoyeta que corresponde es la de 1 200 mm y en la parte SW de este bosque la precipitación asciende hasta los 1 500 mm (Álvarez, 2000).

El río Magdalena nace en las estribaciones de los cerros Palma, San Miguel, Cochinos, Coconetla entre los más importantes, a una elevación aproximada de 3 650 m snm, teniendo un curso de dirección NE. Los manantiales de Cieneguillas, los Cuervos, San Miguel Ceresia, Temascalco, San José, Potrero, Apapaxtla, las Ventanas y Pericos son las fuentes de alimentación y afluentes de este río. También recibe otros afluentes como los arroyos de Ventanas, el de Pericos, los de Cuaxuya, Cerería, Malancoachac, Lihuaya y Potrero. Tiene un cauce de una longitud aproximada de 21 600 m. Los primeros 11 000 m se encuentran localizados en los bosques de la cuenca y el resto continúa hasta el río Churubusco. El río cuenta con un escurriiento perenne debido a los manantiales que lo surten (Álvarez, 2000).

El área de estudio se encuentra en la zona templada subhúmeda (Toledo y Ordoñez 1998), la cual corresponde al bosque de pino y encino. Nava (2003) distingue tres tipos principales de comunidades vegetales y ocho asociaciones (Tabla 2).

Tabla 2: Comunidades y asociaciones vegetales para la cuenca del río Magdalena, México, D.F.

Comunidad vegetal	Asociación vegetal
<i>Bosque de Pinus hartwegii</i> (3 420-3 800 m snm)	<i>Muhlenbergia quadridentata-Pinus hartwegii</i>
	<i>Festuca tolucensis-Pinus hartwegii</i>
<i>Bosque de Abies religiosa</i> (2 750-3 500 m snm)	<i>Acaena elongata-Abies religiosa</i>
	<i>Senecio angulifolius-Abies religiosa</i>
	<i>Abies religiosa-Senecio cinerarioides</i>
Bosque mixto (2 600-3 370 m snm)	<i>Abies religiosa-Quercus laurina</i>
	<i>Quercus laurina-Quercus rugosa</i>
	<i>Pinus patula-Cupressus lusitanica</i>

**Calidad del agua del río Magdalena.**- En términos generales, la calidad del agua del río Magdalena, en las partes altas, es satisfactoria y se ve reflejada en la gran diversidad y abundancia de algas referidas para ambientes oligosaprobios o mesosaprobios. Las comunidades algales encontradas en el río corresponden a la flora original de corrientes de montaña para México (Cantoral, 1998).

El río Magdalena cuando entra a la zona urbana presenta un cambio importante respecto a la fisicoquímica del agua, el cual se ve expresado en las comunidades algales. Estas cambian en cuanto a composición de los grupos presentes como en su expresión fenotípica mostrando cambios en coloración, olor y una alta cantidad de epífitas. En esta zona se observa el aumento en las comunidades bacterianas y de cianofitas relacionadas con un incremento en la concentración de sulfatos, fosfatos y nitratos, debido al aporte de desagües domésticos de la zona (Bojorge-García, 2002).

**Aspectos socioeconómicos.**- El área de influencia humana de la CRM se localiza en la porción noreste del área de estudio, en la porción más baja de la cuenca. Tiene una población de 25,582 habitantes distribuidos en cinco áreas de geoestadística básica (AGEBS). Sólo el 36% de la población tiene una instrucción posprimaria y el 4% es analfabeta. El 39% de la población es económicamente activa, de la cual el 11% se encuentra empleada en el sector secundario y el

26% en el terciario. El 30% se encuentra ocupado como empleado u obrero y el 0.9% como jornalero o peón. Hay 10,206 viviendas, de las cuales 7,066 tienen cocina exclusiva y 9,783 utilizan gas para cocinar. En la zona existen 6,540 viviendas particulares con drenaje conectado a la red pública y 2,285 a fosa séptica. Tienen energía eléctrica 9,852 viviendas particulares y 4,331 tienen agua entubada. Hay 8,897 viviendas particulares propias y únicamente 366 rentadas (Jujnovsky, 2003).

Dentro de la zona de estudio se realizan algunas actividades económicas de poca importancia debido a su poco rendimiento económico; la silvicultura es la actividad con cierta planeación, mientras que la agricultura, y el pastoreo se realizan a menor escala (Ontiveros, 1980).

El régimen de tenencia de la tierra es de tipo comunal y ejidal (Fernández-Galicia, 1997) (Tabla 3). La mayor parte de los predios ya fueron regularizados por la Comisión de Regulación de Tenencia de la Tierra (CORETT). Sin embargo, en la Magdalena Contreras existen varios litigios entre ejidatarios, comuneros y propietarios privados. Las situaciones más conflictivas se derivan de la existencia de ejidos y áreas comunales en el poblado de San Nicolás Totolapan. En estas zonas, dado su gran atractivo para integrarse al área metropolitana, periódicamente surgen problemas de invasiones o ventas ilegales por parte de los ejidatarios (Garza, 2000).

Tabla 3. Tipo de tenencia de la tierra en el área de estudio

<b>Predio</b>	<b>Tipo de comunidad</b>
Poblado Magdalena Contreras	Comunal
San Nicolás Totolapan	Ejidal y comunal
Santa Rosa Xochiac	Ejidal

Por el tipo de asentamientos los derechos de propiedad dentro del área se manifiestan de la siguiente manera: dueños con títulos de propiedad, familias con permisos de habitar, familias asentadas sin permiso legal o desconocido (Ontiveros, 1980).

En lo que se refiere al sector primario, la agricultura es una actividad con poco desarrollo en la cuenca, debido a las pendientes pronunciadas del terreno, además de la cercanía a la ciudad de México, que absorbe casi en su totalidad la población económicamente activa (Ávila-Akerberg, 2002). La ganadería depende de las áreas forestales, se realiza donde la vegetación herbácea del bosque es la única fuente alimentaria para los rebaños (Obieta y Sarukhán, 1981). Se

desarrolla de manera muy extendida y ha causado problemas al progreso de la silvicultura ya que se realiza de manera desordenada ocasionando grandes daños a pesar del reducido número de cabezas de ganado. Dentro de la cuenca coexisten tres tipos de ganado: el ovino, el caprino y el vacuno (Ávila-Akerberg, 2002).

**Situación legal del área.-** La zona de estudio cuenta con un acuerdo y un decreto; el primero corresponde a la declaratoria de Zona Protectora Forestal los Bosques de la Cañada de Contreras, D.F, este fue publicado el 27 de junio de 1932 y establece una superficie de 3,100 ha, correspondientes a terrenos forestales de la Hacienda de la Cañada y del Pueblo de la Magdalena, esto incluye prácticamente toda la cuenca del río Magdalena. El segundo, es un decreto presidencial para la creación de la Unidad Industrial de Explotación Forestal para la fábrica de papel Loreto y Peña Pobre y se declara Zona de Protección Forestal del río Magdalena el 19 de mayo de 1947 (Eguiarte *et al.*, 2000). Dicha región abarca una faja de 12 kilómetros de longitud desde el nacimiento del río hasta aguas abajo en la parte urbana, cubriendo 500 metros a cada lado del cauce (1200 ha). Por otra parte, el Programa General de Ordenamiento Ecológico del Distrito Federal publicado oficialmente en el año 2000, contradice el acuerdo y el decreto mencionados ya que establece como Área Natural Protegida una superficie de 215 ha con categoría de Zona Protectora Forestal la cual abarca desde el cuarto dinamo hasta el inicio de la mancha urbana. El resto de la cuenca lo sitúa como Forestal de Conservación y Forestal de Conservación Especial. Además de los diferentes estatus, el área natural protegida del río Magdalena presenta un traslape importante con una presunta propiedad privada, el predio La Cañada de 111.8 ha (Figura 2). Según Eguiarte *et al.* (2002) existe un uso indiscriminado del predio por parte de comerciantes y paseantes, además de una fuerte presión de los asentamientos humanos irregulares de San Nicolás Totolapan (Cazulco) y Magdalena Contreras (ladera de Sayula) que de forma acelerada y desordenada han ido ganándole terreno a las zonas forestales en áreas de alto riesgo. El área natural protegida actual se ha reducido más de 10 veces.

Por otro lado, el programa general de ordenamiento ecológico del Distrito Federal del 2001 contempla a los bosques de la Cañada de Contreras como área natural protegida con categoría de Zona Protectora Forestal. No indica que superficie abarca pero hace referencia al decreto de 1932 y se menciona que no ha tenido modificación. Esto nuevamente entraría en contradicción con lo que se menciona en el ordenamiento ecológico del 2000. La zona cuenta con una propuesta de plan de manejo elaborado como proyecto de maestría (Fernández-Galicia,

1997). Este plan nombra a la cuenca del río Magdalena como zona protectora forestal “Cañada de Conteras” y contempla una superficie de 3 100 hectáreas, sin embargo, el plan de manejo todavía no ha sido aceptado de manera oficial.

Las zonas protectoras forestales fueron establecidas mediante decreto presidencial desde principios de los años veinte, lo cual no ha sido del conocimiento de la ciudadanía y en especial de los dueños y poseedores de los terrenos, originando una limitante para la ejecución de trabajos; así como para la observancia de las condiciones y limitaciones dictadas en los decretos de cada una de ellas. Las zonas Protectoras Forestales se conceptúan como un área bajo régimen de administración especial, la cual ha sido establecida por el poder ejecutivo en terrenos con vegetación forestal y en la cual según su decreto de creación se restringe, se condicionan o se prohíben algunas actividades de manejo o uso de los recursos naturales forestales. Estas áreas en su conjunto forman un total de 205 en todo el país (Fernández-Galicia, 1997).

Al estar la CRM decretada por el gobierno federal, las autoridades competentes para su regulación son la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas para las cuestiones normativas, y la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente para inspección y vigilancia.

## SITUACIÓN LEGAL DE LA CRM

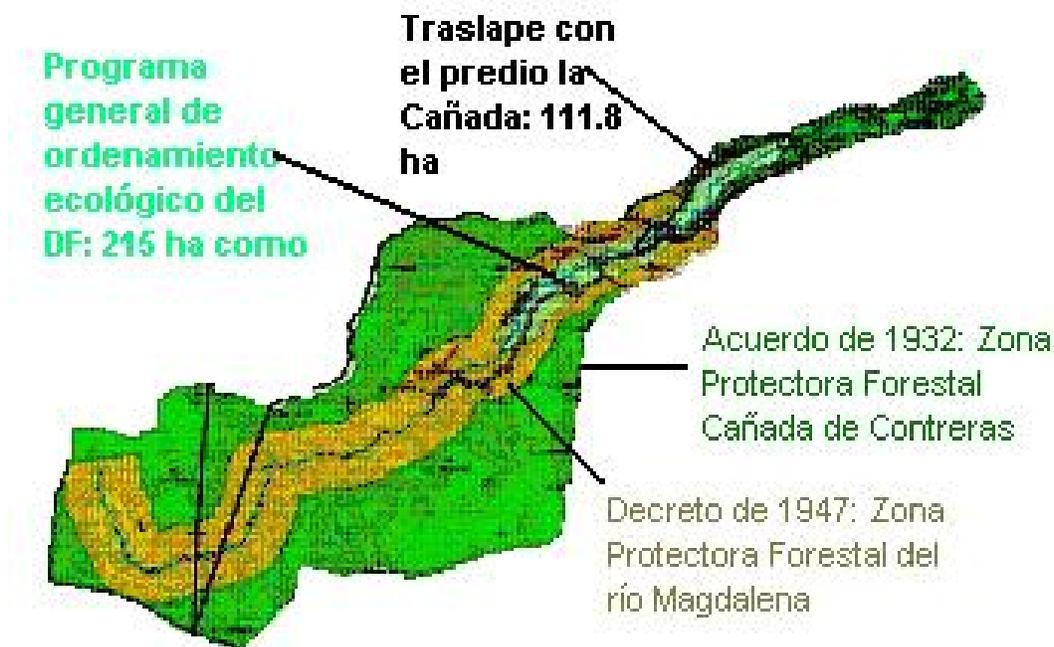


Figura 2. Situación legal de la cuenca del río Magdalena

Sin embargo, la CRM se encuentra bajo la supervisión de la Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural, a la cual, en teoría sólo le compete la jurisdicción de las áreas naturales protegidas decretadas por el Distrito Federal. Existe un acuerdo de coordinación publicado en el Diario Oficial de la Federación el 16 de abril de 1999 con la entonces Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca. Este acuerdo menciona que ciertas áreas naturales protegidas de competencia federal serán administradas por el gobierno del Distrito Federal; este es el caso de los Parques Nacionales Desierto de los Leones, Insurgentes Miguel Hidalgo y Costilla y Cumbres del Ajusco (POET, 2001).

Pero en este acuerdo no se hace mención a los bosques de la Cañada de Contreras, por lo tanto la jurisdicción seguiría siendo del Gobierno Federal. Por otra parte, la Zona Protectora

Forestal “Cañada de Contreras” no se encuentra integrada en el Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas, debido a que el SINAP evaluó las más de 300 ANP que han sido decretadas en el país, incorporando sólo las más importantes en extensión, quedando todas las Reservas de la Biósfera y sólo algunos Parques Nacionales. Pero excluyendo las áreas más pequeñas como las Zonas Protectoras Forestales.

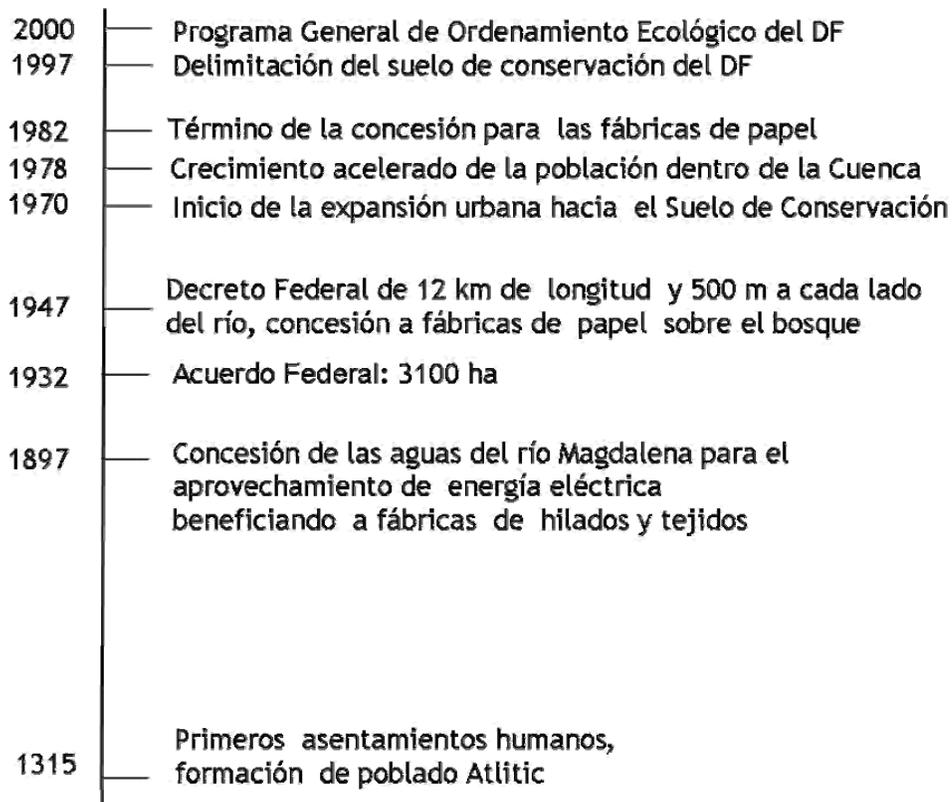


Figura 3. Línea de tiempo de la historia de la CRM, (A. Ramos, Com. Pers.)

### 1.3 Justificación y objetivo

Algunos de los ecosistemas que más han resentido el efecto de las actividades humanas son los que se localizan en la periferia de los grandes asentamientos urbanos; la ciudad de México es un ejemplo muy elocuente de esto. En los últimos 20 años, la mancha urbana de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) ha crecido más de 400% y sus áreas verdes se han reducido de manera alarmante (Ezcurra, 1990). El problema es especialmente grave

en las laderas y cañadas localizadas en el sur y poniente de la Cuenca de México, debido a que en ellas se recargan los sistemas de aguas subterráneas que abastecen a la propia ciudad y son zonas particularmente ricas en términos biológicos (Bonfil *et al.* 1997).

Los bosques templados de la cuenca del río Magdalena (CRM) son un claro ejemplo de ecosistemas que se encuentran alterados por la influencia humana, pero que a su vez son de gran relevancia desde el punto de vista ecológico. Esta zona es importante tanto ecológica, como social y económicamente. El río Magdalena es de los más importantes de la ciudad de México ya que se considera prácticamente el único abastecimiento de agua potable superficial del DF. El 70% del agua que se consume en el Distrito Federal proviene del subsuelo (Mazari, 2000) y la masa forestal de la cuenca contribuye con el aporte de agua a la cuenca de México. Por otra parte, de acuerdo con Ávila-Akerberg (2002), esta zona contiene una gran diversidad vegetal, ya que representa el 25% de la flora fanerogámica de la cuenca de México y además en la parte más baja contiene elementos de bosque mesófilo de montaña. De acuerdo con Garza (2000), la importancia de proteger el área de bosques de la Magdalena Contreras no sólo es vital para preservar su fisonomía, sino también para garantizar la sustentabilidad hídrica de la ZMCM. Recientemente, se han realizados estudios en el área y se cuenta con información actualizada sobre vegetación y suelo, además de una zonificación por unidades de paisaje (Jujnovsky, 2003), el cual sienta las bases para el ordenamiento ecológico del área.

Debido a la importancia del río para la ciudad de México y a la información actualizada con la que cuenta la zona, resulta relevante realizar un estudio para evaluar los servicios ecosistémicos que brinda esta cuenca, tanto a la población local como a la ciudad de México. Así mismo resulta importante estudiar como influye la vegetación en el comportamiento hidrológico de la cuenca y en los servicios ecosistémicos relacionados. Esto no sólo es de gran importancia para poder manejar y administrar el recurso hídrico de la región, sino además es necesario para elaborar planes de restauración en la zona.

El objetivo general del proyecto es evaluar los servicios ecosistémicos relacionados con el recurso agua que brinda la cuenca del río Magdalena, así como el vínculo que estos guardan con la vegetación.

## II.-METODOLOGÍA

Para poder evaluar los servicios ecosistémicos de la CRM relacionados con el recurso agua, así como el vínculo que estos guardan con la vegetación, primero se tuvo que entender el comportamiento hidrológico de la cuenca, esto es, saber cuanta agua se está generando y en dónde, para lo cual se hizo una zonificación ambiental basada en las unidades de paisaje descritas por Jujnovsky (2003) (Apéndice 1). A su vez, se realizó una investigación bibliográfica y un ejercicio de consulta de expertos con la finalidad de evaluar los servicios relacionados con el recurso agua en la CRM. Posteriormente se definieron recomendaciones de manejo por unidad fito altitudinal. La secuencia de pasos en la realización del trabajo se resume en la Figura 4.

