

Bases técnicas para la gestión del agua con visión de largo plazo en la zona metropolitana de Guatemala

Guatemala, julio de 2013

iarna

Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente
UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR



Universidad
Rafael Landívar

Tradición Jesuita en Guatemala

Bases técnicas para la gestión del agua con visión de largo plazo en la zona metropolitana de Guatemala

Impresión y diseño:



Diagramación: Elizabeth González

Portada: Ruth Meño

Corrección textos: Jaime Bran

Este libro fue impreso en julio de 2013.

La edición consta de 1,000 ejemplares en papel bond antique 80 gramos

3a. avenida 14-62, zona 1

PBX: (502) 2245-8888

E-mail: gerenciaventas@serviprensa.com

Guatemala, Centroamérica

UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR

Autoridades institucionales

Rector

Rolando Alvarado, S.J.

Vicerrectora académica

Lucrecia Méndez de Penedo

Vicerrector de investigación y proyección

Carlos Cabarrús, S.J.

Vicerrector de integración universitaria

Eduardo Valdés, S.J.

Vicerrector administrativo

Ariel Rivera

Secretaria general

Fabiola Padilla

Director IARNA

Juventino Gálvez

Créditos de la investigación

Equipo de Universidad Rafael Landívar

Coordinación

Juventino Gálvez, *IARNA-URL*

Capítulo 1

Investigadores

Nils Saubes, *IARNA-URL*

Ottoniel Monterroso, *IARNA-URL*

Preparación del capítulo

Nils Saubes (investigador principal), *IARNA-URL*

Juventino Gálvez, *IARNA-URL*

Ottoniel Monterroso, *IARNA-URL*

Capítulo 2

Investigador principal y preparación del capítulo

Ottoniel Monterroso, *IARNA-URL*

Apoyo estadístico

Pedro Pineda, *IARNA-URL*

Administración de encuesta y base de datos

Programa de Opinión Pública de la Vicerrectoría de

Investigación y Proyección

Aneliesse Burmester Chinchilla

Aura Waleska Ruíz Castañeda

Hans Quevedo Rossell

Issya José de León Gutiérrez

Anexo 9

Investigadores y preparación del capítulo

Fernando Samayoa (investigador principal), *IARNA-URL*

Nils Saubes, *IARNA-URL*

Sistemas de Información Geográfica

Gerónimo Pérez, *IARNA-URL*

Contrapartes de TNC

Director Asociado de Relaciones Externas para el Norte de Centro América

Juan Carlos Godoy

Programa de Conservación de México y Norte de Centro América

Jorge Cardona (especialista de bosques)

IARNA-URL y TNC (Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar y *The Nature Conservancy*). (2013). *Bases técnicas para la gestión del agua con visión de largo plazo en la zona metropolitana de Guatemala*. Guatemala: Autor.

Serie para la educación y el cuidado de la vida 3.

ISBN: 978-9929-618-25-1

xiv + 124 p.

Descriptores: disponibilidad de agua, balance hidrológico, gestión integrada de recursos hídricos, Fondo para la Conservación del Agua de la Zona Metropolitana de Guatemala, zona metropolitana de Guatemala, demanda de agua, consumo de agua, recursos hídricos, agua, ciclo hidrológico, bosques.

Publicado por: Este documento ha sido publicado por el Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar (IARNA-URL) y *The Nature Conservancy*. El primer capítulo expone, con base científica, la realidad hidrológica de la zona metropolitana del país. Se constituye como un insumo, entre otros procesos, para conceptualizar, diseñar y poner en marcha el Fondo para la Conservación del Agua de la Zona Metropolitana de Guatemala y pretende motivar un replanteamiento de la visión acerca de la gestión del agua en la región y de la institucionalidad que debe hacerla operativa. El segundo capítulo proporciona una visión integral de la demanda y consumo de agua en dicha zona, y establece el valor económico que poseen los bosques por su contribución al ciclo hidrológico.

Copyright © 2013, IARNA/URL

Está autorizada la reproducción total o parcial y de cualquier otra forma de esta publicación para fines educativos o sin fines de lucro, sin ningún otro permiso especial del titular de los derechos, bajo la condición de que se indique la fuente de la que proviene. El IARNA agradecerá que se le remita un ejemplar de cualquier texto cuya fuente haya sido la presente publicación.

Disponible en: Universidad Rafael Landívar
Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (IARNA)
Campus central, Vista Hermosa III, zona 16
Edificio Q, oficina 101
Guatemala, Guatemala
Tels.: (502) 2426-2559 ó 2426-2626, extensión 2657. Fax: extensión 2649.
E mail: iarna@url.edu.gt
www.url.edu.gt/iarna - www.infoiarna.org.gt
Facebook: [/iarna.url](https://www.facebook.com/iarna.url)
Twitter: [@iarna_url](https://twitter.com/iarna_url)

Publicación gracias al apoyo de:



Reino de los Países Bajos



Tras la verdad para la armonía



Impreso en papel 100% reciclado

Contenido

Presentación	xi
Siglas y acrónimos	xiii
Abreviaturas	xiv
Capítulo I. Disponibilidad de agua en la zona metropolitana de Guatemala	1
1.1 Introducción	3
1.2 Objetivos del estudio	4
1.2.1 Generales	4
1.2.2 Específicos	4
1.3 Marco teórico	5
1.3.1 Marco referencial	5
1.3.2 Marco conceptual	6
1.4 Material y métodos	13
1.4.1 Definición del área de trabajo	13
1.4.2 Construcción del modelo	15
1.4.3 Datos de entrada	18
1.4.4 Calibración	25
1.4.5 Escenarios modelados	27
1.5 Resultados	30
1.5.1 Oferta anual total de agua en la zona metropolitana	30
1.5.2 Balance hidrológico	31
1.5.3 Estimación de la disponibilidad hídrica	37
1.5.4 Recarga	39
1.5.5 Priorización de las zonas de reforestación	42
1.6 Conclusiones y recomendaciones	44
1.6.1 Conclusiones	44
1.6.2 Recomendaciones	46
1.7 Referencias bibliográficas	47

Capítulo II. Análisis de la demanda de agua y evaluación del valor ambiental de las áreas de recarga hídrica en la zona metropolitana de Guatemala	51
2.1 Introducción	53
2.2 Consideraciones conceptuales	54
2.2.1 ¿Por qué valorar el ambiente?	54
2.2.2 Los servicios ecosistémicos	54
2.2.3 ¿Cómo valorar los servicios ecosistémicos?	56
2.2.4 El método de valoración contingente	59
2.3 Metodología	62
2.3.1 Definición del objeto de valoración	62
2.3.2 Diseño del cuestionario	63
2.3.3 Desarrollo de la encuesta	64
2.3.4 Digitación de encuestas y creación de la base de datos	67
2.3.5 Estimación de la disponibilidad a pagar	67
2.4 Resultados: La demanda de agua y el valor de los servicios ecosistémicos forestales	69
2.4.1 El consumo y la demanda de agua en la zona metropolitana	69
2.4.2 El valor de la conservación de los bosques para proveer agua en la zona metropolitana	77
2.5 Conclusiones y recomendaciones	80
2.6 Referencias bibliográficas	81
Anexos	83
Anexo 1. Abreviaturas de la ecuación del balance hidrológico	85
Anexo 2. Microcuencas vinculadas a la zona metropolitana	86
Anexo 3. Mapa de uso actual de la tierra	87
Anexo 4. Mapa de uso de la tierra con reforestación	88
Anexo 5. Introducción encuesta	89
Anexo 6. Boleta de encuesta	91
Anexo 7. Ubicación de los lugares encuestados, según municipio, colonia y estrato socioeconómico	95
Anexo 8. Estadística descriptiva de las variables analizadas en la valoración contingente	97
Anexo 9. Elementos de análisis para caracterizar el estado y estimar el consumo de las aguas subterráneas en la zona metropolitana de Guatemala	98

Índice de recuadros

Recuadro 1.	Cálculo de la evapotranspiración	10
Recuadro 2.	Definición de “zona metropolitana” en algunos países	14
Recuadro 3.	Modelo <i>Soil Water Characteristics</i>	24
Recuadro 4.	El modelo <i>Cropwat</i>	26
Recuadro 5.	Escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (SRES) y su modelación	27
Recuadro 6.	Recomendaciones metodológicas del método de valoración contingente	61