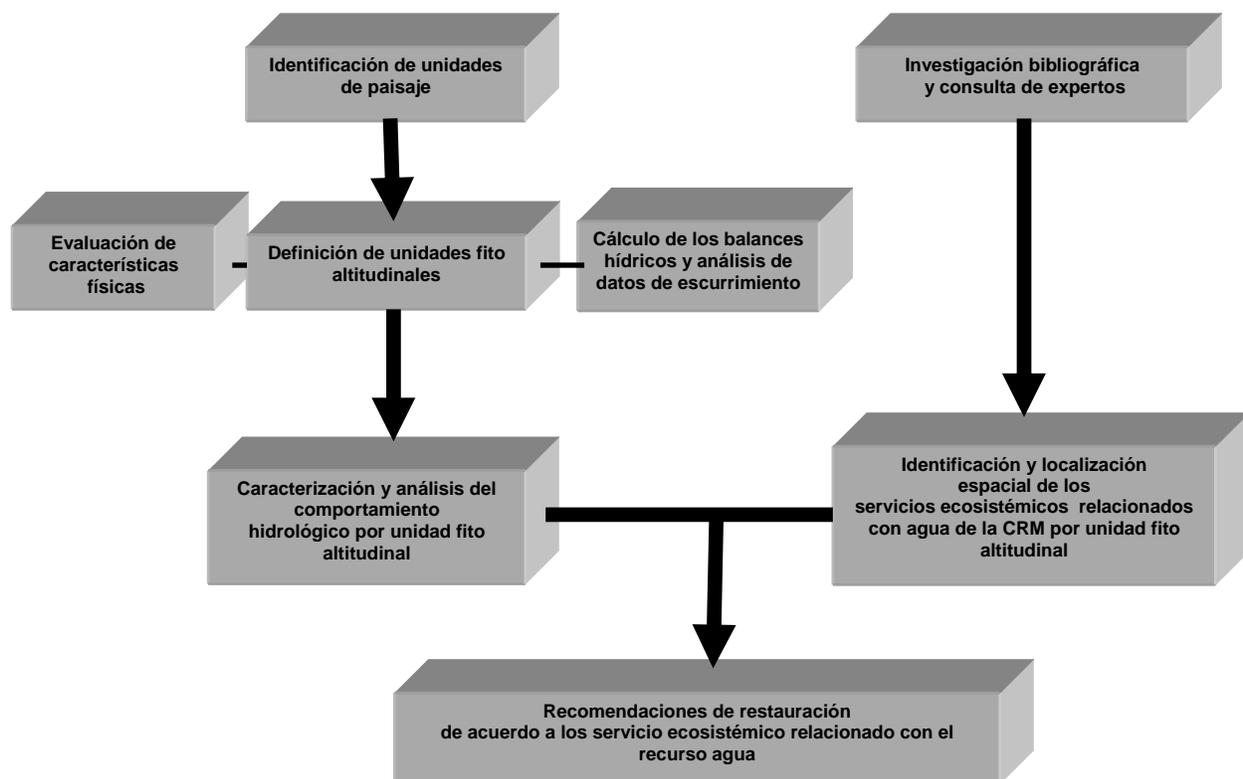


Figura 4. Síntesis metodológica del trabajo de investigación en la CRM.

## **II.1 Caracterización ambiental y comportamiento hidrológico de la cuenca del río**

### **Magdalena**

Para comprender el comportamiento hidrológico en la cuenca del río Magdalena se dividió el área en unidades fito altitudinales, se complementó la información con características geológicas, físicas del suelo y posteriormente, se calculó cuánta agua genera la cuenca, mediante la estimación de su balance hídrico por unidad fito altitudinal.

#### ***Unidades fito altitudinales***

Naveh y Lieberman (1984), definen una unidad de paisaje como un área homogénea en suelo, clima, potencial biológico, etc, que se puede plasmar en un mapa y cuyos límites se determinan por un cambio en una o más características. Jujnovsky (2003) describió 30 unidades de paisaje en la CRM (Anexo 1) utilizando la metodología de los levantamientos de ecología del paisaje propuesta por Zonneveld (1995) y utilizando con elementos rectores el tipo de relieve y asociaciones vegetales. Dichas unidades se reagruparon a una escala menos detallada, de acuerdo a similitudes físicas y biológicas en el sistema de información geográfica ILWIS 3; formando 4 unidades fito altitudinales (bosque de *Pinus*, *Abies*, mixto y pastizales) las cuales se definen para el presente trabajo como áreas con características similares y distinguibles entre si, en relieve y vegetación. Esta nueva división se hizo con la finalidad de localizar espacialmente toda la información meteorológica, hidrológica y los servicios ecosistémicos.

#### ***Características físicas***

La geología de la CRM, se obtuvo con la carta geológica de INEGI (1979) escala: 1: 50 000. La información edáfica se logró a partir de nueve perfiles realizados en la zona con anterioridad (J. Gama, com. pers.). De las muestras obtenidas se cuantificó su permeabilidad, conductibilidad hidráulica y erodabilidad del suelo. Posteriormente se construyó una tabla (en EXCEL) con la localización geográfica (latitud, longitud y altitud) de los puntos de muestreo. Esta información se incorporó al Sistema de Información Geográfica (SIG) ILWIS versión 3.0, permitiendo correlacionar los datos con las unidades fito altitudinales.

La precipitación de la CRM se obtuvo de un mapa digital de precipitación anual para el DF publicado por INEGI (2005) escala 1:1 000 000 ([www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx)). De allí se realizó un corte para la zona de estudio y se generó una nueva carta de precipitación para la cuenca. En este

mapa, se ubicaron las estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio, con base en el Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC II). Para complementar la información climática, se utilizó la carta de climas publicada por la Secretaría de la Presidencia (1970), escala 1:500 000, para ubicar las isoyetas e isotermas que pasan por la zona. Cabe destacar que existen otros métodos para calcular la precipitación local, como los polígonos de Thysen o la interpolación por altitud.

Como información complementaria se consultó el mapa topográfico e hidrológico 1:10 000 digitizado por Ávila-Akerberg (2004) y el mapa Edafológico 1:50 000 digitizado por Jujnovsky (2003) (Tabla 4).

Tabla 4.- variables y criterios para el comportamiento hidrológico de la CRM

<b>Variable</b>	<b>Criterios</b>	<b>Fuentes</b>
Hidrología	Ríos, escurrimientos perennes e intermitentes	Mapa de topografía e hidrología 1:10 000 (Ávila-Akerberg, 2004)
Altitud	2500-3800 msnm	Mapa de topografía e hidrología 1:10 000 (Ávila-Akerberg, 2004)
Relieve	Zonas altas, medias y bajas	Mapa de topografía e hidrología 1:10 000 (Ávila-Akerberg, 2004)
Geología	Tipos de rocas Permeabilidad de las rocas	Carta geológica: Escala: 1: 50 000, México, E14A39, INEGI, 1979.
Suelo	Permeabilidad de suelos Erodabilidad Conductibilidad hidráulica	Gama-Castro, (com pers)

La información mencionada se incorporó a la base de datos de las unidades fito-altitudinales ampliando los atributos sus atributos.

Es importante tomar en cuenta que en este estudio se trabajó a diferentes escalas debido a la falta de información cartográfica, pero esta limitante no debe ignorarse en la interpretación de la información.

### ***Balance hídrico***

Para analizar cómo se comporta el agua de la CRM se realizó un balance hídrico en cada unidad fito altitudinal aplicando el método de Thornthwaite (Dunne y Leopold, 1978):

$$BH = Ppt - Et - Esc - \Delta HS$$

BH= balance hídrico

Ppt= precipitación

Et= evapotranspiración

Esc= escurrimiento

$\Delta$ HS= cambio en la humedad del suelo

Se utilizaron datos de tres estaciones meteorológicas (Tabla 5) ubicadas en el mapa de precipitación anual y cada una de ellas representa una unidad fito altitudinal, exceptuando la unidad alta de la cuenca, que por falta de información se hizo una interpolación con los datos de las estaciones más cercanas y con la ayuda del mapa de climas 1:500 000.

El método de Thornthwaite utiliza la temperatura del aire como un índice de la energía disponible para la evapotranspiración y la precipitación mensual, con ambas variables calcula todos los parámetros que se explican a continuación.

**Precipitación.**- Para el cálculo de precipitación se utilizó el promedio de la precipitación mensual de 26 años para la estación Desierto de los Leones, 35 años para la Alta del Pedregal y 7 años para Monte Alegre (Extractor Rápido de Información Climatológica II, 2000).

**Evapotranspiración potencial.**- Primero se obtuvo la temperatura media mensual, la cual se calculó utilizando datos diarios de temperatura máxima y mínima de las estaciones. Con la temperatura media mensual y aplicando la siguiente fórmula, se obtuvo la evapotranspiración potencial (Dunne y Leopold, 1978).

$$E_t \text{ Pot.} = 1.6 \left[ \frac{10 T_a}{I} \right]^a$$

$T_a$  = Temperatura aire promedio mensual (°C)

I = Índice de calor anual

$$\sum_{i=1}^{12} = [T_{ai}/5]^{1.5}$$

$$a = 0.49 + 0.0179 I - 0.0000771 I^2 + 0.000000675 I^3$$

**Déficit de precipitación.**- Se calcula restando la precipitación menos la evapotranspiración potencial.

**Déficit acumulado.** Es la suma del déficit de precipitación más el déficit acumulado del mes anterior.

**Humedad del suelo:** para calcular la capacidad de retener agua del suelo se multiplica el tipo de textura por la capacidad de retención de agua por la profundidad de las raíces (Dunne y Leopold, 1978), posteriormente se suma la humedad del mes anterior más el déficit de precipitación.

**Cambio en la humedad del suelo.** Es la diferencia entre humedad de suelo del mes, menos la humedad del suelo del mes anterior.

**Evapotranspiración actual.** Diferencia entre la precipitación menos el cambio en la humedad del suelo.

**Déficit en humedad del suelo.** Se calcula restando la evapotranspiración potencial menos la evapotranspiración actual.

**Exceso de agua en el suelo.** Diferencia entre la precipitación menos la evapotranspiración potencial menos el cambio de la humedad en el suelo.

**Agua disponible para escurrir.** Es el exceso de agua más el agua retenida del mes anterior.

**Escurrimiento.** Por convención según Thornthwaite, el escurrimiento es el 50% del agua disponible para escurrir

**Agua retenida.** Por convención según Thornthwaite el agua retenida es el otro 50% del agua disponible para escurrir.

Tabla 5: Estaciones meteorológicas cercanas a la CRM, según el Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC II)

<b>Estaciones meteorológicas</b>	<b>Latitud N</b>	<b>Longitud W</b>	<b>Altitud m snm</b>	<b>Periodo</b>
Monte Alegre, Contreras (09067)	19° 13'	99° 17'	3485	1976-1983
Desierto de los Leones (09019)	19° 18'	99° 18'	3400	1961-1987
Desviación Alta al Pedregal (09020)	19° 17'	99° 15'	2618	1952-1987

Con los datos de los balances hídricos se hizo una estimación de cuánta agua está escurriendo en la CRM. Esto con la finalidad de obtener la cantidad de agua total de la cuenca y el agua por unidad fito altitudinal.

Posteriormente se compararon dichos datos con los registrados en la estación hidrométrica de aforo Magdalena, la cual se encuentra ubicada entre el primer y el segundo dinamo.

### ***Precipitación anual y escurrimiento en la cuenca de río Magdalena por unidad fito altitudinal***

Para calcular la precipitación anual de cada unidad fito altitudinal, se tomó en cuenta aquella estación meteorológica que estuviera más cercana o en su defecto, la isoyeta correspondiente.

Para la unidad fito altitudinal de bosque mixto, se consideró la estación Desviación Alta al Pedregal, la cual tiene una precipitación anual de 990 mm. Para la unidad fito altitudinal de bosque de *Abies*, se tomó en cuenta la estación Monte Alegre Contreras, con una precipitación anual de 1305 mm; la estación Desierto de los Leones tuvo los mismos valores que la estación Monte Alegre. Para el caso de la zona alta (bosque de *Pinus*), el cálculo no se realizó de la misma manera, ya que no se encontraron estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio. Por lo tanto, para el balance hídrico de dicha zona se tomó en cuenta la isoyeta y la isoterma correspondiente, las cuales fueron de 1500 mm y de 10°C respectivamente. A los datos de balance hídrico de la estación más cercana se le agregó un factor tanto a la precipitación como a la temperatura para obtener los datos antes mencionados y de esa manera poder calcular el balance hídrico para dicha zona.

El escurrimiento que se obtuvo del balance hídrico se correlacionó con la extensión de la unidad fito altitudinal correspondiente, obteniendo así el escurrimiento total anual para cada zona.

**Escurrimiento mensual.**- Para buscar mayor exactitud en los datos de escurrimiento, se hizo el cálculo para analizar cómo se comporta el escurrimiento en  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$  en cada mes. El valor de escurrimiento mensual que se obtuvo del balance hídrico, se transformó de mm a litros y después a  $\text{m}^3$ . Después se multiplicó por las hectáreas que correspondiera con las unidades fito altitudinales: baja, media o alta de acuerdo al caso. Posteriormente ese valor se dividió entre la cantidad de segundos que tuviera el mes en cuestión (31, 30 ó 28 días en cada caso). Así se obtuvo el valor de escurrimiento de  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$  para cada mes, en cada estación meteorológica analizada. Finalmente se obtuvo el promedio de escurrimiento para todas las estaciones.

Con la regionalización, la información física, los balances hídricos y los datos reportados en la estación de aforo, se interpretó el comportamiento hidrológico de la CRM (Figura 5).

Posteriormente se buscó información sobre los escurrimientos máximos y mínimos que registra el río Magdalena según la estación de aforo. Los datos registrados en la estación hidrométrica Magdalena se compararon con los valores de escurrimiento para toda la cuenca obtenidos en el balance hídrico.

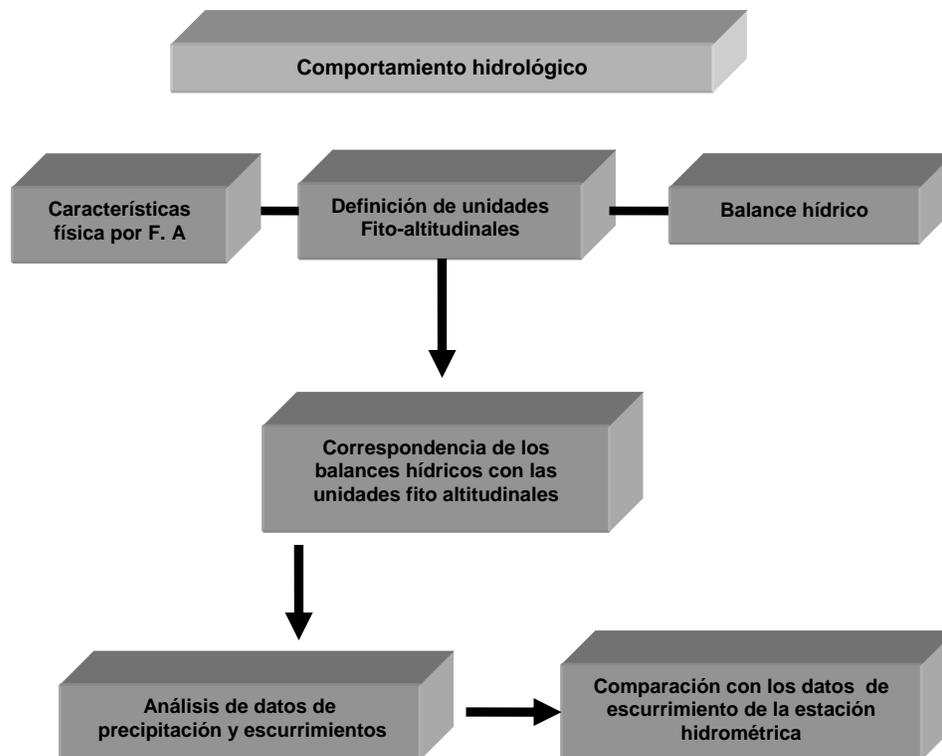


Figura 5. Diagrama que explica como se obtiene el comportamiento hidrológico de la CRM

## II.2. Identificación y localización espacial de los servicios ecosistémicos relacionados con el agua que brinda la CRM

Se realizó una investigación bibliográfica para conocer los servicios ecosistémicos más importantes que proporcionan los bosques. Con base en esta información y el conocimiento previo de la zona se realizó una lista preliminar de los servicios ecosistémicos más importantes de la cuenca en relación con el recurso agua.

Mediante un ejercicio de juicio de expertos en la zona (Apéndice II), se revisaron los servicios identificados, con el fin de definir cuales de estos se pueden medir en la CRM, y posteriormente localizar las zonas en donde se están consumiendo o generando los servicios ecosistémicos. Los expertos fueron:

- M en C. Víctor Ávila-Akerberg.- Por haber realizados sus estudios de licenciatura y maestría en la zona de estudio y por ser habitante de esa delegación.

- Biól. Zenia Saavedra.- Por trabajar en la CORENA, específicamente en proyectos dentro de la cuenca del río Magdalena.

- Biól. Alya Ramos Eloy.- Por estar realizando la tesis de maestría en la zona y trabajando directamente con los comuneros.

- Dra. Marisa Mazari.- Por ser experta en cuestiones de agua y habitante del pueblo de la Magdalena.

-Dr. Leonardo Cisneros.- Experto en ingeniería hidráulica y por trabajar directamente en la CRM en cuestiones hidrológicas.

Para evaluar cada servicio se tomaron en cuenta tanto características físicas analizadas en la sección anterior como la información proporcionada por los entrevistados (Tabla 6).

Tabla 6. Identificación de servicios y criterios para su evaluación

<b>Servicio ecosistémico</b>	<b>Criterios utilizados para medir el servicio</b>
<b>Provisión</b>	
1.-Provisión de agua	Datos de escurrimiento según modelo de Thornthwaite, Información de expertos.
2.-Provisión de truchas	Información de expertos sobre número de criaderos, producción de truchas anuales.
<b>Regulación</b>	
3.-Control de erosión y mantenimiento de suelo	Análisis de peligro de pérdida de suelo
4.-Calidad del agua	Proporción de algas y bacterias según los análisis de Cantoral (1998) y Bojorge-García (2002)
5.-Control de inundaciones y remoción en masa	Inclinación de laderas, escurrimientos máximos, información de expertos.
6.-Regulación de agua sub-superficial y basal	Permeabilidad de los suelos Permeabilidad de la roca Balance hídrico Comparación con los datos de la estación de aforo
<b>Culturales</b>	
7.-Recreación y ecoturismo	Información proporcionada por expertos sobre comederos campestres, zonas para escalar, cabalgar, motos.
8.-Belleza escénica	Bosque con cobertura vegetal Zonas cercanas a cuerpos de agua

**1.-Provisión de agua.-** Este servicio se evaluó mediante los datos de escurrimiento obtenidos en el balance hídrico en las tres unidades fito altitudinales y con la información dada por los expertos en cuanto al consumo del servicio.

**2.-Provisión de truchas.-**La información sobre el servicio de provisión de truchas fue obtenida mediante las entrevistas con los expertos del tema, obteniendo información sobre número de criaderos, producción anual de truchas, métodos para conservar el servicio.