Índice de figuras

Figura 1.	Forma simple del balance hidrológico	8
Figura 2.	Elementos del balance hidrológico modelados con WEAP	8
Figura 3.	Cálculo de la evapotranspiración	11
Figura 4.	Zona metropolitana de Guatemala	16
Figura 5.	La zona metropolitana como sistema socioecológico	17
Figura 6.	Sistema de oferta hidrológica en WEAP	18
Figura 7.	Composición de la categoría “agricultura anual”	21
Figura 8.	Composición de la categoría “agricultura perenne”	21
Figura 9.	Mapa de zonas con potencial de reforestación	29
Figura 10.	Distribución mensual de la oferta total de agua en la zona metropolitana, incluyendo el área de Xayá-Pixcayá (millones de metros cúbicos)	31
Figura 11.	Balance hidrológico actual en la zona metropolitana, incluyendo el área de Xayá-Pixcayá (millones de metros cúbicos)	32
Figura 12.	Balance hidrológico de cada categoría de uso de la tierra	33
Figura 13.	Distribución mensual del balance hidrológico en la zona metropolitana, incluyendo el área de Xayá-Pixcayá (millones de metros cúbicos)	34
Figura 14.	Balance hidrológico de la zona metropolitana en 2020, incluyendo el área de Xayá-Pixcayá (millones de metros cúbicos)	35
Figura 15.	Balance hidrológico de la zona metropolitana con reforestación, incluyendo el área de Xayá-Pixcayá. Año 2020 (millones de metros cúbicos)	37
Figura 16.	Variabilidad mensual de la disponibilidad de agua para la línea base (millones de metros cúbicos)	38
Figura 17.	Recarga hídrica en la zona metropolitana	40
Figura 18.	Zonas prioritarias de reforestación	43
Figura 19.	Oferta de agua en la zona metropolitana	44
Figura 20.	Valor económico total del bosque	57
Figura 21.	Variación compensatoria y variación equivalente	60

Figura 22.	Principales usos del agua subterránea en las cuencas que conforman la zona metropolitana de Guatemala	71
Figura 23.	Principales proveedores de agua en los municipios de la zona metropolitana de Guatemala	72
Figura 24.	Nivel de abastecimiento de agua para satisfacer las necesidades del hogar	73
Figura 25.	Formas de suplir déficit en el suministro de agua, según estrato socioeconómico	74
Figura 26.	Cantidad de días al mes en los que se recibe agua en los municipios de la zona metropolitana	75
Figura 27.	Tarifas promedio mensuales de agua en los municipios de la zona metropolitana de Guatemala	76
Figura 28.	El ciclo hidrológico	102
Figura 29.	Red hidrográfica de la zona metropolitana	103
Figura 30.	Mapa geológico de la República de Guatemala	104
Figura 31.	Hidrogeología-acuíferos	105
Figura 32.	Zonas de un acuífero	105
Figura 33.	Mapa geológico superficial de la zona metropolitana	107
Figura 34.	Flujo del agua subterránea estimada en la zona metropolitana	112
Figura 35.	Número de pozos por cuenca en la zona metropolitana	116
Figura 36.	Número de pozos por municipio en la zona metropolitana	117
Figura 37.	Extracción de agua subterránea en la zona metropolitana	118
Figura 38.	Intensidad de la extracción de agua subterránea en la zona metropolitana	119
Figura 39.	Descenso de niveles de agua subterránea en siete pozos monitoreados, Acuífero Calizas del Norte (1990-2010), zona metropolitana	121

Índice de cuadros

Cuadro 1.	Datos de entrada del modelo	19
Cuadro 2.	Categorías de uso de la tierra consideradas en el modelo	20
Cuadro 3.	Valores utilizados para el cálculo de los coeficientes de cultivo, según categoría de uso de la tierra	22
Cuadro 4.	Valores de coeficientes de cultivo (K_c) retenidos para el modelo	23
Cuadro 5.	Clases y puntajes de pendiente	23
Cuadro 6.	Peso de cada elemento del balance hidrológico en los estudios existentes (porcentaje)	25
Cuadro 7.	Oferta total de agua en la zona metropolitana (millones de metros cúbicos)	30
Cuadro 8.	Balance hidrológico actual de la zona metropolitana (incluye el área de Xayá-Pixcayá)	31
Cuadro 9.	Balance hidrológico en la zona metropolitana para el 2020 (incluye el área de Xayá-Pixcayá)	35

Cuadro 10.	Balance hidrológico de la zona metropolitana con reforestación, incluyendo el área de Xayá-Pixcayá. Año 2020	36
Cuadro 11.	Oferta hidrológica anual para los diferentes escenarios (millones de metros cúbicos)	37
Cuadro 12.	Clasificación utilizada para determinar las zonas de recarga	39
Cuadro 13.	Zonas de recarga hídrica en la zona metropolitana	42
Cuadro 14.	Identificación de los principales bienes y servicios de los bosques, según objetivos sociales	55
Cuadro 15.	Total de hogares en los municipios que conforman la zona metropolitana de Guatemala	65
Cuadro 16.	Distribución de la muestra según estrato socioeconómico y municipio (número de entrevistas)	66
Cuadro 17.	Consumo total de agua por año en las cuencas que conforman la zona metropolitana de Guatemala, según extracción subterránea y agua superficial	69
Cuadro 18.	Tarifas promedio de pago por servicio de provisión de agua en los municipios que conforman la zona metropolitana de Guatemala	76
Cuadro 19.	Resultados del análisis <i>Probit</i> de dos modelos de disponibilidad a pagar por la conservación de los bosques en la zona metropolitana de Guatemala	78
Cuadro 20.	Comparación del valor de conservación y los costos de manejo de los bosques en la zona metropolitana de Guatemala	80
Cuadro 21.	Rango de profundidad de pozos y rango del nivel del agua subterránea	113
Cuadro 22.	Extracción de agua subterránea por cuencas en la zona metropolitana de Guatemala	120

Presentación

En términos prácticos, la abundancia de agua en Guatemala es relativa, pues a pesar de la alta disponibilidad total de este recurso en el país, las capacidades para su gestión son bajas o casi nulas.

En el contexto de una ciudad, este panorama es aún más crítico. Por lo tanto, el desafío de proveer agua en cantidades suficientes y calidades pertinentes para todos los tipos de demanda de la sociedad, se vuelve más complejo; y es por ello que debe asumirse con la seriedad de todo asunto que compromete directamente el bienestar humano.

Hasta hoy, existe un enfoque eminentemente extractivo de este recurso y, ante el desafío de su gestión, ha prevalecido una actitud miope, carente de visión sistémica y de sentido de largo plazo, haciendo caso omiso del sentido del bien común, pues se ha administrado bajo una lógica individualista y segmentada.

El presente trabajo expone, con base científica, la realidad hidrológica de la zona metropolitana del país. En términos inmediatos, se constituye en un insumo para conceptualizar, diseñar y poner en marcha el Fondo para la Conservación del Agua de la Zona Metropolitana de Guatemala (FONCAGUA); pero en términos más amplios y visionarios, pretende motivar un replanteamiento de la visión y las estrategias acerca de la gestión del agua en la región y de la institucionalidad que debe hacerla operativa.

Con este trabajo, nuestras instituciones, atendiendo a la naturaleza de su trabajo y sus motivaciones, han unido esfuerzos buscando contribuir activamente en el establecimiento de las bases para construir una nueva forma de gestionar nuestros bienes nacionales estratégicos.

Juventino Gálvez

Director

Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente
Universidad Rafael Landívar

Juan Carlos Godoy

Director

The Nature Conservancy-Guatemala

Siglas y acrónimos

ADICOMTEC	Asociación de Desarrollo Integral Agropecuario de las Comunidades de Teculután
CARE	<i>Cooperative for Assistance and Relief Everywhere</i>
ENSO	Oscilación del Sur El Niño (por sus siglas en inglés)
IARNA	Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar
INDE	Instituto Nacional de Electrificación
INSIVUMEH	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología
ITCZ	Zona de convergencia intertropical (por sus siglas en inglés)
IUSI	Impuesto Único Sobre Inmuebles
MAGA	Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación
NAO	Oscilación del Atlántico Norte (por sus siglas en inglés)
PESH	Pago equitativo por servicios hidrológicos
SAM	Sistema Arrecifal Mesoamericano
SWAT	<i>Soil and Water Assessment Tool</i>
URL	Universidad Rafael Landívar
WWF	<i>World Wildlife Fund</i>

Abreviaturas

°C	grados centígrados
ha	hectárea
hab	habitantes
hr	hora
kg	kilogramo
km ²	kilómetro cuadrado
l	litro
m	metro
m ³	metro cúbico
mm	milímetros
msnm	metros sobre el nivel del mar
Q	quetzal
t	tonelada

Capítulo I

Disponibilidad de agua en la zona metropolitana de Guatemala

Coordinación

Juventino Gálvez, *IARNA-URL*

Investigadores

Nils Saubes, *IARNA-URL*

Ottoniel Monterroso, *IARNA-URL*

Preparación del capítulo

Nils Saubes (investigador principal), *IARNA-URL*

Juventino Gálvez, *IARNA-URL*

Ottoniel Monterroso, *IARNA-URL*

Sistemas de Información Geográfica

Gerónimo Pérez, *IARNA-URL*

1.1 Introducción

La gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH), planteada desde la Conferencia de Río en 1992, ha sido aceptada por los gobiernos y agencias de desarrollo como el paradigma más adecuado en el tema de la gestión del agua (Müller, 2010). Tiene como principal fundamento que el agua es un recurso limitado y vulnerable, y debe ser manejado de manera concertada y participativa, ya que sus usos se encuentran interrelacionados (doméstico, industrial, agrícola y ambiental).

Uno de los instrumentos más importantes para la puesta en marcha de la GIRH es la evaluación de los recursos hídricos, principalmente en sus aspectos de oferta y demanda (GWP, 2000). Es primordial conocer de cuánta agua se dispone, es decir, cuánta agua provee el subsistema natural, para poder desarrollar actividades de planificación y políticas adecuadas para su gestión. Además, se debe contar con una idea de las tendencias a las cuales está sujeta dicha oferta hidrológica, especialmente en un contexto de cambio climático global.

Hoy en día las grandes ciudades del mundo, especialmente las de los países en vías de desarrollo, se encuentran frente a enormes retos en el campo de la gestión del agua. La migración hacia las ciudades y la expansión urbana generan una creciente demanda de este recurso para diversos usos, lo cual provoca su extracción intensiva y contaminación, debido al vertido de aguas negras (Bahri, 2012).

Por lo tanto, la puesta en marcha de la GIRH en el contexto urbano se hace todavía más urgente y difícil. El acceso a nuevas fuentes de agua (superficiales o subterráneas) es, en general, limitado, por lo que es necesario buscar soluciones más complejas que incluyan otros elementos como: manejo de la calidad del recurso, almacenamiento, fuentes alternativas (por ejemplo, aguas de lluvia), reciclaje de aguas usadas, etc. Dada la complejidad de dichas soluciones, es particularmente importante contar con análisis cuantitativos sólidos que permitan orientar la difícil tarea de planificación que espera a los gobiernos locales (Niemczynowicz, 1999).

Durante las últimas décadas, el tema del agua en la zona metropolitana de Guatemala se ha vuelto muy polémico. De hecho, su problemática es frecuentemente abordada a través de diversos medios de comunicación. Por lo tanto, se vuelve cada vez más urgente que los sectores públicos y privados, así como la sociedad civil, generen iniciativas orientadas hacia una mejor gestión, preferiblemente según los fundamentos de la GIRH. Recientemente, representantes de dichos sectores se han reunido para discutir la creación de un sistema de pago por servicios ambientales, dedicado a la protección de cuencas para mantener los servicios hidrológicos.

Con el objetivo de apoyar la creación de este instrumento económico, el presente estudio aporta algunos elementos para la estimación de la oferta hidrológica de la zona metropolitana de Guatemala. Esto se logró gracias a un ejercicio de modelación hidrológica, realizado a nivel de las microcuencas vinculadas con el abastecimiento de agua en esta zona.

En primer lugar, se presentan el contexto y las bases conceptuales necesarias para comprender este trabajo. Se describe la situación de los recursos hídricos en Guatemala y en la zona metropolitana, así como la iniciativa de creación del Fondo para la Conservación del Agua de la Zona Metropolitana de Guatemala (FONCAGUA), para después introducir las bases conceptuales del modelo hidrológico utilizado.

En la segunda parte se describe la metodología para la construcción del modelo hidrológico y los datos utilizados. También se presentan las herramientas empleadas para construir el modelo.

Posteriormente, se detallan los resultados del estudio, los cuales permiten apreciar la evolución de la oferta hidrológica en el contexto del cambio climático global, pues el modelo se construyó con los parámetros propios de la situación actual, pero también para un escenario de cambio climático al 2020, bajo ciertos criterios de gestión del uso de la tierra.

Por último, se presentan las conclusiones más relevantes del estudio, así como las recomendaciones esenciales para una gestión integrada de los recursos hídricos en la zona metropolitana de Guatemala.

1.2 Objetivos del estudio

1.2.1 Generales

- Analizar la oferta del recurso hídrico en la zona metropolitana de Guatemala.
- Apoyar el diseño de soluciones para un mejor manejo de dicho recurso.

1.2.2 Específicos

- Determinar la distribución de la oferta total de agua entre los diferentes elementos del ciclo hidrológico (es decir, estimar la disminución de la oferta total debida a los procesos biofísicos que operan en las microcuencas).
- Estimar la disponibilidad neta de agua, es decir la cantidad de agua que queda disponible para las sociedades humanas, sea de fuentes superficiales o subterráneas.
- Proveer un soporte esencial para adoptar medidas encaminadas a asegurar la disponibilidad de los recursos hídricos en el largo plazo.
- Servir de apoyo para la creación del Fondo para la Conservación del Agua de la Zona Metropolitana de Guatemala.

I.3 Marco teórico

I.3.1 Marco referencial

I.3.1.1 La problemática del agua en Guatemala

La zona metropolitana de Guatemala cuenta con una población de más de dos millones de habitantes. La expansión urbana y el crecimiento poblacional, combinados con una importante degradación ambiental en las cuencas, han resultado en una mayor presión sobre los recursos naturales de la zona y sus alrededores (Van Tuylen, 2011).

La destrucción de estos recursos implica la degradación de los servicios ecosistémicos, en términos de cantidad y calidad. Dentro de estos servicios, uno de los más importantes es la producción de agua para la zona metropolitana de Guatemala.

En esta zona la disponibilidad de agua está amenazada por: a) la demanda creciente, b) el proceso de urbanización desordenado, lo cual conlleva a la disminución de la recarga por la expansión de las áreas impermeables, y c) la degradación general de las cuencas. Por lo tanto, el déficit actual en el abastecimiento de agua es una ilustración del deterioro de los servicios ecosistémicos y de la explotación no regulada de los recursos hídricos (IARNA-URL, 2005).

El abastecimiento de agua para la zona metropolitana se basa en cinco sistemas de agua superficial vinculados con cinco cuencas hidrográficas (Coyolate, Pixcayá, Las Vacas, Plátanos y María Linda), así como en un número indeterminado de pozos mecánicos que explotan los acuíferos locales.

La distribución del agua está gestionada por la Empresa Municipal de Agua (EMPAGUA) en la ciudad de Guatemala, y por los gobiernos locales en los otros municipios de la zona metropolitana, algunos de los cuales han contratado empresas de agua como Agua de Mariscal. La mayor parte de los residenciales y compañías privadas (industrias, hoteles, centros comerciales, etc.) se abastecen de agua subterránea a través de sus propios pozos mecánicos.

Al día de hoy, no existen reglamentaciones relacionadas con la extracción de agua a nivel nacional, y menos a nivel de la zona metropolitana. La complejidad y la falta de regulación que caracterizan el sistema de extracción de agua contribuyen a la insostenibilidad del sistema de agua de esta zona en su globalidad (oferta y demanda).

I.3.1.2 La iniciativa del Fondo para la Conservación del Agua de la zona Metropolitana de Guatemala

Como respuesta a la problemática indicada en el inciso anterior, varios actores impulsaron la creación de un mecanismo de pago por servicios ambientales (PSA) dedicado a la preservación de los recursos hídricos. Este mecanismo es promovido por la organización no

gubernamental (ONG) The Nature Conservancy (TNC), y se está implementando bajo la forma de un Fondo del Agua (Goldman, Benítez, Calvache & Ramos, 2010).

Los Fondos del Agua son mecanismos eficientes y autosostenibles que permiten generar recursos para pagar la conservación de las áreas productoras de agua. En este interesante modelo, los grandes usuarios del agua están dispuestos a poner recursos para fortalecerlo, pues así aseguran cantidad y calidad de agua a futuro a un costo menor. Son mecanismos institucionales con múltiples actores, cuyo objetivo es proveer fuentes de financiamiento para la protección de los territorios clave en términos de producción de servicios ecosistémicos. El éxito de estos fondos radica en la cuantificación precisa de dichos servicios, así como en la adopción de mecanismos financieros sostenibles con un manejo transparente.

La creación de Fondos de Agua ha iniciado en varias ciudades de Latinoamérica y del Caribe. Los ejemplos más avanzados se encuentran en los países de la región andina: Ecuador (Quito, Cuenca del Río Paute), Colombia (Bogotá, Palmira, Cali) y Perú (Lima). Otros están operando en Brasil (bosque atlántico). Se tiene proyectada la creación de al menos 32 Fondos de Agua en México, Guatemala, Honduras, Costa Rica, Panamá, Venezuela, Colombia, Ecuador, Perú, Chile, Bolivia, Brasil y República Dominicana.