**3.-Control de erosión y mantenimiento de suelo.-** Para evaluar este servicio se determinó el peligro de pérdida de suelo, tomando en cuenta la siguiente información:

- Mapa de unidades de paisaje
- Porcentaje de cobertura vegetal
- Erodabilidad del suelo

De acuerdo con Gama-Castro *et al.* (1990), un suelo con cobertura vegetal mayor al 60% no es susceptible a erosionar, aún en pendientes pronunciadas. Con base en este supuesto, se evaluaron las unidades de paisaje adjudicándoles un valor de erodabilidad sumado a los otros parámetros que ya se tenían (cobertura vegetal, tipo de suelo, vegetación, etc). Esta información se registro en el SIG. Los datos de erodabilidad solo estaban registrados para nueve unidades de paisaje, por lo que para tener el valor de erodabilidad a nivel de las 30 unidades se buscaron unidades similares en tipo de suelo, pendiente, materia orgánica, etc, y se adjudicó el valor de erodabilidad para unidades similares. Las zonas más susceptibles a pérdida de suelo fueron aquellas que tuvieron menos del 50% de cobertura vegetal y erodabilidad mayor a 0.25.

Como información complementaria se calculó la erodabilidad de la lluvia, este cálculo se hizo con la finalidad de conocer de qué manera influye la precipitación en el suelo. Se calculó mediante la fórmula de Fornier (FAO-PNUMA, 1980), la cual se define como la sumatoria de la precipitación mensual al cuadrado entre la precipitación total.

R = agresividad climática; 100-200 (moderada); >250 es muy fuerte

X= precipitación mensual

$R = \sum(X)^2 / \text{precipitación total.}$

E F M A M J .....D.

X+ X+ X+ X+ X = R

$$X = \sum_{a=1}^{12} \frac{(X)^2}{\text{pp total}}$$

Toda esta información se incorporó a una tabla de datos de ILWIS, posteriormente se mapeo primero por unidad de paisaje y después por unidad fito altitudinal.

**4.-Calidad del agua.-** La información para evaluar este servicio esta basada en los estudios realizados por Cantoral et al., (1998) y Bojorge-García (2002) sobre la relación entre algas y bacterias, la cual es un indicador de calidad del agua en el río. Después dicha información se relacionó con la unidad fito altitudinal que correspondiente de acuerdo a la ubicación del muestro realizado por los autores antes mencionados.

**5.-Control de inundaciones y remoción en masa.-** la información para evaluar este servicio fue obtenida del mapa de unidades de paisaje (Jujnovsky, 2003), con la finalidad de conocer la inclinación de las laderas en las unidades fito altitudinales. Posteriormente se tomaron los datos de escurrimientos máximos registrados por la estación de aforo Magdalena, para saber la temporalidad y volumen del caudal y finalmente, la información de expertos en la cuenca fue útil para saber si existen inundaciones y remoción en masa en la zona y de que manera afecta a la población.

**6.-Regulación de agua sub-superficial y basal.-** La información para evaluar este servicio está basada en la interpretación de cómo se comporta el agua cuando llega al suelo de la cuenca. Para lo cual se tomó en cuenta la permeabilidad de los suelos, de la roca y los datos de escurrimiento tanto del balance hídrico como de la estación de aforo.

**7.-Recreación y ecoturismo.-** Este servicio se evaluó con la información recabada sobre los lugares turísticos que se encuentran en el área y las actividades que se desarrollan en la zona. Dichos datos se ubicaron en un mapa para saber en que unidad fito altitudinal se está dando el servicio.

**8.-Belleza escénica.-** El criterio para localizar el servicio fue buscar zonas con cobertura vegetal y cercanas a cuerpos de agua. Para ello se utilizó la información ambiental obtenida con anterioridad, en la cual por unidad fito altitudinal se puede saber cuales son las zonas con mejor cobertura vegetal y cercanas al río Magdalena.

### **II.3 Recomendaciones de manejo en cada unidad fito altitudinal de acuerdo los servicios ecosistémicos que provee.**

Una vez analizada la caracterización hidrológica y los servicios ecosistémicos por cada unidad fito altitudinal y teniendo localizado dónde se están generando y consumiendo más servicios, se elaboraron recomendaciones de manejo específico (uso, restauración o conservación) en cada zona, de acuerdo a los servicios ecosistémicos relacionados con el agua que provee cada unidad.

## **III.-RESULTADOS**

### **III.1-Caracterización ambiental y análisis del comportamiento hidrológico de la CRM**

#### **III.1.1 Unidades fito altitudinales**

La cuenca del río Magdalena se divide en cuatro grandes unidades fito altitudinales, diferenciadas unas con otra por dos variables fundamentales: la vegetación y el relieve. Se describen a continuación cada una de ellas (Figura 6).

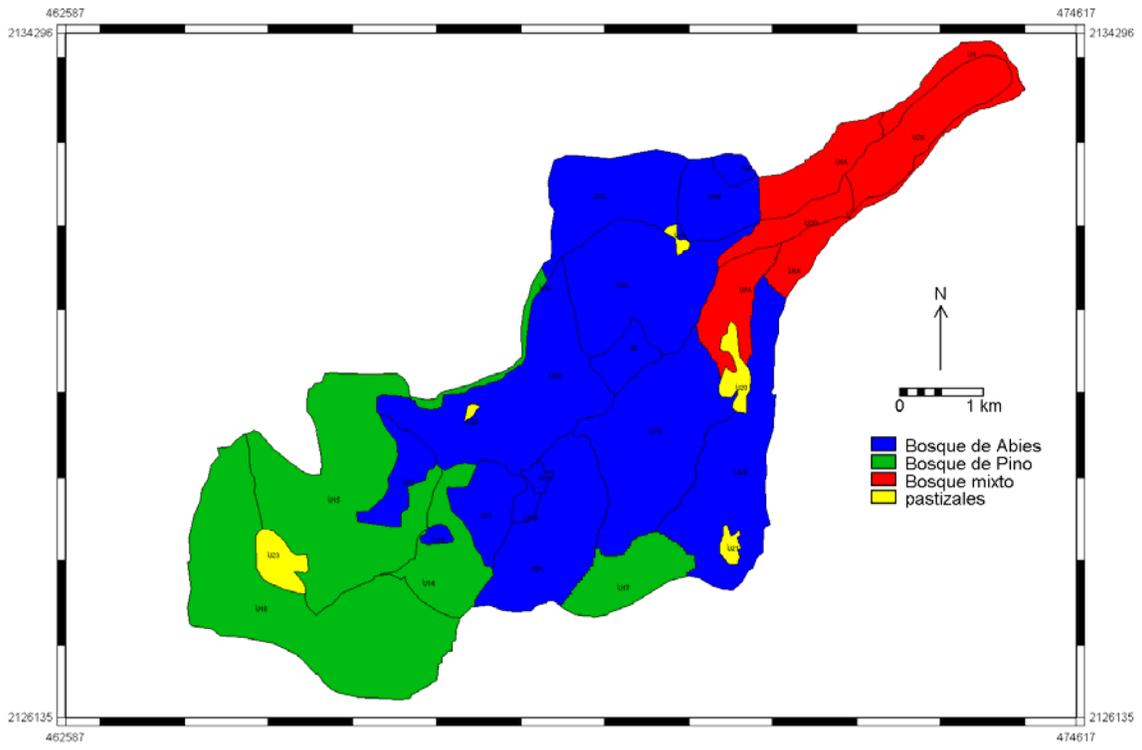
**Unidad fito altitudinal de bosque de *Pinus hartwegii*.**- Está representada por las unidades 14, 15, 16, 17, 18 (Jujnovsky, 2003). Ocupa una extensión de 943 ha. El relieve de esta unidad se caracteriza por laderas con inclinación menor a los 30° y presencia de material piroclástico. Se encuentra a una altitud entre los 3500-3800 m snm. Los suelos son de tipo Andosol húmico y ócrico, con un porcentaje de materia orgánica de 15-30% y un pH de 4.1-4.5 La profundidad es menor de 40 cm. La comunidad vegetal que caracteriza a esta zona es el bosque de *Pinus hartwegii*, la cual presenta dos asociaciones *Muhlenbergia quadridentata-Pinus hartwegii* y *Festuca toluensis-Pinus hartwegii*.

**Unidad fito altitudinal de bosque de *Abies*.**- Está formada por las unidades de paisaje 3C, 5A, 5B, 6B, 7B, 8, 9A, 9B, 10, 11, 12,13 (Jujnovsky, 2003). Ocupa una extensión de 1469 ha, a una altitud que va de los 3000-3500 m snm y corresponde a la zona media de la cuenca. El relieve de esta unidad se caracteriza por laderas agudas, en la mayoría de los casos de más de 45° de inclinación. Los suelos son de tipo Andosol húmico, con un porcentaje de materia orgánica de 15-30% y un pH de 4.6-5.1, la profundidad de los suelos es de aproximadamente 50 cm. La

comunidad vegetal que caracteriza a esta zona es el bosque de *Abies religiosa*, el cual presenta tres asociaciones: *Senecio angulifolius-Abies religiosa*, *Acaena elongata-Abies religiosa* y *Abies religiosa-Senecio cinerarioides* (Nava, 2003), esta última sólo se encuentra en una unidad.

**Unidad fito altitudinal de bosque mixto.-** Está formada por las unidades de paisaje 1, 2A, 2B, 3A, 3B, 4, 6A y 7A (Jujnovsky, 2003). Ocupa una extensión de 482 ha. Se encuentra en una cota altitudinal entre los 2500-3000 m snm, siendo la zona más baja de la cuenca. La forman Piedemonte, valles erosivos y laderas suave, las cuales son menos inclinadas en la parte noreste (0-15°) y con mayor pendiente (15-30°) en la porción SW. Esta zona se caracteriza por estar ubicada en la zona de influencia humana de la cuenca (Jujnovsky, 2003). Los suelos predominantes son Andosoles húmicos mezclados con Litosoles, con pH ácido de 5.2-6.1 y elevado contenido de materia orgánica entre 4-8%, la profundidad de estos suelos es de alrededor de 40 cm. La vegetación dominante es el bosque mixto, donde las asociaciones vegetales que se distinguen son *Abies religiosa-Quercus laurina*, *Quercus laurina-Quercus rugosa* y *Pinus patula-Cupressus lusitanica*.

**Unidad fito altitudinal de pastizales.-** Está formada por las unidades de paisaje 19, 20, 21, 22 y 23, las cuales suman en total 105 ha dentro de la CRM. Estas se encuentran distribuidas en toda la cuenca y lo que las asemeja entre sí es que tienen un relieve casi plano, con pendientes menores a 15°, sus formas son muy regulares y la vegetación que las caracteriza es herbácea. Dentro de estas zonas se reconoce que la ausencia de vegetación arbórea se debe a factores ambientales y no a una deforestación. Por lo tanto, estos pastizales son de carácter azonal. Sin embargo, los comuneros aprovecharon estas características ambientales para fomentar el pastoreo en estas áreas, por lo que presentan un grado de influencia antrópica más elevado que las zonas boscosas.



### III.1.2 Evaluación de características físicas

La geología de la CRM, muestra que toda la zona está compuesta por rocas ígneas extrusivas intermedias, las cuales tienen una permeabilidad baja (Carta geológica: Escala: 1: 50 000, INEGI, 1979).

Con respecto a los suelos, la permeabilidad en la CRM va de moderada a muy rápida, considerando moderada como de 0.5-5 cm h<sup>-1</sup> y muy rápida mayor a 50 cm h<sup>-1</sup> (USDA, 1992). La mayor permeabilidad se encuentra en las zonas más altas de la cuenca.

En los nueve perfiles realizados para el área de estudio (figura 7) los valores de conductibilidad hidráulica son mayores a 70 μm s<sup>-1</sup> y según la (USDA, 1992) cuando es mayor a 60 μm s<sup>-1</sup> ya se considera alta. Los valores más lentos (de 70 μm s<sup>-1</sup>) se localizan en las zonas más bajas y los más rápidos (95 μm s<sup>-1</sup>) en las zonas más altas. Los índices más elevados de erodabilidad se encuentran en la porción alta de la cuenca.

La FAO-PNUMA (1980) menciona que valores de erodabilidad mayores a 0.25 muestran un bosque susceptible a erosionarse. En la mayoría de los casos los datos rebasan dichos niveles (Tabla 7).

Tabla 7: Localización de perfiles y datos de suelo de la cuenca del río Magdalena, México D.F.

<i>Perfil</i>	<i>Coordenadas</i>		<i>Permeabilidad</i>	<i>Conductibilidad</i>	<i>Erodabilidad</i>
	<i>N</i>	<i>W</i>	<i>De los suelos</i>	<i>hidráulica</i>	
	<i>N</i>	<i>W</i>	<i>cm/h</i>	<i>μm/s</i>	
1	19°14'56''	99°16'42''	5.0	87.6	0.23
2	19°15'11''	99°18'20''	6.8	85.5	0.21
3	19°16'11''	99°17'49''	8.3	72.1	0.30
4	19°16'49''	99°17'20''	8.7	81.0	0.21
5	19°16'08''	99°16'47''	6.9	75.0	0.19
6	19°16'19''	99°16'36''	16.7	70.0	0.35
7	19°15'52''	99°17'24''	27.0	87.0	0.36
8	19°14'34''	99°18'52''	30.0	92.0	0.38
9	19°14'57''	99°20'21''	—	95.0	0.34

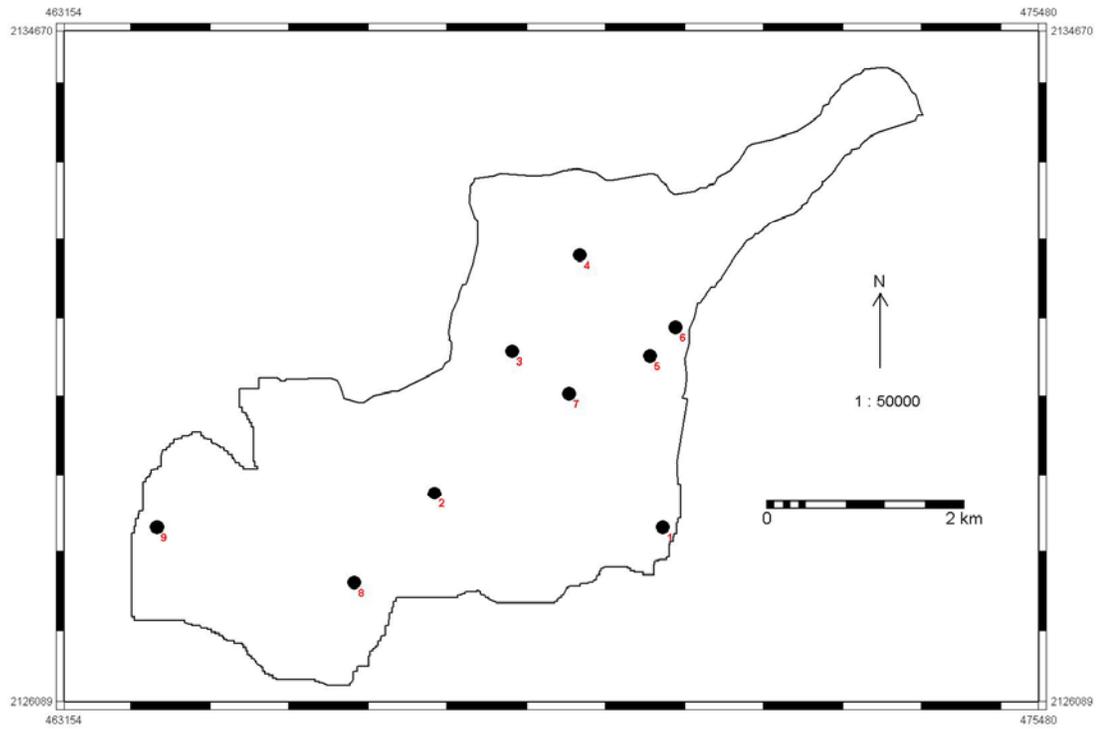


Figura 7: Localización de perfiles para la cuenca del río Magdalena, J. Gama (com. pers).

A continuación se muestran los datos de suelo por unidad ambiental (Tabla 8)

Tabla 8: Datos físicos de la CRM por unidad fito altitudinal

<b>Unidades fito altitudinales</b>	<b>Permeabilidad Roca</b>	<b>Permeabilidad suelos Cm h<sup>-1</sup></b>	<b>Erodabilidad</b>	<b>Conductibilidad hidráulica μm s<sup>-1</sup></b>
Bosque mixto	Poco permeable	6.9	0.19	75
Bosque de Abies	Poco permeable	12	0.27	80.5
Bosque de Pinus	Poco permeable	30	0.36	93.5

### III.1.3 Precipitación, balance hídrico y escurrimiento de la CRM

**Precipitación.**- Se regionalizó a la cuenca en tres partes: precipitación media anual de 800-1000 mm en la parte baja, 1000-1200 mm en la parte media y 1200-1500 mm en la parte alta y se ubicaron los datos de precipitación anual de las tres estaciones meteorológicas analizadas ([www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx)) (Figura 8).

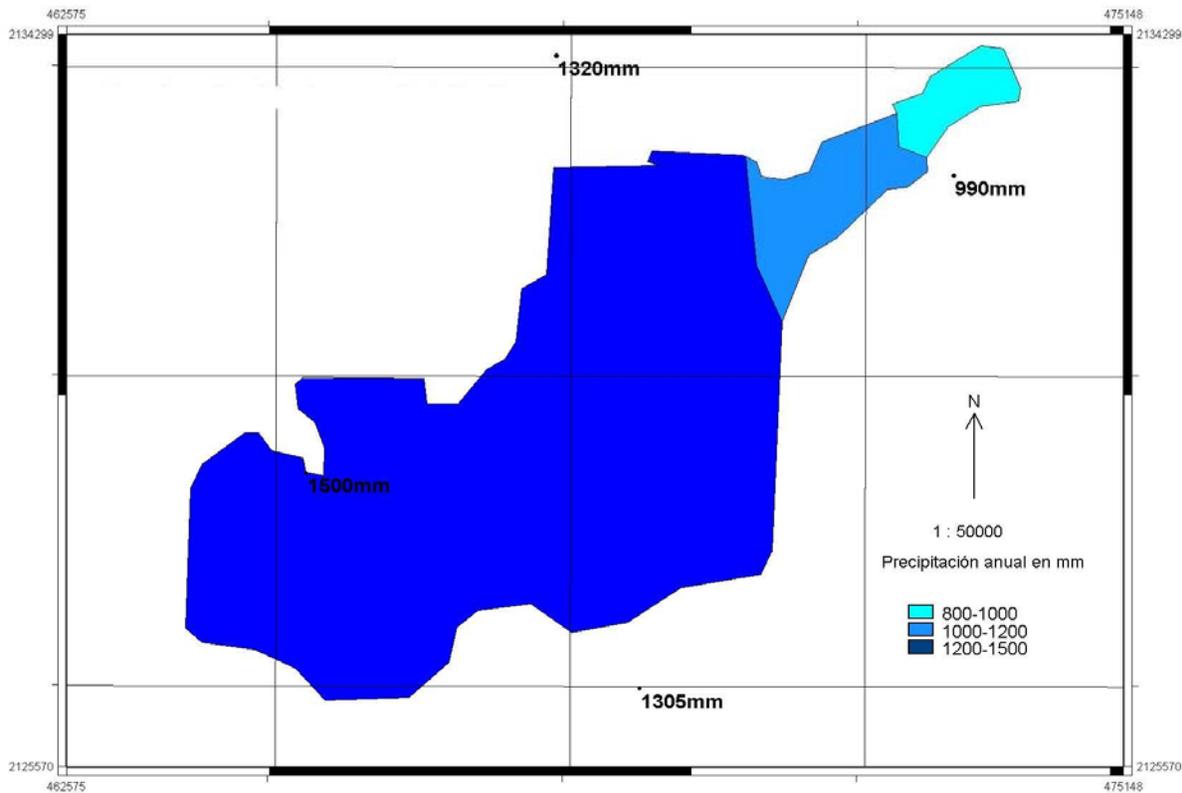


Figura 8. Mapa de precipitación anual (mm) de la cuenca del río Magdalena, D.F.