Con el fin de diseñar y poner en marcha el Fondo para la Conservación del Agua en la Zona Metropolitana de Guatemala, se ha conformado un grupo promotor en donde participan empresas privadas, autoridades públicas, gobiernos locales, instituciones académicas y ONG. El presente trabajo se constituye en el primero de varios estudios técnicos necesarios para el diseño de dicho fondo, el cual ha sido realizado a través de un convenio entre TNC y el Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar (IARNA-URL).

Otros estudios que se están realizando actualmente son: a) consumo de agua en la zona metropolitana, con base en el análisis de los caudales de varios sistemas de extracción (sistemas de captación superficiales y pozos); y b) valoración del agua en la zona metropolitana, usando el método de valoración contingente.

1.3.2 Marco conceptual

1.3.2.1 Noción de balance hidrológico

En el contexto del presente estudio, el balance hidrológico se define como una herramienta que permite describir el movimiento de los flujos de agua dentro del ciclo hidrológico en su expresión puramente biofísica; es decir, sin tomar en cuenta los aspectos relacionados con el manejo y la extracción del recurso por la sociedad.

El término balance “hidrológico” se diferencia del balance “hídrico”, pues el segundo generalmente consiste en un balance entre la oferta de agua determinada por el subsistema

natural y la demanda por parte de las sociedades humanas. La Figura 1 muestra el balance hidrológico de forma simple.

Habitualmente, el balance hidrológico se formula a través de una ecuación que, en su forma más básica, podría ser (Sáenz, 1995):

$$\Delta A = E = S$$

Donde:

ΔA es la variación en el almacenamiento (en el suelo o en el acuífero).

E son las entradas al sistema:

- Precipitación,
- Importaciones de agua,
- Recarga lateral (aguas subterráneas provenientes de otras cuencas).

S son las salidas del sistema:

- Evaporación,
- Transpiración,
- Escorrentía,
- Infiltración,
- Descarga (aguas subterráneas hacia otras cuencas),
- Exportación de agua.

Para el presente análisis, el cálculo del balance hidrológico se realizó a nivel de las micro-cuencas vinculadas con el abastecimiento de agua en la zona metropolitana (de manera directa o vía prácticas de importación), con el objetivo de estimar la cantidad de agua potencialmente disponible para extracción (uso doméstico, industrial, servicios, agricultura, etc.).

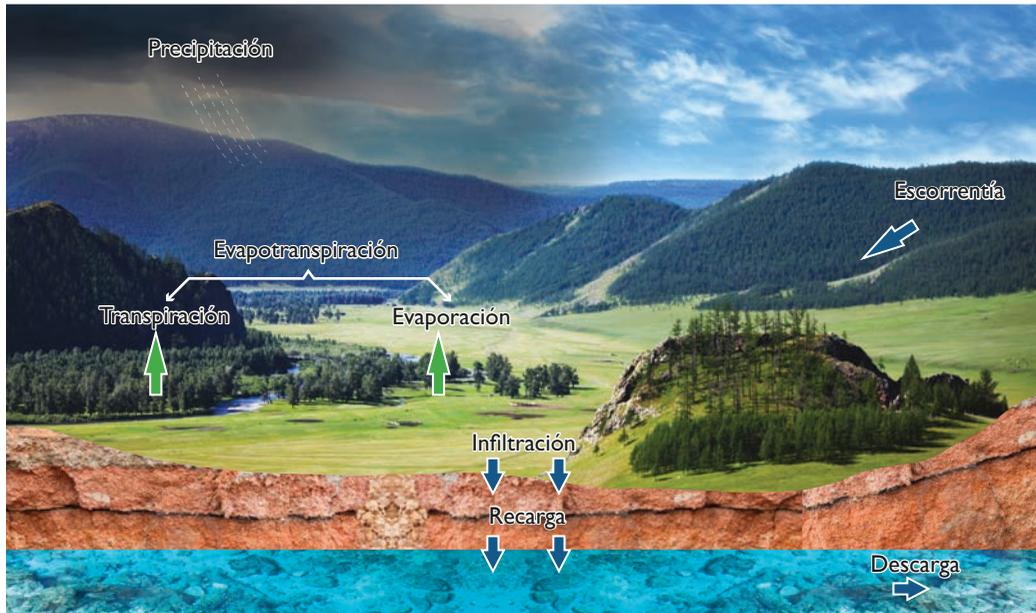
La determinación del balance hidrológico se basó en la estimación de la variación del almacenamiento de agua en el suelo (positiva o negativa), tomando en cuenta como única entrada las precipitaciones; y como salidas la evapotranspiración, la escorrentía superficial y subsuperficial, y la percolación hacia los acuíferos (recarga).

La base conceptual del modelo utilizado para calcular el balance hidrológico en la zona metropolitana se detalla en la Figura 1.

1.3.2.2 El modelo hidrológico de la plataforma WEAP

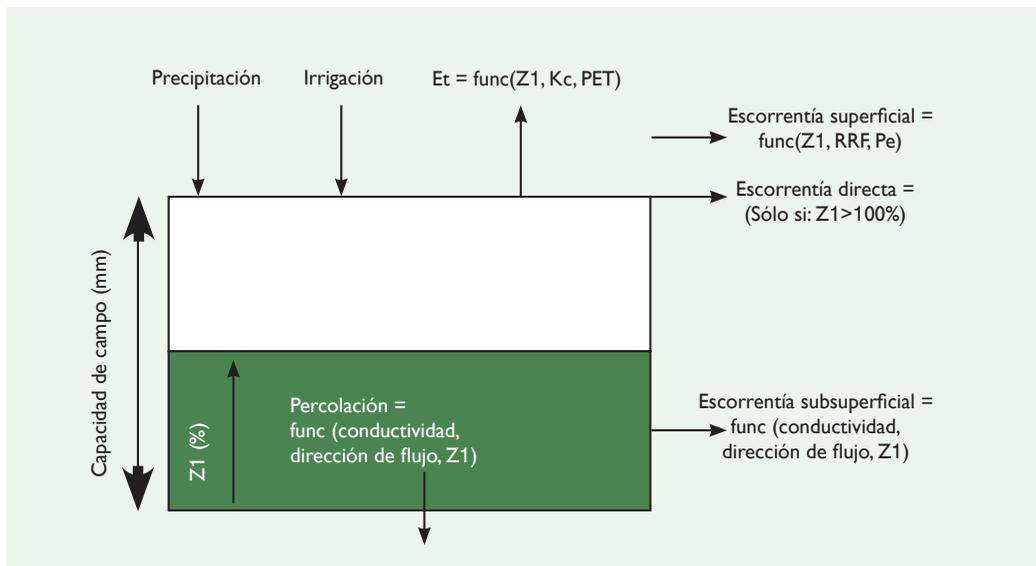
El modelo que se utilizó para determinar el balance hidrológico corresponde al módulo de hidrología *soil moisture method* de la plataforma WEAP (*Water Evaluation and Planning*), el cual se basa en la simulación de la variación del volumen de agua almacenada en el sue-

Figura 1
Forma simple del balance hidrológico



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2
Elementos del balance hidrológico modelados con WEAP



Fuente: Elaboración propia con base en Yates, Sieber, Purkey & Huber-Lee (2005).

lo. A continuación, se brinda una descripción resumida de los algoritmos del modelo, basada en Yates, Sieber, Purkey & Huber-Lee (2005). Los elementos del balance hidrológico modelados con WEAP son presentados en la Figura 2 (ver Anexo I para los significados de las variables).

El balance de masas definido por el modelo hidrológico está dado por la siguiente ecuación. Se observa cómo cada término, que corresponde a un elemento del balance hidrológico, es afectado de forma diferente por los parámetros indicados (ver Anexo I para los significados de las variables):

$$Sw_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t)k_{c,j}(t) \left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right) - P_e(t)z_{1,j}^{\frac{RRF_j}{2}} - f_j k_j z_{1,j}^2 - (1 - f_j) k_j z_{1,j}^2$$

Donde:

Primer término:	cambio de humedad en el suelo
Segundo término:	precipitación (incluye riego)
Tercer término:	evapotranspiración
Cuarto término:	escorrentía superficial
Quinto término:	flujo intermedio o escorrentía subsuperficial
Sexto término:	percolación

- Precipitación: corresponde a la cantidad total de agua precipitada durante el tiempo del estudio. Incluye el agua ingresada al sistema a través del riego.
- Evapotranspiración: el cálculo de la evapotranspiración real para una clase de uso de la tierra en particular depende de la evapotranspiración potencial, dada por la ecuación de Penman-Montieth, por el coeficiente de cultivo/planta (K_c), y por las condiciones reales de disponibilidad de agua para las plantas (Recuadro I).
- Escorrentía superficial: su cálculo depende del nivel de precipitación, de un factor de resistencia a la escorrentía (RRF , que depende del índice de área foliar y la pendiente—), y del nivel de saturación del suelo.
- Flujo intermedio o escorrentía subsuperficial: corresponde a los flujos horizontales de agua que ocurren debajo de la superficie del suelo. Dicha escorrentía contribuye finalmente a los caudales de los ríos. Su estimación depende de la cantidad de agua presente en el suelo, de la conductividad hidráulica del mismo, y de la dirección preferencial de los flujos.
- Percolación: corresponde a la lámina de agua que contribuye a la recarga de los acuíferos. Depende de la cantidad de agua presente en el suelo, de la conductividad hidráulica del mismo, y de la dirección preferencial de los flujos.