**Balances hídricos.**- A continuación se describe el balance hídrico de las tres estaciones meteorológicas analizadas.

La estación Alta del Pedregal corresponde a la unidad baja de bosque mixto. Se encuentra a una altitud de 2618 m snm y tiene una precipitación anual de 987mm. La época de recarga se da de mayo a octubre (Tabla 9). Como lo muestra la Figura 9, la evapotranspiración es bastante constante comparada con la precipitación; aunque en mayo es casi el doble que en enero.

Tabla 9. Estación 09020: Alta del Pedregal (1952-1988), 2618 m snm.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Annual
<b>Precipitación</b>	12	5	9	26	73	162	215	210	180	74	17	5	987
<b>Evapo potencial</b>	39	48	60	72	77	77	70	67	63	58	47	40	717
<b>Deficit de Ppt</b>	-27	-43	-51	-46	-4	85	146	143	117	16	-30	-34	
<b>Deficit acumulado</b>	-61	-	-155	-201	-205	0	0	0	0	0	-30	-64	
<b>Humedad suelo</b>	208	166	115	69	65	149	300	300	300	300	270	236	
<b>Cambio en la humedad</b>	-27	-43	-51	-46	-4	85	151	0	0	0	-30	-34	0
<b>Evapotranspiración Actual</b>	39	48	60	72	77	77	65	67	63	58	47	40	712
<b>Déficit en humedad del suelo</b>	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	
<b>Exceso de agua en el suelo</b>	0	0	0	0	0	0	0	143	117	16	0	0	
<b>Agua disponible para escurrir</b>	14	7	3	2	1	0	0	143	188	110	55	28	
<b>Escurrimiento</b>	7	3	2	1	0.4	0.2	0.1	71	94	55	27	14	275
<b>Agua retenida</b>	7	3	2	1	0.4	0.2	0.1	71	94	55	27	14	
<b>Balance Hídrico</b>	-7	-3	-2	-1	0	0	0	71	23	-39	-28	-14	0

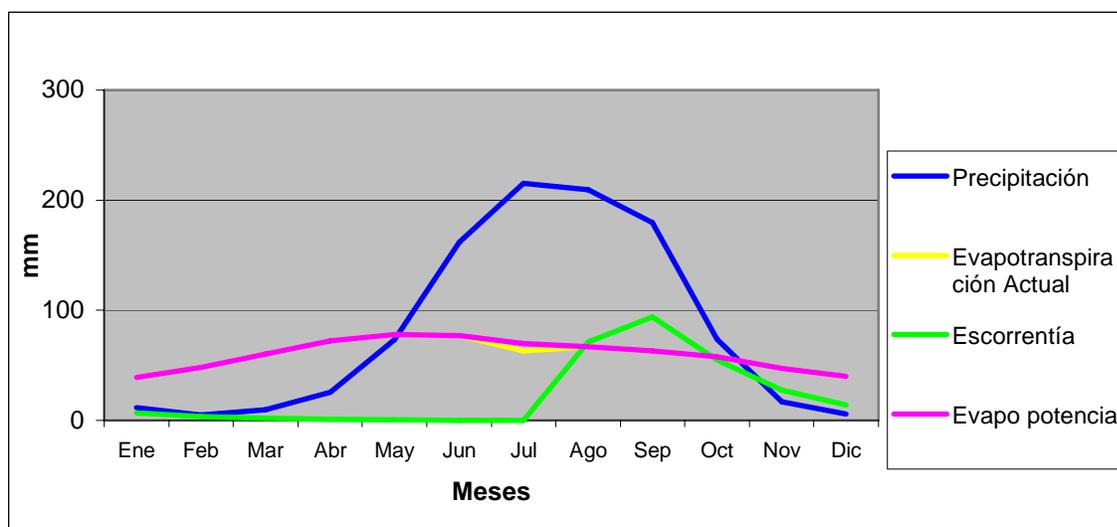


Figura 9: Balance hídrico de la estación Alta del Pedregal, México D.F.

La estación Desierto de los Leones corresponde con la unidad media de bosque de *Abies religiosa*. Tiene una precipitación de 1320 mm al año y está localizada a una altitud de 3400 m snm. Desde abril hasta octubre la precipitación excede a la evapotranspiración, por lo tanto hay recarga en esa época. La evapotranspiración no varía tanto como la precipitación a lo largo el año, debido a la poca diferencia de temperatura, sin embargo entre enero y julio casi hay el doble de evapotranspiración (Tabla 10 y Figura 10).

Tabla 10: Estación 09019 Desierto de los Leones, (1961-1987), 3400 m snm.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
<b>Precipitación</b>	17	13	16	42	98	217	272	284	234	93	15	12	1,320
<b>Evado potencial</b>	35	41	53	62	65	64	58	56	53	48	41	36	612
<b>Deficit de Ppt</b>	-18	-28	-37	-20	33	153	214	228	187	45	-26	-23	
<b>Deficit acumulado</b>	-41	-69	-106	-126	-93	0	0	0	0	0	-26	-49	
<b>Humedad suelo</b>	233	205	168	148	181	300	300	300	300	300	274	251	
<b>Cambio en la humedad</b>	-18	-28	-37	-20	33	119	0	0	0	0	-26	-23	0
<b>Evapotranspiración Actual</b>	35	41	53	62	65	64	58	56	53	48	41	36	612
<b>Déficit en humedad del suelo</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Exceso de agua en el suelo</b>	0	0	0	0	0	34	214	228	187	45	0	0	
<b>Agua disponible para escurrir</b>	28	14	7	4	2	35	231	343	359	224	112	56	
<b>Escorrimento</b>	14	7	3	2	1	18	116	172	179	112	56	28	708
<b>Agua retenida</b>	14	7	3	2	1	18	116	172	179	112	56	28	
<b>Balance Hídrico</b>	-14	-7	-4	-2	-1	17	98	56	8	-67	-56	-28	0

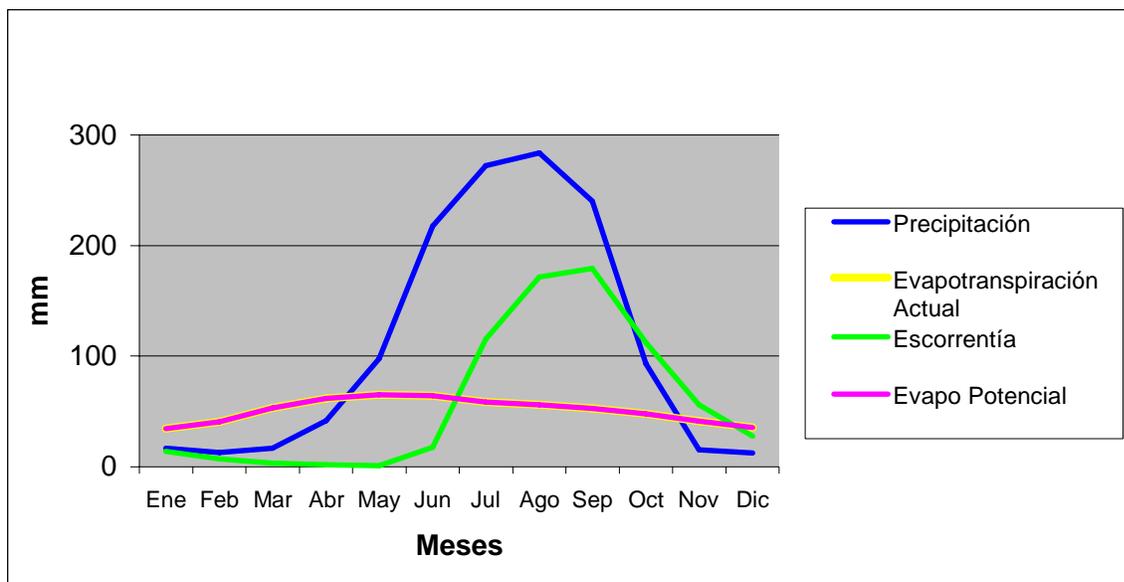


Figura 10: Balance hídrico de la estación Desierto de los Leones, México D.F.

La estación Monte Alegre también corresponde con la unidad media de bosque de *Abies religiosa*. Se encuentra a una altitud de 3485 m snm y tiene una precipitación anual de 1305 mm. La temporada de lluvias que va de abril a octubre, donde la precipitación excede a la evapotranspiración, por lo tanto en esa época se da la recarga de agua en el suelo (Tabla 11, Figura 11).

Tabla 10: Estación 09067 Monte Alegre Contreras, (1976-1983), 3485 m snm.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Precipitación	28	21	11	43	89	235	284	269	243	57	14	11	1,305
Evapo potencial	32	35	45	56	62	59	56	55	51	45	35	33	563
Deficit de Ppt	-4	-15	-33	-13	27	176	229	214	191	12	-20	-21	
Deficit acumulado	-25	-40	-73	-86	-59	0	0	0	0	0	-20	-42	
Humedad suelo	254	239	206	193	220	300	300	300	300	300	280	258	
Cambio en la humedad	-4	-15	-33	-13	27	80	0	0	0	0	-20	-21	0
Evapotranspiración Actual	32	35	45	56	62	59	56	55	52	45	35	33	563
Déficit en humedad del suelo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Exceso de agua en el suelo	0	0	0	0	0	96	229	214	191	12	0	0	
Agua disponible para escurrir	24	12	6	3	2	97	277	352	367	196	98	49	
Escorrimento	12	6	3	2	1	48	138	176	184	98	49	24	742
Agua retenida	12	6	3	2	1	48	138	176	184	98	49	24	
Balance Hídrico	-12	-6	-3	-2	-1	48	90	38	7	-86	-49	-24	0

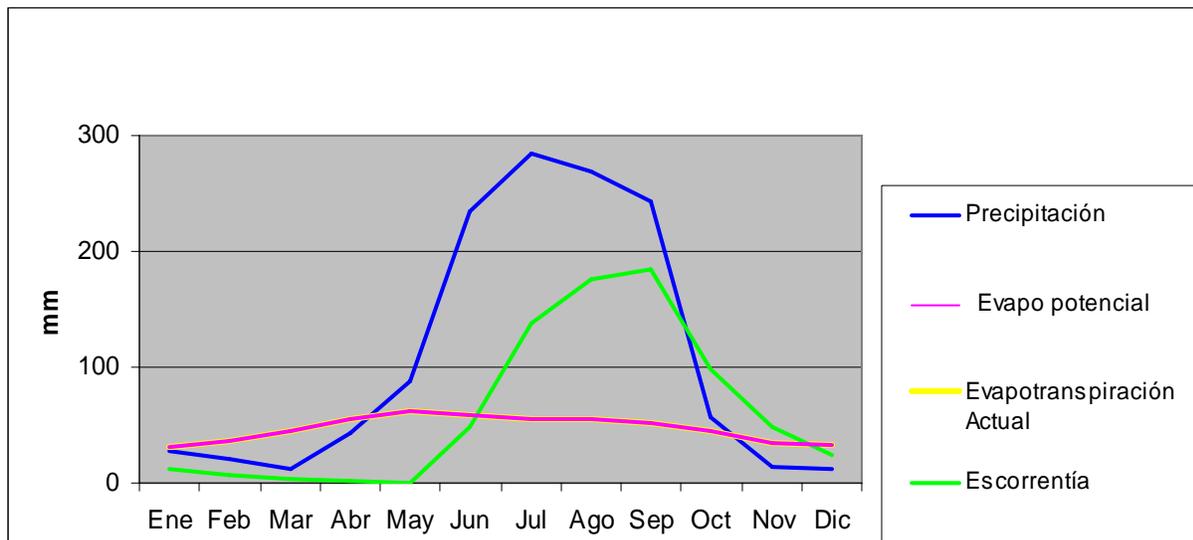


Figura 11: Balance hídrico de la estación Monte Alegre Contreras, México, D.F.

El balance hipotético de la estación interpolada, corresponde con la unidad alta del bosque de *Pinus hartwegii*, donde llueve 1500 mm al año. Desde mayo hasta octubre la precipitación excede a la evapotranspiración.

Tabla 12: Balance hídrico de la estación hipotética de 1500 mm (3500-3800 m snm)

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Precipitación	19	15	19	48	111	247	309	323	273	106	18	14	1,500
Evapo potencial	34	40	52	60	63	62	57	55	52	47	40	35	600
Deficit de Ppt	-15	-26	-33	-13	48	185	252	268	221	59	-23	-21	
Deficit acumulado	-37	-63	-96	-108	-61	0	0	0	0	0	-23	-44	
Humedad suelo	240	215	181	169	216	300	300	300	300	300	277	256	
Cambio en la humedad	-15	-26	-33	-13	48	84	0	0	0	0	-23	-21	0
Evapotranspiración Actual	34	40	52	60	63	62	57	55	52	47	40	35	600
Déficit en humedad del suelo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Exceso de agua en el suelo	0	0	0	0	0	101	252	268	221	59	0	0	
Agua disponible para escurrir	34	17	9	4	2	102	303	419	431	274	137	68	
Escorrimento	17	8	4	2	1	51	152	210	215	137	68	34	900
Agua retenida	17	8	4	2	1	51	152	210	215	137	68	34	
Balance Hídrico	-17	-9	-4	-2	-1	50	101	58	6	-78	-68	-34	0

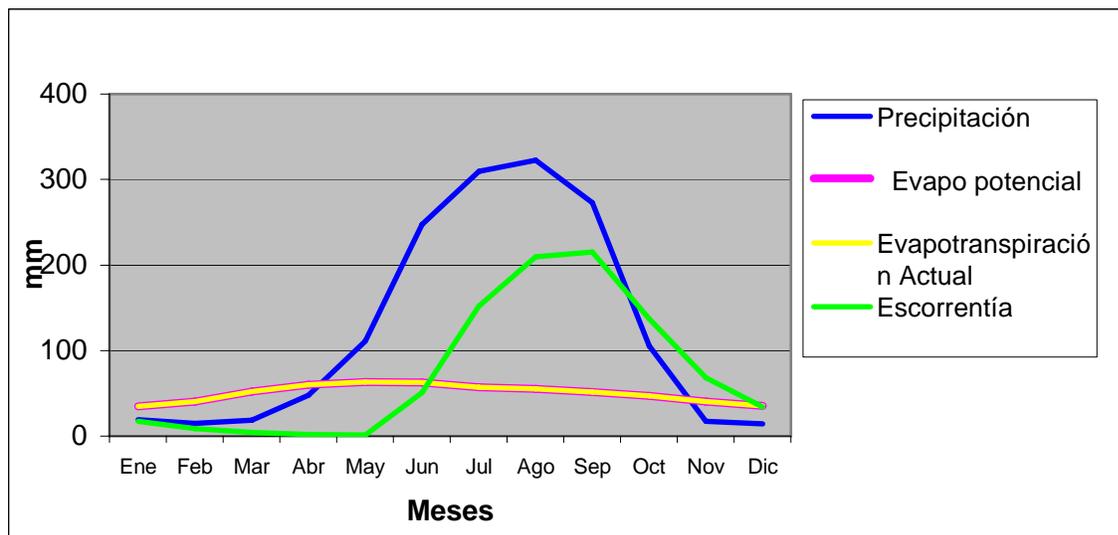


Figura 12. Balance hídrico de 1500 mm ubicada en la parte alta de la CRM

**Escorrimento total en la cuenca de río Magdalena, México, D.F.**-Los cálculos realizados para la unidad fito altitudinal de bosque de *Pinus hartwegii*, donde llueve 1500 mm al año, mostraron una escorrimento anual de 900 mm. Considerando que 900 mm equivale a 900 L en un m<sup>2</sup>, se

calculó que en dicha zona hay un escurrimiento de 8 487 000 m<sup>3</sup> de agua al año (Tabla 13). Esto equivale al 41% del agua disponible en la cuenca.

**Tabla13. Estimación del escurrimiento anual para la CRM**

Unidad fito altitudinal	Extensión (ha)	Precipitación anual (mm)	Escurrecimiento en mm en 1 m <sup>2</sup>	Escurrecimiento (m <sup>3</sup> ) por unidad fito altitudinal calculada con el valor anual	Escurrecimiento (m <sup>3</sup> ) ajustada mensualmente	Porcentaje con respecto al total
Bosque mixto	482	990	275	1 325 500	1 020 182	6%
Bosque de <i>Abies</i>	1469	1305	742	10 900 000	10 091 520	52%
Bosque de <i>Pinus</i>	943	1500	900	8 487 000	8 199 360	41%
Producción de agua anual				20 712 500	19 311 062	99%

El balance hídrico para la estación Monte Alegre Contreras mostró un escurrimiento de 742 mm al año y corresponde a la unidad fito altitudinal de bosque de *Abies*. En esta zona la precipitación anual es de 1300 mm. Considerando el mismo criterio que en el caso anterior, la cantidad de agua que escurre en esta zona es de 10 900 000 m<sup>3</sup> de agua al año, por lo que en esta zona se está generando el 52% del agua disponible en toda la cuenca.

El balance hídrico para la estación Desviación Alta al Pedregal mostró un escurrimiento de 275 mm al año, la cual corresponde a la unidad fito altitudinal de bosque Mixto; por lo que el escurrimiento total para la zona es de 1 325 500 m<sup>3</sup> de agua al año, equivalente al 6% del agua que se genera en esta cuenca; esta zona tiene una precipitación anual de 990 mm.

Cabe destacar que para los pastizales no se hicieron análisis de cuanto escurrimiento producen, debido a que se encuentran distribuidos en toda la cuenca pero cubriendo superficies muy pequeñas.

**Escurrecimiento mensual.** Los datos anteriores se utilizaron para tener una estimación de cuanta agua está produciendo la cuenca de manera general tomando en cuenta datos de escurrimiento anual. Posteriormente se hizo el cálculo para analizar como se comporta el escurrimiento mensualmente. La suma de los valores de las tres zonas de la cuenca: baja, media y alta, dieron

un valor de  $0.63 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , contra  $0.65 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  que se obtuvo de realizar los cálculos de manera anual (Tabla 14). Esto indica que toda la cuenca tiene un escurrimiento promedio de  $0.63 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$

**Tabla 14. Ecurrimiento mensual calculada en  $\text{m}^3/\text{s}$  para las tres unidades fito altitudinales de la CRM**

Estaciones	Alta del Pedrega 1990mm	Monte Alegre Contreras 1305mm	Hipotética 1500mm	Ecurrimiento para toda la CRM
Superficie (ha)	482	1496	943	
Ene	0.01	0.077	0.06	0.147
Feb	0.006	0.043	0.033	0.082
Mar	0.003	0.019	0.015	0.037
Abr	0.001	0.01	0.008	0.019
May	0.001	0.005	0.004	0.01
Jun	0	0.1	0.186	0.286
Jul	0	0.634	0.535	1.169
Ago	0.12	0.941	0.738	1.799
Sept	0.17	1.016	0.782	1.968
Oct	0.09	0.615	0.482	1.187
Nov	0.05	0.318	0.249	0.617
Dic	0.024	0.154	0.121	0.299
<b>Promedio</b>	0.039	0.327	0.267	0.635

**Ecurrimientos máximos y mínimos del río Magdalena, México, D.F.** En la estación hidrométrica Magdalena, ubicada entre el primer y segundo dinamo, prácticamente al final de la cuenca, se han medido los escurrimientos del río Magdalena desde el año 1997 hasta el 1999. Siendo este último año el único que tiene los registros completos desde enero hasta diciembre. Para 1997 sólo se midieron los meses de agosto a noviembre y para 1998 de junio a diciembre. Por ello, para el análisis del escurrimiento en este trabajo únicamente se tomaron en cuenta los datos de 1999 (Gobierno del Distrito Federal, 1999).