Recuadro I Cálculo de la evapotranspiración

El cálculo de la evapotranspiración dentro de los algoritmos de WEAP se basa en la metodología establecida por Allen, Pereira, Raes & Smith (1998). Según ellos, el cálculo de la evapotranspiración pasa por tres etapas:

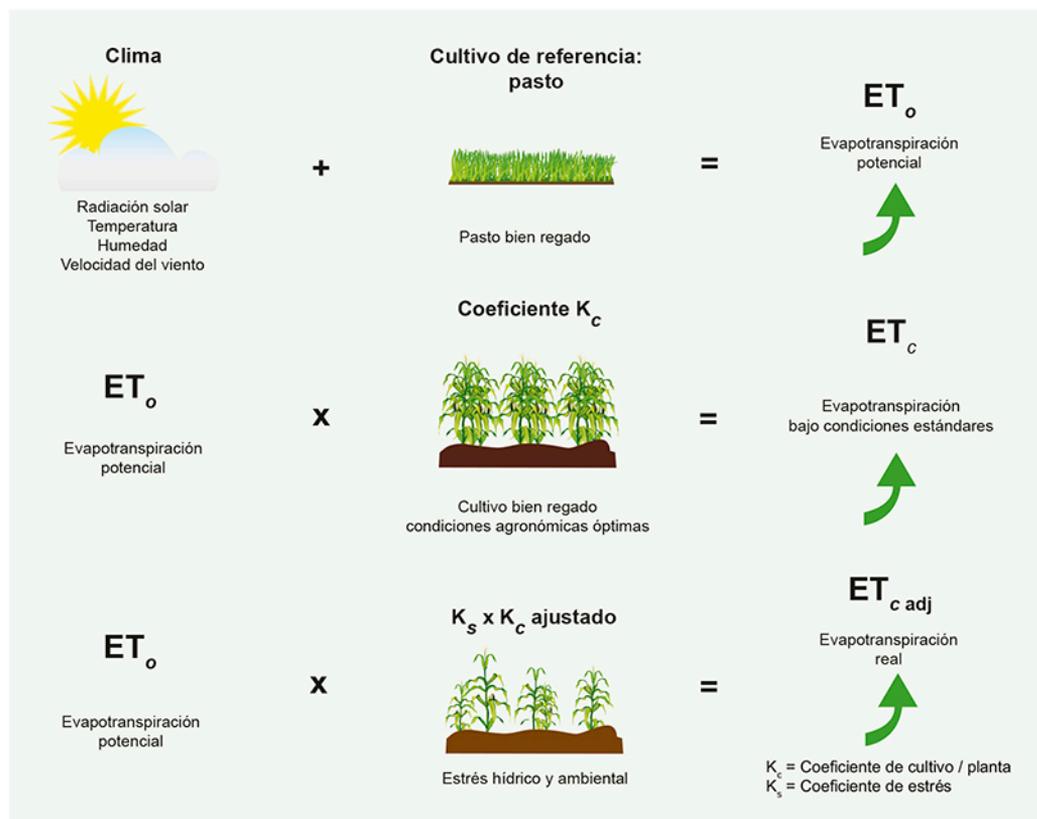
1. Cálculo de la evapotranspiración potencial o evapotranspiración de referencia (ET_o): esta etapa permite determinar el potencial de la atmósfera para hacer transpirar a un cultivo de referencia (pasto bien regado de 0.12 metros de altura). El cálculo de la ET_o se basa en los factores meteorológicos que ayudan a describir las condiciones atmosféricas: radiación solar, temperatura, humedad y velocidad del viento. Con base en estos valores, la evapotranspiración de referencia puede ser calculada gracias a la siguiente ecuación, denominada Penman-Monteith y descrita por Allen *et al.* (1998):

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)}$$

donde λET es la evapotranspiración potencial, R_n es la radiación neta, G es el flujo de calor del suelo, $(e_s - e_a)$ representa el déficit de presión del vapor del aire, ρ_a es la densidad del aire a presión constante, c_p es el calor específico del aire, Δ es la pendiente de la relación entre presión del vapor a saturación y temperatura, γ es la constante psicrométrica, y r_s y r_a son la resistencia de la superficie y la resistencia aerodinámica, respectivamente.

2. Cálculo de la evapotranspiración de los cultivos o plantas bajo condiciones estándares (ET_c): esta segunda etapa permite determinar la evapotranspiración de los cultivos o plantas en condiciones óptimas (sin enfermedades, buen riego, a nivel de producción máxima). El cálculo de ET_c se basa en la ET_o , a la cual se integran las características que distinguen a cada cultivo (relacionadas con la fisionomía vegetal principalmente: altura, albedo, resistencia del dosel, evaporación del suelo). La integración de dichos factores se hace a través del coeficiente de cultivo K_c , determinado para cada tipo de cultivo o planta. ET_c se obtiene multiplicando ET_o por K_c :
 $ET_c = ET_o K_c$
3. Cálculo de la evapotranspiración real ($ET_{c\ adj}$) (ver Figura 3): a este nivel se toman en cuenta las condiciones de estrés hídrico, las cuales tienen consecuencias obvias en los volúmenes de agua evapotranspirados. La estimación requiere del cálculo del balance hídrico del suelo, lo que permite determinar la cantidad de agua disponible en el suelo y definir un coeficiente de estrés (K_s). El cálculo de la evapotranspiración real diaria en condición de estrés hídrico tiene aplicaciones principalmente para la planificación del riego.

Figura 3
Cálculo de la evapotranspiración



Fuente: Elaboración propia, con base en Allen, Pereira, Raes & Smith (1998).

1.3.2.3 La relación entre agua y bosque

A nivel local, el ciclo hidrológico está condicionado por varios factores, principalmente relacionados con el clima, la geología y el uso de la tierra. De estos factores, el que más llama la atención en el ámbito de la gestión es el uso de la tierra, ya que es el único sobre el cual las sociedades pueden tener un impacto directo y a corto plazo.

Durante las últimas décadas, la importancia de la relación entre el uso de la tierra y el estado de los recursos hídricos ha sido subrayada por muchos actores, a nivel nacional e internacional, y el énfasis ha sido puesto sobre el rol que tiene el bosque en el ciclo hidrológico. Según la percepción pública, el bosque y la reforestación poseen muchas propiedades positivas en cuanto a sus efectos sobre la hidrología superficial.

A continuación, se presenta un resumen de la literatura científica existente sobre este tema, ya que en el contexto del estudio se examinan los posibles efectos de ciertas actividades de reforestación sobre la disponibilidad de agua. Los principales temas que se consideran relevantes para este estudio son los efectos del bosque y la reforestación sobre:

- a) La disponibilidad anual de agua superficial. La mayor parte de los estudios muestran que una reducción en la cobertura vegetal tiende a resultar en el aumento de la disponibilidad anual de agua. *A fortiori*, la reforestación tiende a causar una disminución de dicha disponibilidad (Bosch & Hewlett, 1982; Bruijnzeel, 1990). Los efectos de la deforestación y la reforestación sobre la disponibilidad de agua superficial se explican principalmente por las diferencias en los volúmenes de evapotranspiración generados según el tipo de cobertura: una cobertura vegetal alta (bosque) tenderá a consumir mucho más agua (bajo la forma de evapotranspiración) que una cobertura baja (pastos, cultivos, etc.), y esto afecta directamente el volumen anual de agua superficial disponible.
- b) La atenuación de los extremos hidrológicos (caudales pico y caudales base) relacionada con la presencia de bosque. En cuanto a la regulación de los máximos hidrológicos, muchos estudios concluyen que la presencia de cobertura boscosa permite atenuar tanto la respuesta hidrológica de las cuencas (Kaimovitz, 2001), como la de los picos hidrológicos. En efecto, la alta capacidad de infiltración de un bosque permite que se absorba la mayor parte de la escorrentía. No obstante, en cuencas mayores parece ser que los factores climáticos a grande y mediana escala dominan el efecto de la pérdida de cobertura boscosa a nivel local, ya que el incremento de la respuesta hidrológica puede ser sometido a un efecto de “dilución” relacionado con la presencia de áreas contiguas caracterizadas por una respuesta hidrológica menos intensa (Bruijnzeel, 1990, 2004).

En cuanto a la regulación de los mínimos hidrológicos, los estudios publicados afirman que la deforestación provoca la disminución de los caudales de temporada seca. Cabe mencionar que estos caudales (caudales base) son condicionados por los flujos de agua infiltrados durante la estación lluviosa, que migran lentamente hacia los acuíferos y luego alimentan a los ríos durante la temporada seca, cuando el abastecimiento por la escorrentía superficial y subsuperficial es limitado o inexistente.

La baja de los caudales base, causada por la deforestación, se explica principalmente porque la pérdida de cobertura boscosa reduce las oportunidades de infiltración durante la estación lluviosa. En efecto, la conversión de un uso forestal hacia otros tipos de usos provoca generalmente la disminución de las oportunidades de infiltración, debido a una o varias de las siguientes razones: i) exposición prolongada de los suelos a precipitaciones intensas (compactación); ii) compactación por el uso de maquinaria; iii) sobrepastoreo; iv) desaparición de la microfauna del suelo; y v) incremento de las áreas impermeables (carreteras, viviendas, entre otras) (Bruijnzeel, 2004).

Muchas veces, una baja infiltración no se compensa con flujos de agua adicionales causados por una menor evapotranspiración (menos bosque). Por lo tanto, los caudales base disminuyen. Sin embargo, si las capacidades de infiltración del suelo logran ser mantenidas después de la deforestación (por ejemplo, medidas de conservación del suelo), y a esto se le suma la disminución de la evapotranspiración causada por la

eliminación del bosque, probablemente aumentarían los caudales de temporada seca (Bruijnzeel, 1990, 2004).

Por otro lado, no se ha evidenciado que la reforestación pueda “reparar” los efectos de la deforestación sobre los caudales base. Existen estudios de caso sobre esfuerzos de reforestación que muestran que, durante la temporada seca, después de reforestar, el aumento en las oportunidades de infiltración no compensa las pérdidas de agua (Calder, 2007). Este resultado se explica principalmente por el hecho de que un bosque reforestado o plantado no tiene las mismas características que un bosque natural. En otro estudio ha sido comprobado que la disminución de la disponibilidad de agua superficial causada por la reforestación es más pronunciada en una sola temporada seca que a nivel anual, así como en los ecosistemas más secos (Farley, Jobbagy & Jackson, 2005).

- c) La erosión. En muchos estudios se evidencia una relación positiva entre la presencia de bosque y una menor erosión. Esto se debe al hecho de que el bosque ofrece una protección física al suelo ante las precipitaciones, a través del dosel, del sotobosque y del mantillo. Asimismo, la producción de sedimentos es particularmente baja para un bosque, en comparación con otros tipos de uso de la tierra. No obstante, según la calidad del bosque, el nivel de erosión y de producción de sedimentos puede variar considerablemente. En efecto, si por un lado para un bosque natural primario la producción de sedimentos es muy baja, por el otro, para una plantación mal manejada pueden ser muy altos (debido a la presencia de zanjas de drenaje, prácticas de deshierbe, etc.) (Bruijnzeel, 2004; Calder, 2007).

Al momento de evaluar las relaciones entre el bosque y el agua, es importante tomar en cuenta el hecho de que un bosque primario natural posiblemente no tendrá las mismas propiedades que un bosque secundario, o que una plantación. Igualmente, la agricultura bien manejada, o algunos sistemas agroforestales, pueden presentar propiedades similares a las de ciertos bosques.

1.4 Material y métodos

En esta parte se describirán el proceso de construcción del modelo en la plataforma WEAP, los datos requeridos, y los procedimientos y tratamientos realizados para su integración al modelo.

1.4.1 Definición del área de trabajo

Previo a la construcción del modelo, se delimitó geográficamente el área de trabajo, dado a que no se encontró ninguna definición oficial de la zona metropolitana de Guatemala. Aunque la Constitución Política de la República estipula en el artículo 231, que la ciudad capital y su área de influencia constituyen la zona metropolitana, no está especificada su extensión geográfica (Constitución Política de la República de Guatemala, 2002).

Por ello, se revisaron métodos utilizados para definir estas zonas en otros países. Por lo general, una *zona metropolitana* consiste en una unidad político-administrativa (conjunto de municipios) construida alrededor de un núcleo urbano (área urbanizada contigua) que reúne ciertos criterios de superficie, continuidad y población (Recuadro 2).

Recuadro 2 Definición de “zona metropolitana” en algunos países

- Estados Unidos: una zona metropolitana corresponde a un conjunto de “counties” que abarcan un área urbanizada que concentra al menos 50,000 habitantes, más el área colindante que presenta niveles fuertes de integración socio-económica con el núcleo urbanizado (nivel de migraciones diarias) (Census Bureau, 2012).
- Francia: el concepto de zona metropolitana (denominado “área urbana”) corresponde a un conjunto de municipios que abarca un núcleo urbano o unidad urbana que concentra un mínimo de 10,000 empleos más el territorio colindante, si al menos 40% de la población de dicho territorio trabaja en esta unidad. Una unidad urbana corresponde a una zona urbanizada sin discontinuidades mayores a 200 metros y que abarca al menos 2,000 habitantes (INSEE, 2012).
- Reino Unido: corresponde a un área de uso de la tierra urbano, con una superficie mínima de 20 hectáreas y que abarca como mínimo 1,500 habitantes. No debe presentar discontinuidades mayores a 200 metros (*Office for National Statistics*, 2012).

Fuente: Elaboración propia.

Para poder definir el núcleo urbano del departamento de Guatemala se delimitó el tejido urbano continuo, es decir, sin discontinuidades mayores a 200 metros. Esto se hizo a través de sistemas de información geográfica (SIG), con datos del mapa de uso de la tierra del 2003 (MAGA, 2006). La Figura 4 muestra las delimitaciones de la zona metropolitana.

Se logró concretar un núcleo urbano de 38,260 hectáreas que, según el Instituto Nacional de Estadística (INE), concentraba 2 millones de habitantes en 2002 (INE, 2002), por lo que se constituye en una importante fuente de demanda de agua y presenta los mayores retos en términos de abastecimiento.

Posteriormente, fue necesario precisar el aspecto institucional, ya que si uno se refiere a las definiciones antes mencionadas, una zona metropolitana corresponde a una unidad político-administrativa. Se identificó entonces, un conjunto de doce municipios espacialmente vinculados con el núcleo urbano, dentro de cuyo perímetro está concentrado poco más del 80% de su población. Esta población constituye un polo de demanda de servicios (agua, recolección de basura, transportes, etc.) de gran importancia, de tal forma que se justifica la

puesta en común de esfuerzos y medios para ofrecer servicios más eficientes y adaptados a la realidad urbana.

La contribución de la zona metropolitana (departamento de Guatemala) en el Producto Interno Bruto (PIB) nacional ha sido estimada entre el 47% y el 78% (Cardona & Urioste, 1999; PNUD, 1998).

Desde el punto de vista del sistema socio-ecológico, el núcleo urbano corresponde a los subsistemas social y económico. El subsistema natural se refiere al conjunto de microcuencas dentro de las cuales los procesos hidrológicos que operan determinan la cantidad de agua disponible para extracción, sea superficial o subterránea. Dentro del contexto de la disponibilidad del agua, la Figura 5 representa la zona metropolitana como sistema socioambiental.

En el caso de la ciudad capital, el abastecimiento de agua se realiza a través de la explotación local (microcuencas espacialmente vinculadas con el núcleo urbano) de cuatro plantas de tratamiento de aguas superficiales, más una cantidad indeterminada de pozos mecánicos que extraen agua subterránea. A eso se agrega un sistema de importación de agua superficial por gravedad, a través del acueducto (Xayá-Pixcayá) de los ríos Xayá y Pixcayá (Van Tuylen, 2011).

A través del SIG se seleccionaron entonces, por un lado, las microcuencas relacionadas espacialmente al núcleo urbano; y por el otro, las vinculadas al acueducto Xayá-Pixcayá. Al final, se identificaron 20 microcuencas, que suman una superficie de 146,115 hectáreas (Anexo 2).