Los valores máximos se alcanzan entre los meses de junio a octubre, lo que corresponde a la temporada de lluvias. Estos máximos van de  $1.5$  a  $3.4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  y los mínimos para esa temporada son de  $0.1$  a  $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . En la época de estiaje, que se registra de diciembre a mayo, los valores más altos son de  $0.3$ - $0.15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  y los más bajos de  $0.25$ - $0.1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (Tabla 14) y (Figura 13) (Gobierno del Distrito Federal, 1999).

Si se promedia los valores máximos y mínimos de escurrimiento mensual para todo el año, el río tiene un volumen instantáneo de escurrimiento de  $0.76 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , contra  $0.63$  reportado por el balance hídrico. Sin embargo, al sacar el promedio mensual de escurrimiento, el valor de la estación hidrométrica cambia a  $0.44 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (Figura 14).

**Tabla 15. Escurrecimientos máximos y mínimos del año 1999 para la estación hidrométrica Magdalena, D.F.**

Año	1999			
Mes	Esc max $m^3 s^{-1}$	Esc min $m^3 s^{-1}$	Promedio max y min $m^3 s^{-1}$	Promedio mensual
Ene	0.25	0.25	0.25	0.25
Feb	0.3	0.1	0.2	0.20
Mar	0.15	0.15	0.15	0.15
Abr	0.15	0.15	0.15	0.15
May	0.15	0.1	0.12	0.12
Jun	1.55	0.1	0.82	0.56
Jul	3.1	0.35	1.72	0.65
Ago	2.67	1	1.83	1
Sept	2.4	0.8	1.60	0.80
Oct	3.47	0.3	1.88	1.11
Nov	0.2	0.2	0.20	0.20
Dic	0.2	0.2	0.20	0.20
<b>Escurrecimiento Total</b>			<b>0.76</b>	<b>0.44</b>

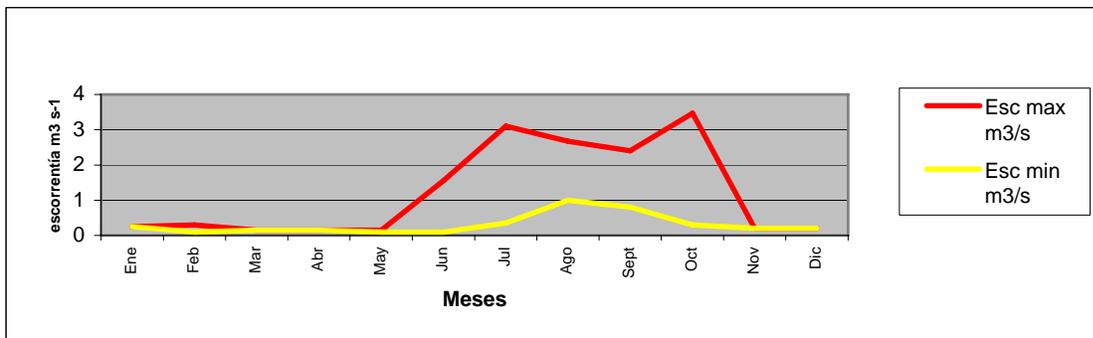


Figura 13. Escurrecimientos máximos y mínimos de la estación hidrométrica Magdalena.

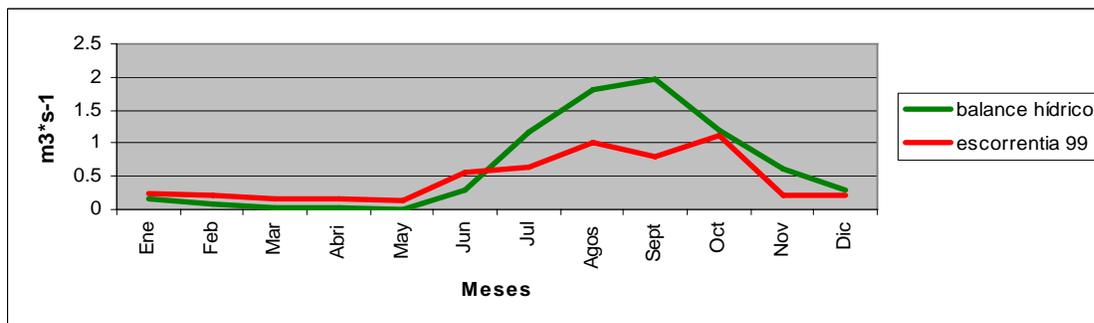
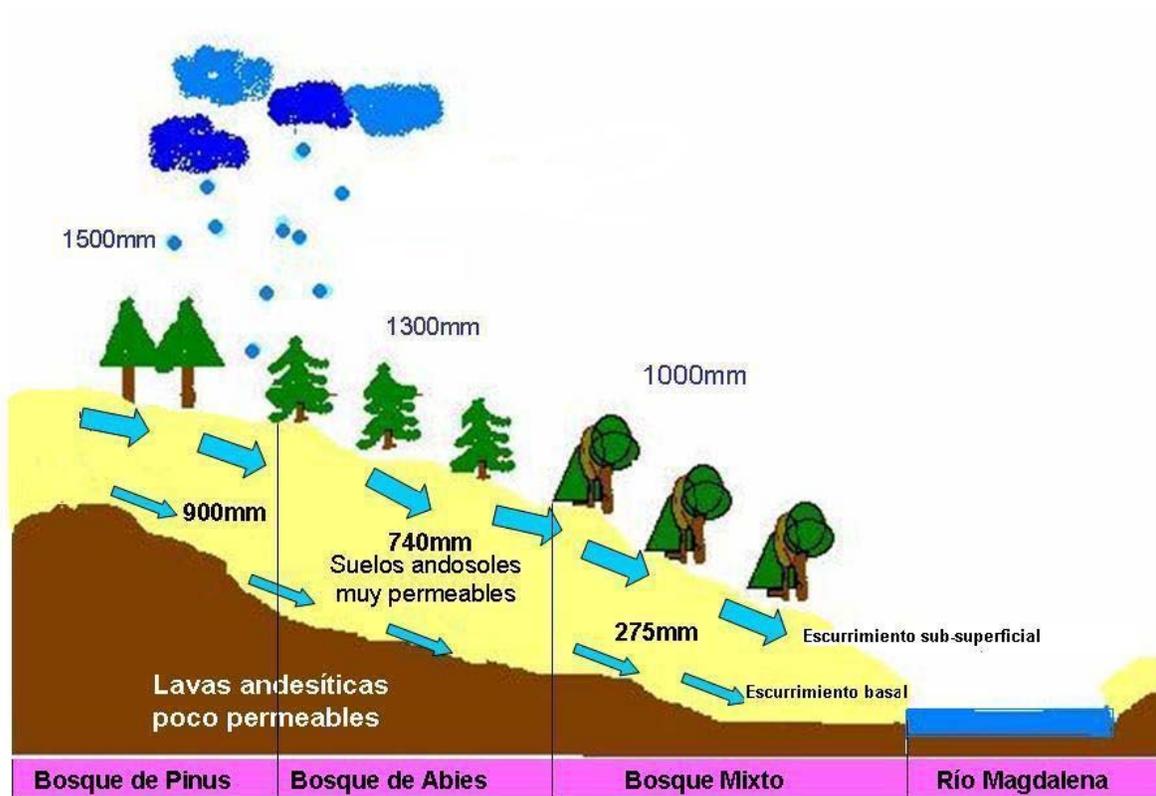


Figura 14. Comparación entre el escurrecimiento reportado en la estación hidrométrica y el calculado en el balance hídrico para la CRM.

**Comportamiento del agua en la CRM.-** La cuenca del río Magdalena nace en el cerro Palma y acaba donde el río Magdalena se une con el río Eslava. La unión se encuentra en el extremo suroeste de las instalaciones del Centro de Investigación y Seguridad Nacional (CISEN) en los 19° 18'32'' N y 99° 14'12.39'' W. En el balance hídrico realizado, se observó que la precipitación en la cuenca es cercana a los 1000 mm en la parte baja y hasta 1500 mm en la zona más alta. La época de lluvias va de mayo a octubre y en estos meses la precipitación siempre es mayor a la evapotranspiración.

El escurrimiento que se obtuvo en cada balance hídrico indicó que la zona que más agua tiene para escurrir es la parte media. Esto se debe a la extensión que tiene la zona, ya que en la parte alta el escurrimiento fue mayor pero la extensión menor. Sumando todo el escurrimiento de la cuenca, se estima que el total de agua que se está generando al año en la zona de estudio es de 20 millones de m<sup>3</sup>, lo cual equivale a 0.63m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>. Mientras, la delegación reporta que el río tiene un volumen de agua permanente de 1 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> ([www.magdalenacontreras.gob.mx](http://www.magdalenacontreras.gob.mx)), y el promedio de escurrimiento anual que tiene la estación de aforo para el año 1999 es de 0.44 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>. La descripción física explicada con anterioridad, indica que el agua pasa muy fácilmente por los suelos permeables, pero al llegar a un estrato poco permeable de rocas andesíticas escurre de manera sub-superficial y basal, hasta llegar a algún sustrato permeable que le permita emerger, ya sea en manantiales o al río Magdalena. La similitud de los valores de escurrimiento del balance y de la estación de aforo, más la descripción física, reflejan que el agua prácticamente no se infiltra al acuífero de valle de México, sino que desemboca directamente a la base de la cuenca en el río Magdalena (Figura 15). Cabe mencionar que para futuros trabajos e interpretaciones sería necesario considerar la presencia de fallas y fracturas, lo cual podría estar ocasionando infiltración de agua a mantos profundos. También es fundamental realizar levantamientos geomorfológicos detallados.



### **III.2 Identificación y localización espacial de los servicios ecosistémicos relacionados con el agua que brinda la CRM**

A continuación se describen los servicios ecosistémicos relacionados con el recurso agua que se evaluaron para la cuenca del río Magdalena, de acuerdo con la clasificación del Millennium Ecosystem Assessment (2003).

#### **Provisión**

##### **1.-Provisión de agua**

Según los balances hídricos realizados, la provisión de agua se genera en toda la cuenca, en estas proporciones: 8 199 360 m<sup>3</sup> al año en la parte alta, 10 091 520 m<sup>3</sup> en la media y 1 020 182 m<sup>3</sup> en la parte baja. Generando una provisión del servicio del orden de los 20 millones de m<sup>3</sup> de agua al año, 0.65 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>.

Consumo.- La provisión de agua se consume directamente del río o ya después que es filtrada por la planta potabilizadora. Directamente del río la consumen los comuneros que tienen puestos de comida en la zona de los dinamos; ellos la utilizan para los servicios de la vivienda, estanques de engorda de trucha y para actividades relacionadas con su negocio (sanitarios, lavar trastes, cocinar) (Z. Saavedra, com. pers.). En la zona urbana, el agua del río Magdalena la consumen principalmente los habitantes de la porción NW de la delegación Magdalena Contreras, los pueblos de San Bernabé y San Jerónimo Lídice. Esta se recibe después de que la filtra la planta potabilizadora, posteriormente esa agua se distribuye a las zonas arriba mencionadas (delegación Magdalena Contreras, 2004). Cabe mencionar que la planta potabiliza (200 L/s), el resto del agua es entubada para formar parte del drenaje en la presa Anzaldo (M. Mazari, com. pers.).

##### **2.-Provisión de truchas**

La provisión de truchas depende en gran medida de la cantidad de agua que traiga el río. Existen 7 grupos familiares de producción. Se producen de entre 25 a 40 toneladas de trucha l año. La mayoría no son autosuficientes, los alevines los adquieren de la iniciativa privada de Puebla, del estado de México (A. Ramos, com. pers.).

La mayoría de los negocios son de comuneros de la Magdalena Atlitic y se encuentran en el segundo dinamo (unidad fito altitudinal de bosque mixto). No son criaderos, ya que compran los alevines y sólo los engordan en sus estanques. El único criadero, llamado Aíla, se encuentra a la

altura del cuarto dinamo, en una brecha alterna a la carretera, siguiendo el río (Z, Saavedra, com. pers.) en la unidad fito altitudinal de bosque de Abies. Este truchero empezó con gente de pesca y de la UAM Xochimilco.

CORENA presta asesoría a los trucheros de tipo ocular, revisan que haya:

- Buena presentación
- No desgarre en aletas ni piel
- Distribución de los individuos por tallas. Las tallas iniciales deben ir mas arriba y así sucesivamente
- Alimentación adecuada
- Condiciones del agua: oxígeno, transparencia y pH
- No se meten químicos al agua

El consumo principal se da en la unidad baja, en los puestos locales del segundo dinamo y en menor media en la unidad media, en los otros puestos ubicados por el 4 dinamo.

## **Regulación**

### **3.-Control de erosión y mantenimiento de suelo**

Los suelos de la cuenca son ácidos y ricos en materia orgánica, lo que facilita el establecimiento de la vegetación de coníferas nativas en la zona. La erodabilidad de la zona es alta, ya que en la mayoría de los casos muestran valores por arriba de 0.25. Por lo tanto, es importante conservar la cobertura vegetal para que los suelos no se degraden. Basándose en el criterio de Gama-Castro *et al.*, (1990) se adjudicó a las unidades de paisaje (Jujnovsky, 2003) un porcentaje de cobertura vegetal, sumándole el parámetro de erodabilidad (Tabla 15).

Con base en estas características, las unidades de paisaje que estarían sufriendo el mayor peligro de pérdida de suelo son: la 8, 9B, 14, 15, 16, 18, y la 6A y 6B pero estas últimas en regiones aisladas (Figura 16). Las unidades fito altitudinales de *Pinus hartweggi* y la unidad media de *Abies religiosa*, en regiones asiladas, son las zonas donde el servicio de control de erosión y mantenimiento de suelo es más importante. Este servicio ecosistémico es generado y consumido localmente.

Como información adicional, la agresividad climática demostró que para la estación 9067 la agresividad climática fue de 216, para la estación 9020 fue de 162 y para la estación 9019 fue de 212. Esto indica que para la unidad baja, la agresividad climática fue de 162, y para la media

de 212-216, por lo tanto la zona muestra una agresividad climática moderada de acuerdo a la clasificación FAO-PNUMA (1980). Esta información no fue posible correlacionarla con los datos de las unidades de paisaje, debido a la escasez de información climatológica, sin embargo es un dato adicional que indica que estos suelos son poco propensos a erosionarse por lluvia (Tabla 16).

Tabla 15. Unidades de paisaje con peligro a pérdida del servicio ecosistémico regulación y control de suelo en la CRM, Distrito Federal, México.

<b>UP</b>	<b>Pendientes</b>	<b>%Cobertura vegetal</b>	<b>Erodabilidad</b>
<b>1</b>	12-30°	90	0.35
<b>2A</b>	0-6, 12-18	85	0.35
<b>2B</b>	18-30	80	0.35
<b>3A</b>	30-45	65	0.38
<b>3B</b>	30-45, >45	65	0.38
<b>3C</b>	30-45, >45	60	0.38
<b>4</b>	06-12°	85	0.38
<b>5A</b>	18-45°	70	0.30
<b>5B</b>	18-30°	60	0.30
<b>6A</b>	30-45, <45°	20	0.35
<b>6B</b>	12-18, 18-30°	50	0.35
<b>7A</b>	18-30, 30-45°	80	0.36
<b>7B</b>	12-18, 18-30, 30-45	55	0.36
<b>8</b>	<45°	50	0.30
<b>9A</b>	18-30°	60	0.35
<b>9B</b>	18-30°	5	0.21
<b>10</b>	12-18°	60	0.21
<b>11</b>	18-30°, 30-45°	90	0.21
<b>12</b>	18-30°	65	0.30
<b>13</b>	12-18°	80	0.30
<b>14</b>	18-30°	0	0.38
<b>15</b>	18-30°	15	0.34
<b>16</b>	6-12°	15	0.30
<b>17</b>	12-18°	55	0.35
<b>18</b>	18-30°	50	0.34
<b>19</b>	0-6, 6-12°	100	0.21
<b>20</b>	0-6	100	0.19
<b>21</b>	6-12°	100	0.23
<b>22</b>	3-6°	100	0.19
<b>23</b>	0-6°	100	0.19

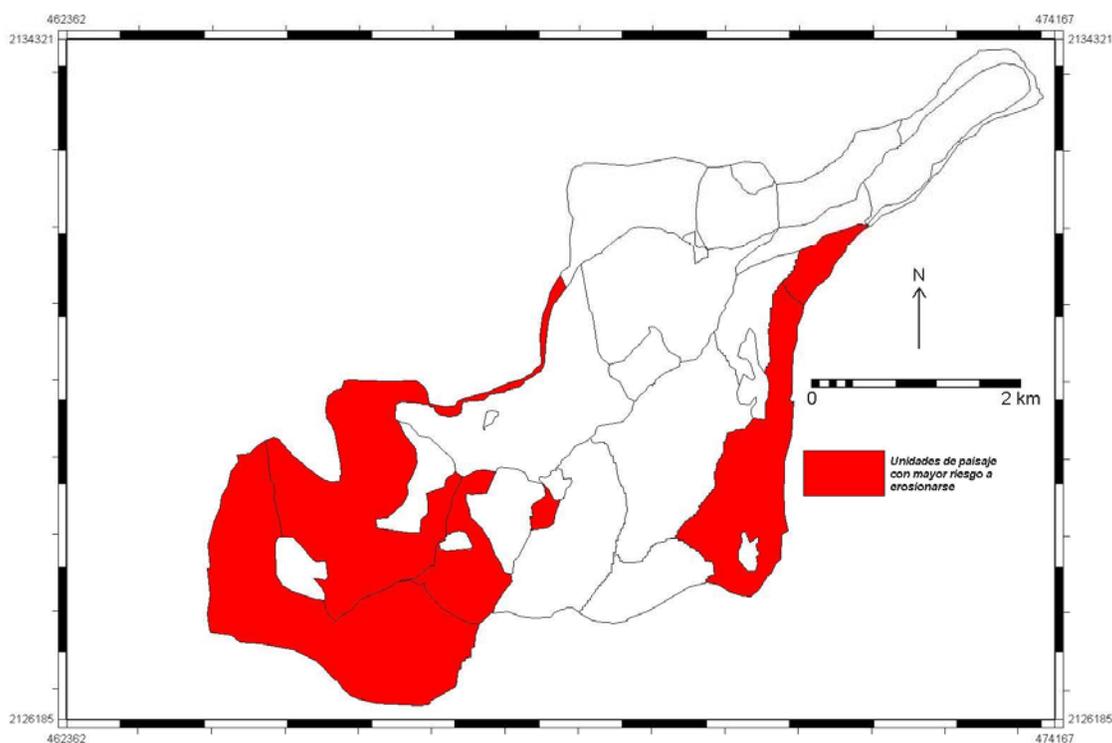


Figura 16. Unidades de paisaje con mayor peligro a erosionarse en la cuenca del río Magdalena

Tabla 16. Agresividad climática de las tres estaciones más cercanas a la CRM.

<b>Estación 9067</b>													
	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Anual</b>
<b>Monte Alegre</b>													
Precipitación	27	21	11	43	89	235	284	269	243	57	14	11	1,305
R	0.6	0.3	0.1	1.4	6	42	62	55	45	2.5	0.2	0.1	<b>216</b>
<b>Estación 9020</b>													
	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Anual</b>
<b>Alta del Pedregal</b>													
Precipitación	11.7	4.9	9.42	25.6	73.2	162	215	210	180	73.9	17	5.6	987.4
R	0.14	0	0.09	0.6	5.4	26	47	44	33	5.5	0.3	0	162.8
<b>Estación 9019</b>													
	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Anual</b>
<b>Desierto de los Leones</b>													
Precipitación	17	13	16	4	98	218	272	284	240	93	15	12	1,320
X	0.21	0.1	0.2	1.3	7.23	35.8	56.1	61.1	43.6	6.55	0.2	0.12	212

#### 4.-Calidad del agua

Según estudios realizados en la zona (Cantoral et al., 1998; Bojorge-García, 2002), la calidad del agua de las unidades fito altitudinales alta y media es buena, lo cual contribuye a que el río sea apto para beber, cocinar y bañarse. El río está representado por comunidades algales típicas de corrientes alpinas que corresponden a la vegetación original: como *Pinnularia borealis* (Bacillariophyceae), *Scenedesmus armatus* (Chlorophyceae) y *Prasiola mexicana* (Chlorophyceae). Son características de aguas cataróbias, esto es limpias e inalteradas. Los crecimientos visibles más abundantes son de *Prasiola mexicana*, costras verdes adheridas a las rocas de *Chlorococcum* sp y películas de *Phormidium retzii* y *Lyngbya* sp, que cubren el sustrato rocoso del cauce. Las comunidades algales encontradas en el río Magdalena corresponden a la flora original de corrientes de montaña para México (Cantoral, 1998).

Según Bojorge-García (2002), las diatomeas más abundantes y frecuentes en todas las comunidades (*Achnanthes lanceolata*, *Cocconeis placentula*, *Fragilaria capucina* y *Navícula cryptocephala*, permiten caracterizarlo como un sistema de aguas limpias.

En la parte más baja de la unidad fito altitudinal de bosque mixto, la calidad del agua va disminuyendo. Cuando entra a la zona urbana presenta un cambio importante respecto a la fisicoquímica del agua y se ve expresada en las comunidades algales. Estas cambian en cuanto a composición de los grupos presentes como en su expresión fenotípica mostrando cambios en coloración, olor y una alta cantidad de epífitas. En esta zona se observa aumento en las comunidades bacterianas y de cianofitas relacionadas con un incremento en la concentración de sulfatos, fosfatos y nitratos, debido al aporte de desagües domésticos de la zona. En la zona urbana se construyó un tubo colector, ya que el agua se contamina por los drenajes de las casas que están sobre el lecho del río, debido a que descargaban directamente. Este tubo va paralelo al río y se conectan a él los drenajes de las casas que descargaban en el afluente. Sin embargo, en algunas partes la fuerza del agua ya se ha llevado los tubos que conectan el drenaje de las casas al colector, por lo tanto, vuelven a descargar sobre el río. También, se ha visto que el agua de los drenajes que va por el colector se desborda por los respiraderos hacia el río (Z. Saavedra, com. pers.).

El río es perenne y se recomienda que no se baje su nivel, con la finalidad de mantener la flora y fauna natural. Sin embargo, la calidad del agua disminuye en época de lluvias o durante períodos vacacionales. Los procesos ecológicos que controlan su calidad son la precipitación y escurrimiento del río, ya que el agua disminuye el efecto contaminante. Sin embargo, los

procesos humanos son muy diferentes, ya que la calidad del agua cambia en época vacacional. Por otro lado, en temporada de lluvias, el nivel del río sube, por lo que arrastra basura e incluso heces fecales y animales muertos que la gente tira en las orillas (Z. Saavedra, com. pers.). Desafortunadamente los procesos humanos le ganan a los procesos ecológicos y la gente influye completamente en la calidad del agua del río.

### **5.-Control de inundaciones y remoción en masa**

Remoción en masa.- La vegetación de la cuenca del río Magdalena favorece a que no haya remoción en masa en el área y a mantener el ciclo hidrológico local. Los suelos son muy permeables por lo que la vegetación es fundamental para que disminuya la cantidad de agua que llega al suelo y de esta manera el suelo no se sature y comience a moverse. Este servicio se genera y consume en la unidad fito altitudinal de *Abies religiosa* ya que es la que tiene las laderas más pronunciadas, mayores a los 30° (Jujnovsky, 2003). Las remociones en masa, pueden ser grandes en las zonas donde se han hecho obras, ya sea caminos o casas, ocurren donde hay deforestación por los asentamientos irregulares. El resto de la remoción en masa se puede dar por caída de árboles por el viento o agua, tanto en la zona de la unidad baja como en la media (Z. Saavedra, com. pers.) ya que las raíces actúan como matriz de retención del suelo.

Inundaciones.- Debido a la elevación de la zona, en la cuenca no hay inundaciones. El nivel del río sube en época de lluvias, pero sólo afecta a algunas viviendas que se encuentran al lado del río. Este tipo de asentamientos son irregulares, ya que la ley señala que no se puede construir a 5 m a cada lado del cauce del río (Z. Saavedra, com. pers.). Los escurrimientos máximos registrados para la zona son del orden de los 3 ó 4 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> y se dan desde julio hasta octubre en esta época es donde más actúa el servicio ecosistémico de control de inundaciones y ocurren en la unidad baja de bosque mixto principalmente.

### **6.-Regulación de agua sub-superficial y basal.**

En los bosques de la cuenca, el agua de lluvia penetra rápidamente ya que la permeabilidad de los suelos es elevada. Sin embargo, al llegar a la roca madre, Andesita impermeable, el agua escurre horizontalmente sobre la roca. La recarga principal se da por escurrimiento sub-superficial y basal, y no llega al acuífero profundo. El escurrimiento sub-superficial acumula agua y esta es la razón por la que el río es perenne (L. Cisneros, com. pers.). Este servicio es más importante en la unidad fito altitudinal alta de *Pinus hartwegii*, ya que es

aquí donde llueve más, y donde la permeabilidad de los suelos y la conductibilidad hidráulica es más elevada.

## **Culturales**

### **7.-Recreación y ecoturismo**

La parte baja y media de la cuenca es visitada por miles de personas, principalmente los fines de semana. En la unidad baja, la delegación construyó infraestructura (senderos, puentes, baños, señalamientos, etc.) para apoyar a las actividades turísticas pero es necesario que la comunidad se organice como lo solicita la delegación, ya que los comuneros no pueden establecer cuotas o pago de entrada a los visitantes por el uso de estas obras (Z. Saavedra, com. pers.). Las actividades turísticas que se realizan son: comidas en los restaurantes campestres, campamentos en el bosque o en la zona de cabañas de “El Potrero”; paseos en el bosque o jugar en el río; en el primer dinamo se pueden realizar paseos a caballo, circuitos de motos, gotcha y retiros espirituales. Hay un sitio recreativo en el segundo dinamo llamado “Paidos”, es una zona con juegos al lado del río con lugar para comer. Existe un proyecto de producción de trucha donde se espera que se lleven a cabo actividades de pesca recreativa en un futuro (delegación Magdalena Contreras, 2004).

En la unidad media, existe turismo de escaladores en la pared de la Coconetla. Otras actividades que realizan los excursionistas son visualización de fauna, principalmente aves; bicicleta de montaña, así como fotografía paisajística y caminatas (Z. Saavedra. com. pers.)

### **8.- Belleza escénica**

El servicio ecosistémico de belleza escénica se genera en las áreas donde el bosque presenta buena cobertura vegetal y zonas cercanas a cuerpos de agua, ya que el río cristalino, las cascadas y los manantiales contribuyen a crear un clima de armonía en donde los visitantes disfrutan del paisaje. De acuerdo a estas características ambientales y a la accesibilidad de la zona, las unidades que proveen y consumen este servicio son las unidades fito altitudinales baja y media.

## Especialización de los servicios: Generación y consumo

Se muestran a continuación los servicios más importantes, en cuanto a generación (Tabla 17) y consumo (Tabla 18), por unidad fito altitudinal.

### Importancia

**1: baja**

**2: media**

**3: alta**

Tabla 17. Generación de servicios ecosistémicos por unidad fito altitudinal.

Servicio	Región baja de bosque mixto	Región media de bosque de <i>Abies religiosa</i>	Región alta de bosque de <i>Pinus hartwegii</i>
Provisión de agua	2	3	3
Provisión de truchas	2	3	1
Control de erosión y mantenimiento de suelo	2	3	3
Calidad del agua	1	2	3
Control de inundaciones y remoción en masa	2	3	1
Regulación de agua sub-superficial y basal	1	2	3
Recreación y ecoturismo	3	2	1
Belleza escénica	2	2	2
<b>Importancia</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>17</b>

Tabla 18. Consumo de servicios ecosistémicos por unidad fito altitudinal.

Servicio	Región baja de bosque mixto	Región media de bosque de <i>Abies religiosa</i>	Región alta de bosque de <i>Pinus hartwegii</i>
Provisión de agua	3	2	1
Provisión de truchas	3	2	1
Control de erosión y mantenimiento de suelo	2	3	3
Calidad del agua	3	2	2
Control de inundaciones y remoción en masa	3	2	1
Regulación de agua sub-superficial y basal	3	3	3
Recreación y ecoturismo	3	2	1
Belleza escénica	3	3	2
<b>Importancia</b>	<b>23</b>	<b>19</b>	<b>14</b>

### **III.3 Recomendaciones de manejo para cada unidad fito altitudinal de acuerdo a los servicios ecosistémicos que provee.**

A continuación se describirán qué servicios son los más importantes en cada unidad, en dónde se están generando y consumiendo y una propuesta de manejo específico (para cada zona de acuerdo al peligro de pérdida de servicios).

#### **Unidad fito altitudinal de bosque de *Pinus***

Esta área, por ser la más alta, es donde hay mayor precipitación y menor evapotranspiración y donde nace el río Magdalena, aquí los servicios más importantes que se generan son: provisión de agua, control de erosión y mantenimiento de suelo, calidad del agua y regulación de agua sub-superficial y basal. Es la unidad más vulnerable a perder estos servicios, ya que la cobertura vegetal no está en buen estado como en la parte media, tiene los mayores índices de erodabilidad y además, es la que tiene mayor permeabilidad de los suelos, lo que contribuye a que haya mayor infiltración, esto a la vez pone en peligro la estabilidad del suelo.

Las recomendaciones fundamentales para cuidar los servicios que genera esta unidad son: reforestar con *Pinus hartwegii*, y darle el seguimiento adecuado a estos programas. Controlar el paso del ganado para proteger a las plántulas o a los árboles pequeños. En las zonas, que según Ávila-Akerberg (2004), son las más auténticas (o mejor conservadas), se deben construir tinajas ciegas para retener escurrimientos superficiales y propiciar recarga al subsuelo y, a las zonas mejor conservadas hay que protegerlas. Es fundamental cuidar la calidad del agua en esta zona, ya que si se contamina arriba pierde toda calidad cuenca abajo, por lo tanto no se debe permitir tirar basura, pilas alcalinas, o detergentes en el nacimiento del río. Esta zona sería recomendable utilizarla para uso forestal.

#### **Unidad fito altitudinal de bosque de *Abies religiosa***

Esta zona es la que más servicios ecosistémicos genera: Se da también el servicio ecosistémico de provisión de agua, ya que aunque la precipitación no es tanta como en la parte alta, el escurrimiento total es mayor debido a la extensión de la unidad. Se genera también el servicio de provisión de alimento, representado principalmente por los criaderos de truchas. En cuanto a los servicios de regulación es importante, al igual que en la unidad alta, el servicio de

control de erosión y mantenimiento de suelo, y al ser una zona de pendientes abruptas se suma el servicio de control de remoción en masa.

Las recomendaciones para esta unidad radican en: conservar la cobertura vegetal, para disminuir el escurrimiento superficial y el peligro de pérdida de suelos por remoción en masa. En las zonas mejor conservadas se debe hacer aclareo de arbustos dominantes para promover la regeneración natural, poner cercas vegetales para retener suelo y humedad así como restringir su paso y uso sólo para conservación y restauración.

### **Unidad fito altitudinal de bosque mixto**

Esta área por ser la más baja y la que está más en contacto con la población es la más importante en cuanto a consumo de servicios ecosistémicos. La recreación y el ecoturismo son servicios que se generan y consumen localmente. En esta unidad se encuentran manantiales, áreas de comida, lugares para montar a caballo, andar en moto, etc.

Las recomendaciones para esta área son: utilizarse para ecoturismo, fomentando actividades al aire libre, pero siempre con el objetivo de la conservación y el manejo racional de los recursos. Es el lugar ideal para bañarse en el río, hacer senderos y caminatas, montar a caballo y acampar. Se debe conservar o recuperar la calidad del río para asemejarla a las partes altas, para ello, es importante restaurar la vegetación riparia (Sweeney *et al.* 2002), reforestando con las especies nativas como *Quercus rugosa* y *Quercus laurina* en las áreas que así lo requieran. También se deben hacer quemas controladas para favorecer la regeneración. Es importante controlar el acceso a las personas, de esta manera ayuda a que haya mayor seguridad en el parque. Además hay que erradicar la basura, para lo cual es importante colocar muchos botes junto con información de educación ambiental. Es importante dotar de servicios amigables con el ambiente, como fosas sépticas, a los puestos locales, para que los desechos no sean vertidos directamente al río.

### **Unidad fito altitudinal de pastizales**

En las áreas de pastizales que se encuentren dentro de las regiones media y alta, habría que dejarlas descansar y confiar en la resiliencia del ecosistema dejando que el bosque avance de manera natural cubriendo los lugares desnudos y no introduciendo ganado. No hay que olvidar que estos pastizales son azonales por lo que en muchos sitios no va a crecer vegetación arbórea, pero sí es importante protegerlos del ganado, para que no compacten el suelo, porque en estas

áreas la tasa de infiltración de agua de lluvia es mayor. Los pastizales que se encuentren dentro de la parte baja, se pueden aprovechar para construir infraestructura eco-turística, como cabañas y áreas para acampar. A los pobladores locales hay que motivarlos para que su fuente de ingreso sea el ecoturismo y el pago por servicios ambientales y que la protección del bosque sea una prioridad para ellos (Figura 17).

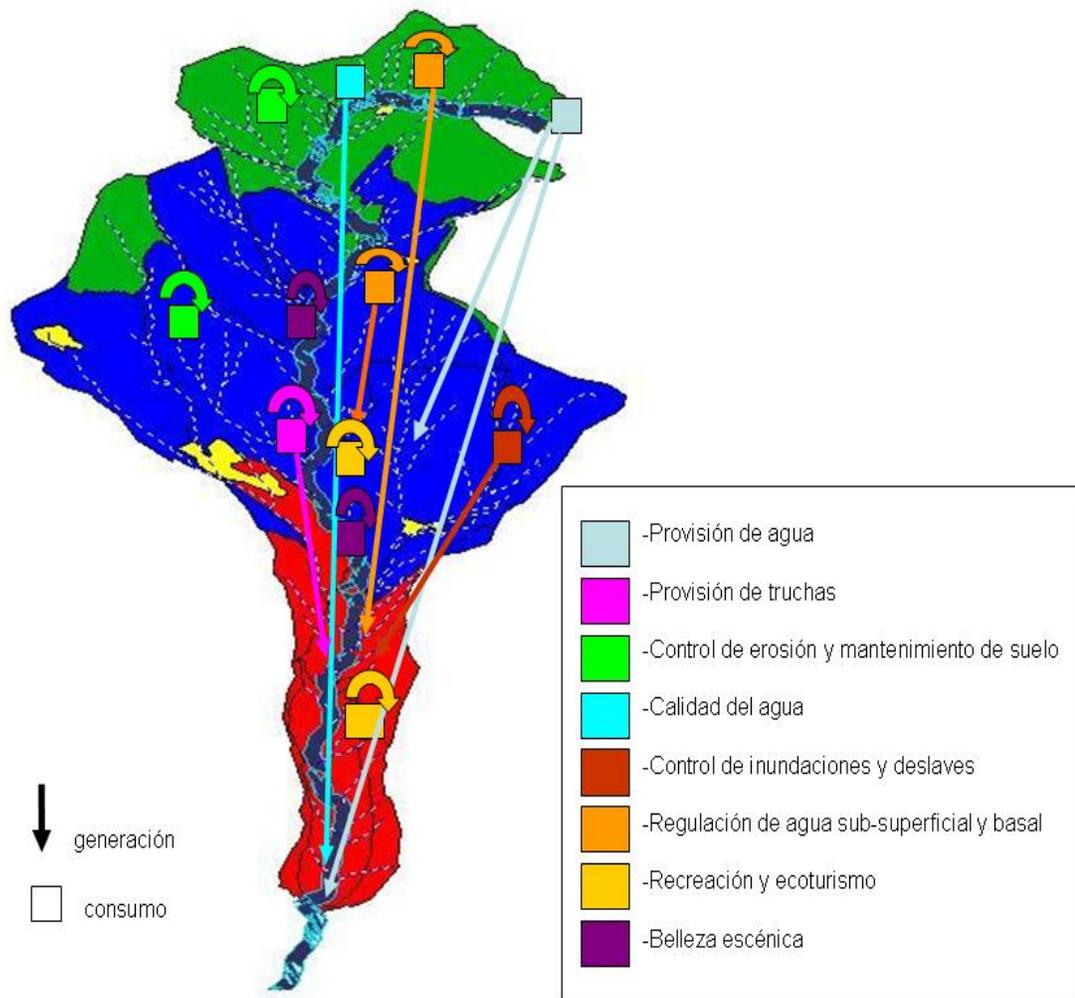


Figura 17. Mapa de servicios ecosistémicos relacionados con el agua en la cuenca del río Magdalena, D.F.

## IV.- DISCUSIÓN

### IV.1 Análisis del comportamiento del agua de la cuenca

La regionalización del área de estudio por unidades fito altitudinales fue una estrategia para tener zonificada la información, a una escala más pequeña que las unidades de paisaje. Esto fue básico para ubicar espacialmente tanto la información meteorológica e hidrológica, así como para la localización de los servicios ecosistémicos y para las propuestas de manejo específicas.

La información hidrológica analizada mediante los balances hídricos reflejó que la cuenca del río Magdalena esta produciendo cerca de 20 millones de  $m^3$  de agua al año. Según Maass *et al.* (2003) el funcionamiento de los ecosistemas resulta controlado, en gran medida, por su flujo hidrológico, ya que la disponibilidad de agua es uno de los factores más determinantes en la capacidad productiva de los ecosistemas. Esta cuenca por su tamaño tiene un flujo hidrológico considerable ( $0.63 m^3 s^{-1}$ ), el cual debe ser explotado asegurando un adecuado funcionamiento del ecosistema.