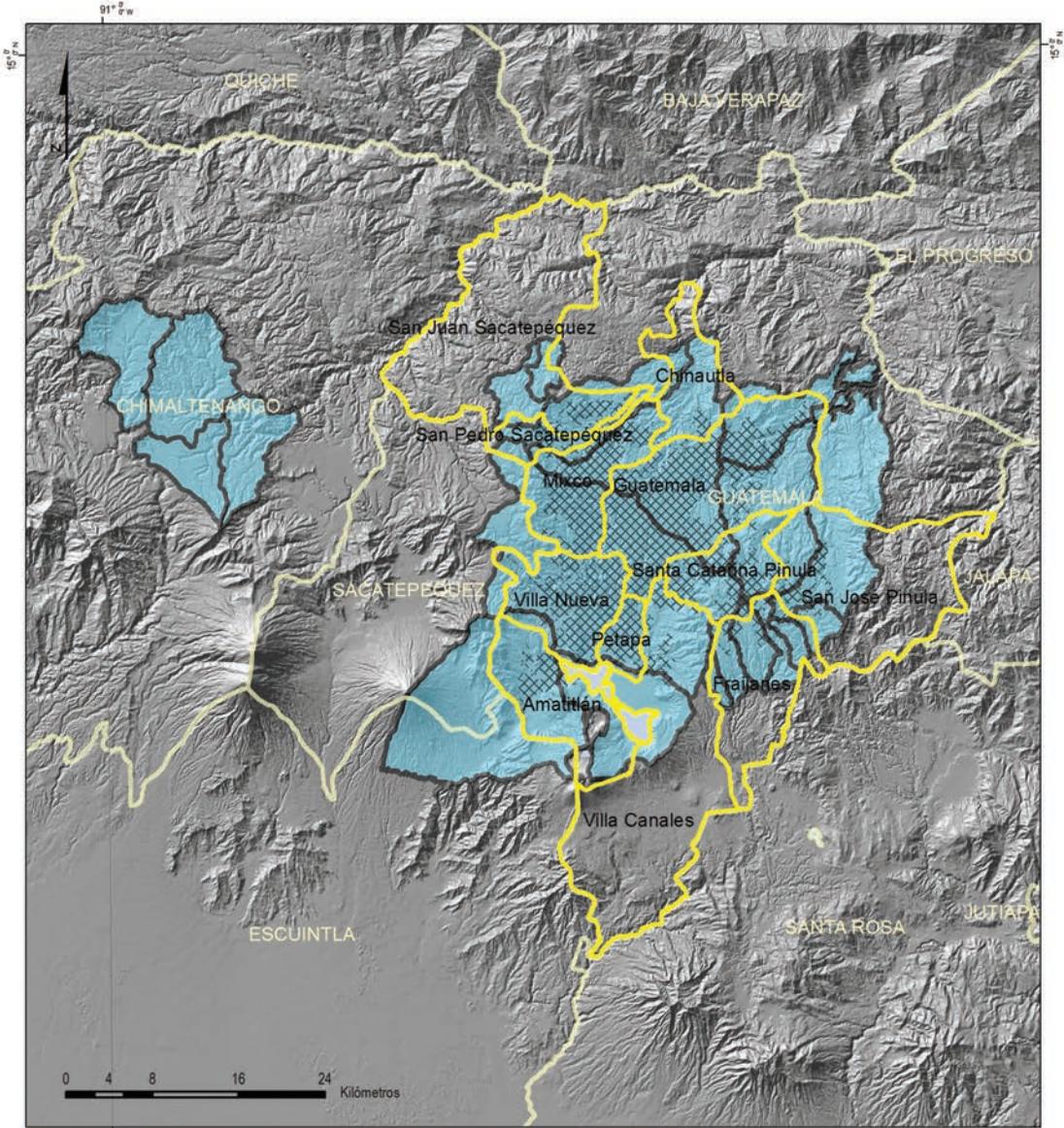
1.4.2 Construcción del modelo

1.4.2.1 La plataforma WEAP

Como ha sido mencionado anteriormente, el modelo hidrológico utilizado para estimar la disponibilidad de agua –u oferta hidrológica– para la zona metropolitana de Guatemala corresponde al módulo “hidrología” de la plataforma WEAP (*Water Evaluation and Planning*), que se presenta como un sistema de apoyo a la toma de decisiones en materia de gestión integrada de recursos hídricos (GIRH).

Yates, Sieber, Purkey & Huber-Lee (2005) describen esta plataforma como una herramienta que permite relacionar los procesos hidrológicos a nivel de cuenca con los aspectos socioeconómicos de la gestión de los recursos hídricos. Por ello, WEAP es una herramienta particularmente adaptada para abordar problemáticas de GIRH. Además, permite analizar varios tipos de escenarios (climatológicos, cambios en el uso de la tierra, diferencias en el nivel de la demanda y su estructura, etc.) en un entorno de modelación dinámica.

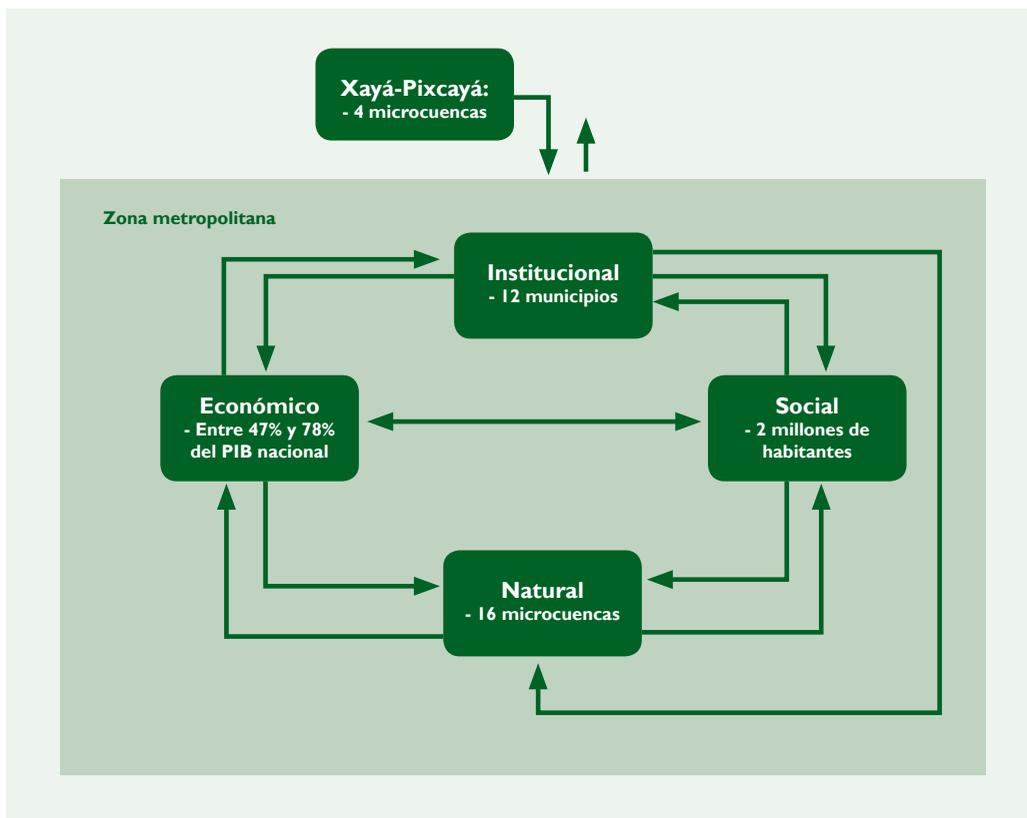
Figura 4
Zona metropolitana de Guatemala



<p>ESTIMACIÓN DE LA OFERTA HIDROLÓGICA EN LA ZONA METROPOLITANA DE GUATEMALA</p> <p>Universidad Rafael Landívar (URL) Vicerrectoría de Investigación y Proyección Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (IARNA)</p>		<p>La zona metropolitana de Guatemala</p> <p>Leyenda</p> <p> Límites municipales Límites departamentales Cuerpo de agua Límites de cuencas Núcleo urbano </p>	
<p>Proyección del mapa digital: UTM, zona 15, DATUM WGS 84. Proyección del mapa impreso: Coordenadas geográficas, Esferoide de Clarke 1866.</p>	<p>Fuente: Elaboración propia MAGA, 2004 MAGA, 2006</p> <p>Elaborado por: Laboratorio SIG IARNA Guatemala, 2012</p>		

Fuente: Elaboración propia.