Al parecer la recarga principal se esta dando por escurrimiento sub-superficial y basal, ya que a diferencia de los suelos, la roca madre es relativamente impermeable y no deja que el agua penetre al acuífero profundo. Por lo tanto el bosque es fundamental para la recarga de la cuenca ya que el aporte se hace directamente al río. Aunque se ha visto que en bosques talados hay un incremento en la cantidad de agua, según Brooks (1997), ese aumento es momentáneo y se mantiene dependiendo del tipo de vegetación y de la resiliencia del ecosistema, pero siempre por un periodo de tiempo reducido. Por lo tanto si no hubiera vegetación habría mayor escurrimiento y esto ocasionaría remoción en masa, ya que el bosque reduce el escurrimiento superficial (Molchanov, 1952). En los suelos de textura franca, como los de la cuenca, la vegetación tiene un efecto sustancial en el escurrimiento. Si se perturba la cobertura vegetal se alteran también los índices de infiltración, de evaporación y escurrimiento.

**Variantes del modelo.**-En los datos analizados, el cauce del río Magdalena presenta tres valores diferentes: El balance hídrico muestra que el escurrimiento para toda la cuenca es de  $0.63 m^3 s^{-1}$ . El promedio de escurrimientos de la estación de aforo para el año 1999 es de  $0.44 m^3 s^{-1}$  y la delegación Magdalena Contreras (2004) dice que el río tiene un volumen de agua permanente de  $1 m^3 s^{-1}$ . Esta diferencia de valores puede deberse a varios factores:

Por un lado el balance fue realizado con promedio de datos de 30 años, los más nuevos del año 1987; mientras que los datos de la estación de aforo son únicamente del año 1999, el cual pudo

haber sido un año seco. Se infiere que el dato de la delegación Magdalena Contreras debe ser más bien un valor histórico que uno obtenido de la estación de aforo, ya que esta, sólo ha funcionado los años 97, 98, 99 y en ninguno de estos años el agua tuvo ese volumen de agua permanente. También el método de Thornthwaite tiene sus supuestos y puede tener bastantes imprecisiones que hagan que no coincida estrictamente el valor de escurrimiento: supone que toda la lluvia primero va a la evapotranspiración; que no hay infiltración profunda ni escurrimiento superficial; que la mitad del agua se queda para el mes siguiente; no toma en cuenta variaciones en la intensidad de la lluvia; supone que no hay entradas de agua además de la precipitación y que el balance anual siempre tiene que ser cero. Además este método toma en cuenta valores generales para coníferas y la cuenca no tiene el mismo tipo de vegetación en toda la zona. Si bien más de las dos terceras partes de la cuenca son coníferas, no son la misma comunidad, por lo que posiblemente el bosque no esté transpirando igual en las tres regiones y esto debería de ser tomado en cuenta. Según Cienciala *et al.* (1997), el género *Abies* transpira más que el género *Pinus*, por lo que el consumo de agua debería ser mayor en la parte media que en la alta. A pesar de todos los supuestos del modelo y a la diferencia de información entre los balances hídricos y la estación de aforo, se puede decir que los valores de  $0.63 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  contra  $0.44 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  no fueron muy distintos, ya que es sólo una diferencia de 190 litros, 31% más.

El método de Thornthwaite resultó fundamental, ya que la información meteorológica, dentro de la zona, es nula. La escala en la que se pudo trabajar fue 1:1 000 000 y para el tamaño de la cuenca resultó muy escasa la información. Aunque este método tiene muchas deficiencias y limitaciones y existen modelos hidrológicos mucho más complejos, este método permite tener una primera visión de lo que ocurre en esta cuenca.

## **IV.2 Gestión del agua en el Distrito Federal**

El Distrito Federal (DF) requiere de una aportación aproximada de  $35 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  de agua para satisfacer las necesidades de los cerca de nueve millones de personas que habitan en él. Los niveles de abasto de agua por red al DF rebasan ampliamente el promedio nacional (el 15% de la población del país carece de agua entubada) y son comparables a los existentes en países como Canadá y Estados Unidos. El DF para satisfacer sus requerimientos de agua utiliza 4.7% del total de agua que consume América Latina diariamente (PAOT, 2003). El agua suministrada al

Distrito Federal (DF), proviene de los acuíferos de los valles de México y Lerma, del río Cutzamala, de manantiales y del río Magdalena.

Aunque el río tenga un promedio de escurrimiento de  $0.63 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , esta cambia mucho entre los meses de lluvias ( $3.4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ) y estiaje ( $0.2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ). La planta potabilizadora no tiene capacidad para tratar todo el volumen de agua del río, ya que la capacidad media de potabilización es de 170 L/s y la máxima de 200 L/s, lo cual beneficia a una población media de 150 000 habitantes o máxima de 180 000 (Planta Potabilizadora Río Magdalena, segundo dinamo). Según L. Cisneros (com. pers.) se trata el caudal mínimo porque no pueden comprometerse a más debido a que en época de estiaje no se cuenta con suficiente agua. El desperdicio real de agua limpia se encuentra en los meses de lluvias, donde el volumen del cauce es tal, que supera en más de 10 veces la capacidad de la planta y en lugar de aprovechar el excedente, se va al drenaje en la presa Anzaldo. Es en estos meses donde se deberían de tomar medidas para la captación de esta agua que serviría para surtir a buena parte de la población del sur y poniente del Distrito Federal. Tomando en cuenta las necesidades del Distrito Federal, si se lograra captar el agua que se produce en temporada de lluvias, el río Magdalena estaría aportando el 10% de los requerimientos del recurso agua del Distrito Federal. Además, debido a la mala planeación de las autoridades, en lugar de aprovechar la calidad del servicio, dejan que se contamine en la parte baja y en la presa Anzaldo entra a formar parte del drenaje que posteriormente es entubado

Es fundamental que el Sistema de Agua de la Ciudad de México (SACM) dé mantenimiento a la estación hidrométrica Magdalena, la cual desde 1999 no recibe atención, lo cual no contribuye a tener un registro del cauce real del río Magdalena en la actualidad

#### **IV. 3 Servicios ecosistémicos en la CRM y sus implicaciones**

Al evaluar los servicios ecosistémicos, relacionados con el recurso agua, que brinda esta cuenca, este trabajo da las razones fundamentales de porque es importante proteger la zona. Es una contribución real y aplicada para generar conciencia e idear planes de manejo apropiados tomando como principios cada uno de los datos. Esta cuenca, provee servicios muy importantes para la comunidad y es importante alertar a los pobladores de ello. Por lo tanto este trabajo contribuye a que tanto los pobladores, como los visitantes y las autoridades se den cuenta cuáles

son los servicios más importantes que tiene esta cuenca, donde se localizan y los procesos que los controlan, ya que es una buena medida para su protección.

No todos los servicios funcionan a la misma escala temporal y espacial. Hay servicios que tardan años en crearse y solo horas en consumirse, o algunos se originan en un espacio muy pequeño y se consumen regionalmente. Hay otros servicios que se generan y consumen en un mismo lugar. También existe el problema que pasan varios años desde que el ecosistema sufre el impacto y este se vea reflejado en la pérdida de servicios ecosistémicos (Maass, 2005). Los servicios ecosistémicos que se generan en la cuenca se consumen tanto dentro como fuera del área de estudio. El servicio ecosistémico más importantes que brinda la CRM a la comunidad es la provisión de agua dulce, la cual tiene influencia en toda la cuenca y en la parte urbana de la delegación Magdalena Contreras. Lo contradictorio es que a muchos pobladores del área de influencia de la cuenca los abastece el sistema Cutzamala, esto es, la Delegación importa agua de otras cuencas cuando el propio río Magdalena tiene un caudal subutilizado.

Antes se veía a los productos del ecosistema como recursos naturales, los cuales estaban en el ambiente esperando ser utilizados por el hombre. La concepción moderna de servicio ecosistémico, ve al ecosistema como una estructura, el cual es susceptible de acabarse si el hombre hace un mal uso de él (Millenium Ecosystem Assessment, 2003).

El servicio ecosistémico debe ser visto como un beneficio intrínseco del ambiente no sólo hacia los seres humanos, sino también hacia el resto de los seres vivos. Si no se cuidan lo suficiente, se pueden deteriorar al punto que, el más perjudicado sería el hombre, ya que algunos servicios son vitales para su desarrollo económico y social. La conservación de los ecosistemas no debe hacerse por una cuestión ética solamente, sino también por un problema de seguridad nacional. Por ello, es fundamental que la población pueda darse cuenta de los beneficios que les proporcionan los ecosistemas y sus servicios, para ello se debe organizar un programa adecuado de divulgación ambiental. Ahora bien, para saber lo que se debe conservar, primero es necesario conocerlo, saber que hay, como se comporta y el estado de salud que presenta. Por ello la restauración tiene que ser la última medida para recuperar un ecosistema. Es más fácil y económico conservar y manejar racionalmente los ecosistemas, que dañarlos y posteriormente pretender restaurarlos.

#### **IV. 4 Recomendaciones y problemática de la restauración ecológica en la CRM**

El río Magdalena es prácticamente el único abastecimiento de agua superficial que tiene el DF y aporta el 4% del agua que se consume en esta gran urbe. Por ello es fundamental tomar las medidas necesarias para proteger la cuenca que alberga a dicho río. Lo primero que se debe de hacer en cualquier proyecto de restauración ecológica es integrar a la población. Esta debe ver y sentir como propio el problema ambiental, ya que es la única vía para que este tipo de programas funcionen. Según Castillo (2000), es importante que exista o se genere una fuerte conexión entre las instituciones científicas y los sectores no académicos de la sociedad.

El verdadero factor para que la información ecológica tenga la capacidad para resolver los problemas ambientales reales, es la capacidad del medio académico de considerar como mecanismo de retroalimentación, la información proporcionada por los sectores que están más ligados con el manejo de los recursos naturales (Castillo, 2000).

Es por ello que para los proyectos de restauración en la cuenca del río Magdalena, se planea involucrar a los dueños de la tierra, los comuneros, para que ellos mismos decidan y colaboren directamente con los académicos en diseñar un plan de manejo comunitario y participativo (A. Ramos, com. pers.). Sin embargo, hay que tomar en cuenta que la cuenca del río Magdalena no tiene claramente definida su normatividad, ya que la Zona Protectora Forestal “Cañada de Contreras” (nombre oficial de la CRM), no se encuentra integrada en el Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Esto quizá se deba a que el SINAP integra aquellas áreas que estén cumpliendo con los objetivos para los cuales fueron creadas y este no es el caso de la zona de estudio. Además el SINAP no tiene incorporado aun ninguna zona de Protección de los Recursos Naturales. Por lo tanto, hasta no cambiarle la categoría o hasta que la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) no mencione con claridad las funciones y las limitaciones de las “Zonas Protectoras Forestales” habrá muchas cosas que no se podrán aplicar ni llevar a cabo en la cuenca. Sin embargo, esto no debe de ser un impedimento para seguir interactuando con la comunidad y concientizándola sobre la problemática ambiental.

Además de proponer programas de manejo específico para cada zona, de acuerdo a sus características físicas, biológicas y a los servicios ambientales que presenta, es importante generar conciencia en la población el problema que sería, para todos y en especial para los pobladores del suroeste de la ciudad de México, la pérdida de los servicios que esta generando

esta cuenca. Una vez que se adquiriera la conciencia social en el sentido de que la conservación y restauración de servicios ecosistémicos nos conviene a todos, entonces se podrán aplicar programas de manejo específico para cada región.

En este estudio se propone que la unidad fito altitudinal de bosque de *Pinus hartwegii*, en la zona alta, se dedique al uso forestal. La unidad fito altitudinal de bosque de *Abies religiosa*, la zona media, se maneje exclusivamente para conservación, para retener suelo y humedad, conservar la cobertura vegetal, ya que es la zona donde se está captando más agua y con mayor peligro a la remoción en masa. La unidad fito altitudinal de bosque mixto, referida a la zona baja de la cuenca, debe conservar principalmente los servicios culturales, dedicándose a la parte turística, servicios y difusión.

Es fundamental restaurar a ambos lados del cauce desde la parte alta, donde nace el río, hasta la zona más baja, ya que según Sweeney (2002) para restablecer servicios ecosistémicos, como calidad del agua, es muy importante restaurar la vegetación riparia.

Ciertamente se deben tomar medidas de protección de estos bosques, pero también sistemas eficientes de filtración de agua, para que esta no se contamine cuenca abajo. Es increíble pensar que con la crisis hídrica que vive la Ciudad de México, dejen que aguas limpias se contaminen en lugar de ser utilizadas por los ciudadanos de las colonias vecinas.

#### **IV. 5. El caso de las cuencas de Cattskill/Delaware vs. la cuenca del río Magdalena**

Resulta interesante hacer una comparación sobre cómo la ciudad de Nueva York (NYC) ha resuelto en gran medida su problema de agua y como podría hacerlo la Ciudad de México utilizando como modelo la cuenca del río Magdalena.

La ciudad de Nueva York cuenta con una estrategia de gestión de cuencas, que brinda ayuda financiera y otros apoyos a las comunidades de las cuencas Cattskill/Delaware de las que se abastece de agua, a cambio de sus esfuerzos para mejorar la calidad del agua en dichas zonas. Este caso muestra el importante vínculo entre el bienestar de los actores rurales y la provisión de servicios ambientales a grandes centros urbanos como NYC. El impulso para este plan de gestión de cuencas lo brindó la Norma para el Tratamiento de Agua Superficial (*Surface Water Treatment Rule*). Dicha norma exige que se filtre el agua de fuentes superficiales en todos los sistemas municipales de agua, a menos que se cumplan con criterios rigurosos de salud pública y

se tenga en operación una estrategia aprobada de gestión de cuencas. Frente a los exorbitantes costos de filtración del agua, el Departamento de Protección del Medio Ambiente de la ciudad de Nueva York, intentó imponer en 1990, nuevas regulaciones de uso del suelo en las cuencas Catskill/Delaware que habrían limitado seriamente las oportunidades agrícolas y los medios de vida rurales en dichas cuencas. Después de varios años de intensas negociaciones entre numerosos actores, en 1997 surgió una nueva estrategia de gestión de cuencas que compromete a la ciudad de Nueva York a participar en un proyecto a largo plazo que permite brindar a los agricultores recursos económicos para mejorar la calidad de la oferta de agua. Este plan combina la adquisición de tierras y nuevas normas y regulaciones, con ayuda financiera a las comunidades de las cuencas, a fin de promover tanto la calidad ambiental como sus economías locales. Entre las medidas aplicadas en este programa se encuentran: 1) controlar las fosas sépticas de los habitantes de la zona para que estén en buenas condiciones y no contaminen el agua; 2) localizar las comunidades rurales más importantes en cuanto a servicios ecosistémicos y asegurarse de que tengan las condiciones necesarias en higiene para que no tiren desperdicios al agua; 3) la adquisición de terrenos boscosos por parte del gobierno, esto es, comprar a los dueños de manera voluntaria sus terrenos y así, asegurarse de que no haya fuentes de contaminación en esas zonas; 4) tratar de buscar programas de recreación como caminata, pesca, campo traviesa y actividades de bajo impacto que sean compatibles con la protección de la calidad del agua. [www.nyc.gov/html/dep/watershed/](http://www.nyc.gov/html/dep/watershed/)

Frente a contextos tan diferentes, sería erróneo y simplista pensar que al copiar un esquema de compensación exitoso en un contexto, funcionará bien en otro. Sin embargo, estas experiencias dejan lecciones que pueden ayudar a identificar temas clave a considerar cuando se piensa en esquemas de compensación capaces de beneficiar a las comunidades rurales. El estado de Nueva York se diferencia claramente de los países en desarrollo, pero, el caso es particularmente interesante porque en las cuencas Cattskill/Delaware la agricultura es uno de sus rasgos característicos y los granjeros de estas cuencas se encuentran entre los residentes más pobres del estado en cuestión. Por consiguiente, la experiencia de compensación por servicios ambientales de Nueva York puede ofrecer algunas lecciones para países como México, que enfrentan el doble desafío de proteger los recursos naturales y aliviar la pobreza rural. Por lo tanto, se debería de tratar de aplicar un programa similar para la cuenca del río Magdalena, de tal

manera que dicha zona sirviera como modelo de cooperación entre los dueños de la tierra y el estado y posteriormente hacer lo mismo en cuencas vecinas del valle de México.

El gobierno de la Ciudad de México tendría que incorporar el pago de servicios ambientales hidrológicos como medida estratégica para cuidar el agua en el valle de México. Pagarle a los comuneros dueños de los bosques de la CRM para que su función primordial sea cuidar la calidad del agua y todos los servicios ecosistémicos relacionados. Sin embargo, para que el gobierno pueda tener dinero para darle incentivos a los propietarios de la tierra, debería de imitar el modelo de la Ciudad de Nueva York, subiendo los impuestos y regulando el cobro por el uso del agua en el Distrito Federal. Claro que habría que asegurarse que la recaudación sea específicamente destinada al cuidado de la CRM y de todas las cuencas aledañas y no hubiera malversación de fondos. Seguramente, al igual que el caso de NYC, sería mucho más barato este tipo de programas que traer agua de lugares más alejados o hacer sistemas de filtración más avanzados.

## **V.-CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

- Al regionalizar la cuenca por unidades fito altitudinales fue posible ubicar tanto la información meteorológica, física, hidrológica y los servicios ecosistémicos.
- El balance hídrico resultó positivo, existe recarga en el suelo de mayo a noviembre. El escurrimiento calculado es similar a los valores registrados en la estación hidrométrica del río Magdalena.
- En la CRM escurren anualmente 20 millones de  $m^3$  de agua, lo cual equivale a un promedio de escurrimiento instantáneo de  $0.63 m^3 s^{-1}$ .
- De acuerdo con la información disponible para la zona y los datos analizados, se deduce que la CRM presenta un material parental poco permeable, el cual impide que la mayor parte del agua que escurre, penetre a capas más profundas; esto sumado a los valores de escurrimiento, reflejan que la mayor parte del agua dentro de la cuenca, no se infiltra al acuífero profundo, sino que desemboca directamente al río Magdalena.

- La cuenca tiene suelos muy permeables ( $5-30 \text{ cms}^{-1}$ ), con una conductibilidad hidráulica elevada ( $70-95 \mu\text{ms}^{-1}$ ) y susceptibles a erosionarse (0.23-0.43), por lo tanto es fundamental conservar la cobertura vegetal, para no perder suelos por remoción en masa y erosión, principalmente en la región media de la CRM.
- La relación que existe entre la vegetación y el mantenimiento de los servicios ecosistémicos de la cuenca del río Magdalena se ve reflejada en que el bosque controla la calidad del agua del río, las remociones en masa, la erosión del suelo, disminuye el escurrimiento, permite que el agua se transporte subterráneamente y llegue a la base de la cuenca con buena calidad, lo que ayuda a mantener los servicios culturales de la zona.
- La zona se debe restaurar de acuerdo a los servicios ecosistémicos que se proveen por unidad fito altitudinal:
 

En las zonas altas se deben de mantener los servicios de provisión sobre todo la generación de agua dulce.

En la zona media se debe conservar la cobertura vegetal para poder cuidar los servicios de regulación, principalmente control de remoción en masa, pérdida de suelo, regulación de agua sub-superficial.

En la zona baja, se deben restaurar y mantener los servicios culturales, estéticos y recreativos, colocar fosas sépticas para que no desechen al río y eficientizar la planta de tratamiento.

## **Recomendaciones**

- El primer paso para hacer restauración ecológica, es concientizar a la gente de porque es importante restaurar, cuales son los servicios ecosistémicos que se estarían perdiendo y los beneficios que estos podrían traerles, ya que sino difícilmente podremos despertar el interés de la población para cuidar el ambiente.
- Es vital regularizar la situación legal de la cuenca del río Magdalena, ya que es el primer paso para poder establecer un plan de manejo para la zona.

- Es fundamental que la planta potabilizadora funcione a su máxima capacidad, para que pueda filtrar más caudal.
- Sería recomendable dos estrategias de potabilización, una para época de lluvias y otra para época de secas.
- Se debe evaluar la red de distribución de agua del Distrito Federal, para que el río Magdalena surta de agua potable a los pobladores de la delegación y no se emplee para evitar azolves en la red de drenaje, antes de utilizarse por los pobladores.
- Finalmente sería muy útil profundizar en los estudios geomorfológicos, edafológicos, fisiológicos, sobre captura de carbono y biodiversidad, así como establecer proyectos aplicados sobre aspectos socioeconómicos, de educación ambiental, ganadería, agricultura, propiedad de la tierra etc., para que, junto con los estudios básicos anteriores, se pueda dar una propuesta de restauración ecológica integral para la CRM.

## REFERENCIAS

- 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, México, 127 pp.
- Ávila-Akerberg V. 2002. La vegetación en la cuenca alta del río Magdalena: un enfoque florístico, fitosociológico y estructural. Tesis de licenciatura en Biología, Facultad de Ciencias, UNAM, México, 92 pp
- Ávila-Akerberg V. 2004. Autenticidad de los bosques en la cuenca alta del río Magdalena. Diagnóstico hacia la restauración ecológica. Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias, UNAM, México.
- Bishop J. y N. Landell-Mills. 2002. Forest Enviromental Services: An Overview. En: *Selling Forest Enviromental Services: Market-based mechanisms for conservation and development*. Earthscan Publications Limited, London, 299.
- Bojorge-García M. 2002. Ecología de comunidades algales en una localidad del río la Magdalena, D.F. Tesis de licenciatura en Biología, Facultad de Ciencias, UNAM, México, 46pp.
- Bonfil, C., I. Pisanty, A. Mendoza, J. Soberón. 1997. Investigación y Restauración Ecológica. El caso del Ajusco Medio. Ciencia y Desarrollo. Vol. XXIII. (135): 15-23 pp.
- Brooks. K., P. Ffolliott, H. Gregersen, L. DeBano. 1997. Hydrology and the Management of Watersheds. Iowa State University Press, Ames, Iowa. 502 pp.
- Bruijnzeel, L. 2004. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **104**: 185–228
- Cantoral-Uriza, E., A., Carmona-Jiménez, J., González-González, J., Montejano-Zurita, G. 1998. Algas indicadoras de la calidad del agua en el río Magdalena, Delegación Magdalena Contreras, Distrito Federal, México. En: *Conserva*. Gobierno del Distrito Federal, Tomo 1: 300-332pp.
- Castillo, A. 2000. Ecological Information System: Analyzing the Communication and Utilization of Scientific Information in Mexico. *Enviromental Management*. **25** (4): 383-392.
- Cienciala, E., J. Kucera, A. Lindroth, J. Cermak, A. Grelle, S. Halldin. 1997. Canopy transpiration from a boreal forest in Sweden during a dry year. *Agriculture and Forest Meteorology* **86**: 157-167.

- Costanza, R., R. D'Arge, R.S. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R.V. O'Neill, J. Paruelo, R.G. Raskin, P. Sutton, and M. van den Belt, 1997: The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630), 253–260.
- Daily G. 1997a. *Nature's services: societal dependence on natural ecosystems*. Washington D.C. Island Press. 392 pp.
- Daily, G.C., 1997b: Introduction: What are ecosystem services? In: *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*, G.C. Daily (ed.), Island Press, Washington, DC, 1–10.
- Dunne, T. y L. Leopold. 1978. *Water in Environmental Planning*. W.H. Freeman and Company. New York. 818 pp.
- Eguiarte F, F Cruz, I Ramírez del Razo, B Apolinar, y A Vázquez, 2002. Evaluación del avance de la mancha urbana sobre el área natural protegida de la Cañada de los Dinamos. Instituto Nacional de Ecología. [www.ine.gob.mx](http://www.ine.gob.mx).
- Ezcurra, E. 1990. De las chinampas a la Megalópolis, Colección la Ciencia desde México. Fondo de Cultura Económica. México. 119 pp.
- FAO-PNUMA. 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos: Food and Agriculture Organization of the United Nations, y Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Roma. 86pp.
- Fernández-Galicia T. 1997. Programa de Manejo para la Conservación de la Zona Protectora Forestal “Cañada de Contreras” Distrito Federal. México. Tesis de Maestría en Ciencias. Facultad de Ciencias. UNAM. 130 pp.
- Gama-Castro, J. E., S. Palacios-Mayorga y M. Villegas-Soto. 1990. Evaluación de la hidroerosión en la provincia de la sierra madre del sur-sistema terrestre Tepetzingo de Morelos. *Contribuciones a la Edafología Mexicana*, Instituto de Geología, UNAM: 65-91
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen. 217 pp.
- Garza, G. 2000. Delegación La Magdalena Contreras. En: Garza, G. (coord.). *La Ciudad de México en el fin del segundo milenio*. Ed. Gobierno del Distrito Federal y El Colegio de México, México, D. F., 768 pp.
- Gobierno del Distrito Federal, Delegación Magdalena Contreras, Dirección General de Medio Ambiente y Ecología. Mapa del Área Natural Protegida Cañada de los Dinamos. Escala 1:70 000. Distrito Federal.
- Gobierno del Distrito Federal, Secretaría de Obras Públicas y Servicios: Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. 1999. Estudio para analizar la

información hidrométrica de la estación Magdalena y de la hidrológica de la cuenca del río Magdalena en la zona sur poniente del Distrito Federal. Informe Final.

- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. 1995. Estadísticas del medio ambiente natural y asentamientos humanos en el Distrito Federal.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. 2000. Base de datos de los censos. Información interna.
- INEGI. 1979. Carta Geológica, (E14A39, escala: 1: 50 000), México.
- INEGI. 1997. Mapa Topográfico digital. E14A39, escala 1:50000), México.
- INEGI. 1997. Carta Topográfica digital, (E14A39, escala 1:50 000), México.
- INEGI. 2005. Mapa digital de precipitación anual. Escala 1:1000 000, ([www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx)).
- Jiménez, H. 1996. Valoración hidrológica de la cobertura boscosa en la Cuenca del río Cali. Procuencas y Universidad del Valle, Cali.
- Jujnovsky J. 2003. Las unidades de 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, México.
- Maass, J. M. 2003. Principios generales sobre manejo de ecosistemas. En: Sánchez, O., E. Vega-Peña, E. Peters y O. Monroy-Vilchis. Conservación de Ecosistemas Templados de Montaña en México. INE, U.S Fish and Wildlife Service, Ford Foundation., México, D.F. 117-136.
- Maass, J., P. Balvanera, A. Castillo, G. C. Daily, H. A. Mooney, P. Ehrlich, M. Quesada, A. Miranda, V. J. Jaramillo, F. García-Oliva, A. Martínez-Yrizar, H. Cotler, J. López-Blanco, A. Pérez-Jiménez, A. Búrquez, C. Tinoco, G. Ceballos, L. Barraza, R. Ayala, y J. Sarukhán. 2005. Ecosystem services of tropical dry forests: insights from long-term ecological and social research on the Pacific Coast of Mexico. *Ecology and Society* **10**(1): 17.
- Mazari, M. (Comp.). 2000. Dualidad Población-Agua: Inicio del Tercer Milenio. Ed. El Colegio Nacional, México D. F. 281 pp
- Millennium Ecosystem Assessment (M.E.A). 2003. Ecosystems and human well-being, Chap 2: Ecosystem and their services, Millenium Ecosystem Assessment. 245 pp.
- Molchanov, H. 1952. The hidrological role of pine forest on sandy soils. MIR. Moscow

- Musset, A. 1992. *El Agua en el valle de México: Siglos XVI-XVIII*. Pórtico de la ciudad de México. Centro de Estudios Mexicanos y Centroamericanos. 243 pp.
- Myers. 1997. The World's Forest and their Ecosystem Services. Cap 12. *In: Daily G.* 1997. *Nature's service: societal dependence on natural ecosystems*. Washington D.C. Island Press. 392 pp.
- Nava, M. 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, México.
- Naveh Z y A Lieberman. 1984. *Landscape Ecology: Theory and Application*. 2<sup>nd</sup> Edition. New York.
- Obieta MC y Sarukhán J. 1981. Estructura y composición de la vegetación herbácea de un bosque uniespecífico de *Pinus hartwegii*. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 41:75-125.
- Ontiveros A. 1980. Análisis físico y algunos aspectos socioeconómicos de la cuenca del río Magdalena. Tesis licenciatura en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras. UNAM. México.
- Palerm Á. 1973, Obras hidráulicas prehispánicas en el sistema lacustre del Valle de México. SEP-INAH, México.
- Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del Distrito Federal PAOT [en línea] Informe del agua en México. [México]: 2003. [Consulta: 16 de enero de 2006] <<http://www.paot.org.mx/centro/paot/informe2003/temas/agua.pdf>>
- Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del Distrito Federal. Informe 2002. versión digital en CD ROM.
- Salas G. 2000. Balance hídrico en tres bosques contrastantes de la cuenca del río San Cristobal, Bogota. *Revista de la academia colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* .Vol XXIV, 91: 205 pp.
- Sanchez-Vélez, A., 1987. *Conceptos Elementales de Hidrología Forestal, agua, cuenca, vegetación*. Universidad Autónoma de Chapingo. División de Ciencias forestales.150 pp.
- Sarukhán, J. 2004. Primera evaluación del estado de salud de los ecosistemas del mundo, realizada por 700 científicos. *Revista Crónica*. 2004-11-29.
- Secretaría de la Presidencia, Dirección de Planeación. 1970. Carta de climas, (14 Q-V, escala 1:500 000), México.

- Sweeney, B.W., S.J.Czapka, y T. Yerkes. 2002. Riparian forest restoration: increasing success by reducing plant competition and herbivory. *Restoration Ecology* **10**:392-400
- Toledo V.M y M.J Ordoñez. 1998. El panorama de la biodiversidad de México: una revisión de los hábitats terrestres. En Ramamoorthy, T.O., R. Bye, A.Lot y J.Fa. (eds). *Diversidad biológica de México: orígenes y distribución*. Instituto de Biología. UNAM. México. 739-755 pp.
- USDA (United States Department of Agriculture). 1992. *Soil Survey Manual*. Agriculture Handbook 18. Soil Survey Division Staff. Washington, D.C.
- Zonneveld, I. 1995. *Land Ecology: An Introduction to Landscape ecology as a base for the land evaluation, land Management and conservation*. SPB Academic Publishing, Amsterdam. The Netherlands.

### **Cartografía utilizada**

- INEGI. 1979. Carta geológica, (E14A39, escala: 1: 50 000), México.
- INEGI. 1997. Carta Topográfica digital, (E14A39, escala 1:50 000), México.
- INEGI. 1997. Mapa topográfico digital. E14A39, escala 1:50000), México.
- INEGI. 2005. Mapa digital de precipitación anual. Escala 1:1000 000, ([www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx)).
- Secretaría de la Presidencia, Dirección de Planeación. 1970. Carta de climas, (14 Q-V, escala 1:500 000), México.

### **Paginas de Internet**

[www.magdalenacontreras.gob.mx](http://www.magdalenacontreras.gob.mx)

[www.ine.gob.mx](http://www.ine.gob.mx).

[www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx)

[www.sma.df.gob.mx](http://www.sma.df.gob.mx)

[www.nyc.gov/html/dep/watershed/](http://www.nyc.gov/html/dep/watershed/)

ANEXO 1. Características sintetizadas de las unidades de paisaje de la cuenca del río Magdalena (Jujnovsky, 2003).

Unidad	Tipo de relieve	Área (ha)	Altitud (m snm)	Pendiente (°)	Profundidad (cm)	Textura	pH	M.O	Asociación vegetal
1	pedemonte volcánico	50,63	2500-2800	0-30°	25-40	S.D	5,2-6,1	Media	<i>Quercus laurina</i> - <i>Quercus rugosa</i>
2A	valle erosivo	115,7	2500-2700	0-15°	25-40	Franco	5.2-6.1	Medio alto	<i>Quercus laurina</i> - <i>Quercus rugosa</i>
2B	valle erosivo y pie de monte	45,81	2700-2900	15-30°	25-40	Franco	5.2-6.1	Medio alto	<i>Pinus patula</i> - <i>Cupressus lusitanica</i>
3A	laderas con drenaje	76,2	2700-3300	15-más de 45°	15-40	Migajon arenoso	5.2-6.1	Alto	<i>Quercus laurina</i> - <i>Quercus rugosa</i>
3B	laderas con drenaje	72,23	2700-3300	15-más de 45°	40-50	Migajon arenoso	5.2-6.1	Muy alto	<i>Abies religiosa</i> - <i>Quercus laurina</i>
3C	laderas con drenaje	147,2	2700-3800	0-15, 45-90°	25-50	Migajon arenoso	5.2-6.1	Muy alto	<i>Acaena elongata</i> - <i>Abies religiosa</i>
4	cima y ladera superior	13,5	3100-3300	0-45°	S.D	S.D	S.D	S.D	<i>Abies religiosa</i> - <i>Quercus laurina</i>
5A	conjunto de laderas con cimas agudas	221,6	2700-3500	0-15° y 15-45°	25-50	S.D	5.2-6.1	Muy alto	<i>Acaena elongata</i> - <i>Abies religiosa</i>
5B	conjunto de laderas con cimas agudas	266,4	3000-3600	0-15° y 30 a 90°	25-50	S.D	4.1-5.1	Muy alto	<i>Senecio angulifolius</i> - <i>Abies religiosa</i>
6A	laderas con cimas agudas	37,44	2800-3000	30-45°	25-40	S.D	4.1-5.1	Alto	<i>Pinus patula</i> - <i>Cupressus lusitanica</i>
6B	laderas con cimas agudas	221,7	3000-3500	0-30°	25-40	S.D	4.1-5.1	Alto	<i>Senecio angulifolius</i> - <i>Abies religiosa</i>
7A	laderas mixtas	70,7	2900-3300	15-45°	40-50	S.D	5.2-6.1	Alto	<i>Pinus patula</i> - <i>Cupressus lusitanica</i>
7B	laderas mixtas	256,81	3000-3500	15-90°	40-50	S.D	4.6-6.1	Alto	<i>Senecio angulifolius</i> - <i>Abies religiosa</i>
8	escarpe	35,6	3000-3500	30-90°	S.D	S.D	S.D	S.D	<i>Acaena elongata</i> - <i>Abies religiosa</i>
9A	Ladera	183,2	3000-3800	0-45°	25-50	S.D	4.6-5.1	Muy alto	<i>Senecio angulifolius</i> - <i>Abies religiosa</i>
9B	Ladera	10,9	3300-3500	0-45°	25-40	S.D	4.6-5.1	Muy alto	<i>Abies religiosa</i> - <i>Senecio cinerarioides</i>
10	Ladera	7,8	3200-3300	0-15°	40-50	Franco	4.6-5.1	Muy alto	<i>Senecio angulifolius</i> - <i>Abies religiosa</i>
11	Ladera	64,48	3300-3600	15-45°	40-50	S.D	4.1-4.5	Muy alto	<i>Senecio angulifolius</i> - <i>Abies religiosa</i>
12	Ladera	46,45	3300-3550	15-30°	25-50	S.D	4.6-6.1	Muy alto	<i>Senecio angulifolius</i> - <i>Abies religiosa</i>
13	Ladera	6,88	3300-3500	15-30°	25-40	S.D	4.1-4.5	Muy alto	<i>Senecio angulifolius</i> - <i>Abies religiosa</i>
14	Ladera	96,4	3300-3600	0-30°	25-40	S.D	4.1-4.5	Muy alto	<i>Festuca toluensis</i> - <i>Pinus hartwegii</i>
15	Ladera	343,3	3300-3800	0-45°	25-40	Franco	4.1-4.5	Alto	<i>Muhlenbergia quadridentata</i> - <i>Pinus hartwegii</i>
16	cima de cerro erosivo	19,8	3500-3600	0-15°	0-25	S.D	4.1-4.5	Alto	<i>Festuca toluensis</i> - <i>Pinus hartwegii</i>
17	ladera superior	85,7	3500-3750	0-30°	5-15	S.D	4.6-5.1	Medio	<i>Festuca toluensis</i> - <i>Pinus hartwegii</i>
18	Ladera	398,	3500-3800	0-45°	25-40	Franco	4.1-5.1	Muy alto	<i>Festuca toluensis</i> - <i>Pinus hartwegii</i>
19	Plana	4.2	2900-2950	0-15°	S.D <sup>1</sup>	Franco	S.D	S.D	Pastizal
20	Plana	22	3000-3200	0-15°	S.D	Migajón arenoso	S.D	S.D	Pastizal
21	Plana	8	3300-3400	0-15°	S.D	S.D	S.D	S.D	Pastizal
22	Plana	2,04	3400-3500	0-15°	S.D	Franco	S.D	S.D	Pastizal
23	depresión volcánica	30,9	3570	0-15°	S.D	migajón limoso	S.D	S.D	Pastizal

<sup>1</sup> S.D. sin datos registrados

## ANEXO II: Entrevista

- 1.- Para que utiliza el agua del río la delegación?
- 2.-Para que utilizan el agua del río los pobladores?
- 3.-Como se encuentra la limpieza del agua del río en relación con años pasados? (10 o 20 años)
- 4.- ¿Hacia donde va el agua del río Magdalena? ¿Quién la consume?
- 5.- Que se hace en la planta de tratamiento? Porque solo se aprovecha la 5 parte del cauce?.
- 6.-¿Han ocurrido deslaves o inundaciones dentro de la zona en los últimos (10 o 20) años?
- 7.-Se utiliza la vegetación para alguna actividad?
- 8.-Existe extracción de madera en la zona? Que especie utilizan?
- 9.- Hay extracción de hongos dentro de la zona?
- 10.- Qué especies vegetales se cultivan en la zona?
- 11.-Donde y cuantos criaderos de truchas hay? Y a quien le pertenecen?
- 12.- Quien es la autoridad encargada de conservar y restaurar la zona?
- 13.-Qué beneficios económicos se obtienen del parque?
- 14.-Que actividades turísticas se realizan en la zona y cuales son las más importantes?
- 15.- De que manera afecta el turismo al parque? (positivo y negativo)
- 16.- ¿Existen proyectos de ecoturismo para el parque?
- 17.- Tiene una idea de cuantos visitantes se reciben al año?
- 18.- Cuantos habitantes viven dentro del parque?
- 19.- Existen proyectos de educación ambiental? Quien los realiza, hacia que sector están dirigidos?