Figura 5
La zona metropolitana como sistema socioecológico



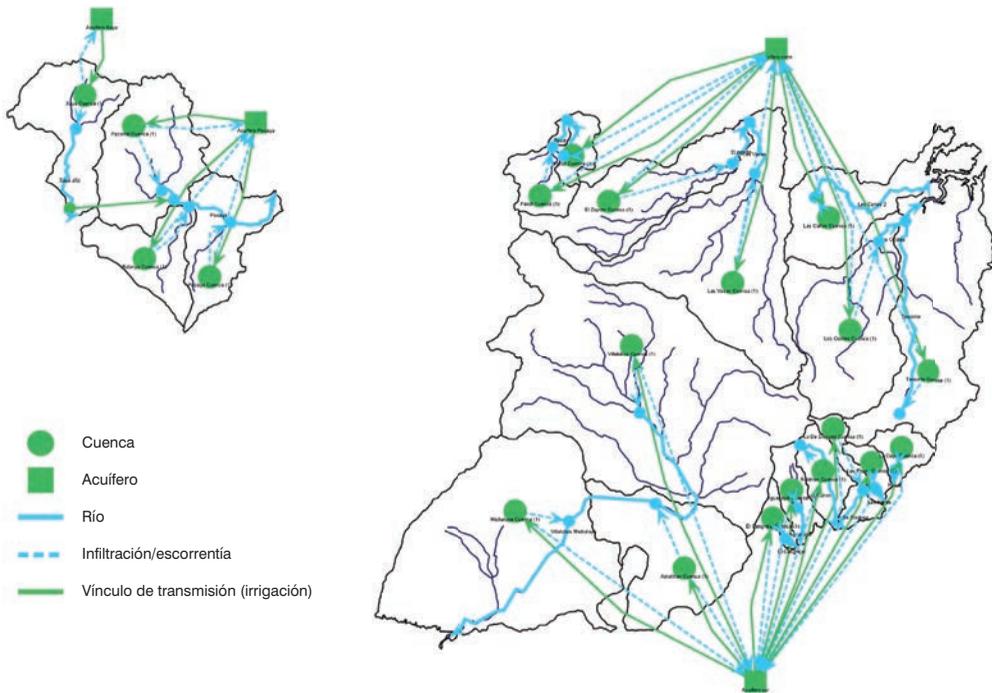
Fuente: Elaboración propia.

1.4.2.2 Modelación del sistema de oferta hidrológica para la zona metropolitana

El sistema de oferta hidrológica en WEAP se representa a través de un esquema simplificado. Bajo esta lógica, el primer paso consiste en definir las fuentes de agua superficiales (ríos) y subterráneas (acuíferos). En una segunda etapa, se materializan las microcuencas, que es donde ocurren los procesos hidrológicos que rigen las contribuciones hacia los ríos y acuíferos, lo que permite deducir la oferta hidrológica.

Para evaluar la oferta hidrológica de la zona metropolitana, se modelaron los procesos hidrológicos a nivel de las veinte microcuencas identificadas, que contribuyen a los caudales de dieciséis ríos —definidos gracias al mapa de la red hidrográfica nacional—, y a un acuífero por cada cuenca mayor (Xayá, Pixcayá, norte del valle de Guatemala y sur del valle de Guatemala). El sistema de oferta hidrológica, tal como fue modelado con WEAP, está representado en la Figura 6.

Figura 6
Sistema de oferta hidrológica en WEAP



Fuente: Elaboración propia.

El modelo hidrológico fue aplicado a cada una de las veinte microcuencas identificadas, que fueron divididas para que se pudiera tomar en cuenta el efecto de cada tipo de suelo y categoría de uso de la tierra sobre la escorrentía y la recarga de los acuíferos.

Por lo tanto, cada subcuenca fue dividida primero por series de suelo, y después por categorías de uso de la tierra. Se registraron datos en cada nivel (subcuenca, serie de suelo, categoría de uso de la tierra).

Esto permitió dividir la zona de estudio en 501 áreas, constituyéndose cada una en una unidad espacial con características únicas (con una categoría de uso de la tierra en particular dentro de una serie de suelo en particular y dentro de una subcuenca en particular). Cada unidad espacial corresponde a la unidad más básica modelada.

1.4.3 Datos de entrada

A continuación, se describen los datos utilizados en el modelo, así como los procedimientos realizados previamente a su integración. En el Cuadro 1 se presentan los datos requeridos por el modelo, así como el nivel al cual se registró cada uno.

Cuadro I
Datos de entrada del modelo

Dato	Nivel de entrada	Fuente
Precipitación	Subcuenca	Base de datos <i>Worldclim</i> (Hijmans, Cameron, Parra, Jones & Jarvis, 2005).
Temperatura	Subcuenca	Base de datos <i>Worldclim</i> (Hijmans, Cameron, Parra, Jones & Jarvis, 2005).
Velocidad del viento	Subcuenca	Estaciones meteorológicas del Insivumeh.
Humedad	Subcuenca	Estaciones meteorológicas del Insivumeh.
Latitud	Subcuenca	Sistema de Información Geográfica del IARNA-URL.
Conductividad hidráulica	Serie de suelo	Mapa de series de suelos de Simmons (Simmons, Tarano & Pinto, 1959).
Capacidad de campo	Serie de suelo	Mapa de series de suelos de Simmons (Simmons, Tarano & Pinto, 1959).
Categorías de uso de la tierra	Categoría de uso de la tierra	Mapa de uso de la tierra del 2003 (MAGA, 2006).
Coefficiente de cultivo	Categoría de uso de la tierra	Allen, Pereira, Raes & Smith (1998), Snyder, Orang, Bali & Eching (2000).
Factor de resistencia a la escorrentía	Categoría de uso de la tierra	Scurlock, Asner & Gower (2001).

Fuente: Elaboración propia.

1.4.3.1 Datos climáticos

A continuación, se describen los datos climáticos utilizados en el modelo:

- Precipitación promedio mensual: los valores mensuales de precipitación se obtuvieron de la base de datos *WorldClim* (Hijmans, Cameron, Parra, Jones & Jarvis, 2005). A través del uso del SIG se extrajeron los datos mensuales del área de estudio a partir de las capas *raster*. Luego, se calculó el valor promedio de la precipitación mensual de cada subcuenca. Este fue el valor utilizado en el modelo.
- Temperatura promedio mensual: se empleó el mismo procedimiento utilizado para los valores de precipitación.
- Velocidad del viento: los valores mensuales promedio de velocidad del viento se obtuvieron de las estaciones de medición del Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (Insivumeh). Dichas estaciones se encuentran georreferenciadas, con lo cual se lograron definir los polígonos de Thiessen. Se atribuyó un valor a cada subcuenca, según su ubicación dentro de estos polígonos.

- Humedad: el procedimiento para obtener los valores mensuales promedio de humedad fue el mismo que se utilizó para los valores de velocidad del viento.
- Latitud: a través del SIG se calculó la latitud exacta del centro geométrico de cada subcuenca.

1.4.3.2 Datos de uso de la tierra

A continuación, se describen los datos de uso de la tierra utilizados en el modelo:

- Categorías de uso de la tierra: la superficie de las categorías presentes en las microcuencas y series de suelo estudiadas, fue obtenida a partir del mapa de uso de la tierra del año 2003 (MAGA, 2006). Las categorías de la zona metropolitana se definieron a partir de la leyenda de dicho mapa, con algunas modificaciones.

El Cuadro 2 recapitula las categorías tomadas en cuenta en el modelo hidrológico. Las categorías “área urbana” y “zona árida y minera” fueron combinadas, pues no poseen cobertura vegetal. La categoría “agricultura anual” fue dividida, pues al analizar su composición a un nivel más fino, se pudo observar que cerca del 90% corresponde a la subcategoría “hortaliza-ornamental” (33%) y “granos básicos” (56%) (Figura 7).

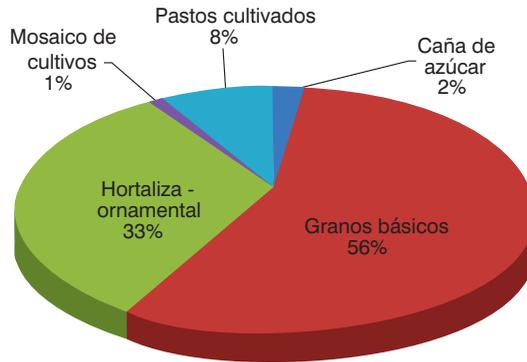
De igual manera, al analizar la categoría “agricultura perenne”, se observó que más del 90% está representada por la subcategoría “café” (Figura 8).

Cuadro 2
Categorías de uso de la tierra consideradas en el modelo

Categorías de uso del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA)	Modificaciones
Agua	Agua
Área urbana Zona árida y minera	Área urbana y suelos desnudos
Pastos naturales y arbustos	Pastos naturales y arbustos
Bosque latifoliado	Bosque latifoliado
Bosque conífero	Bosque conífero
Bosque mixto	Bosque mixto
Agricultura anual	Granos básicos Hortaliza-ornamental
Agricultura perenne	Café

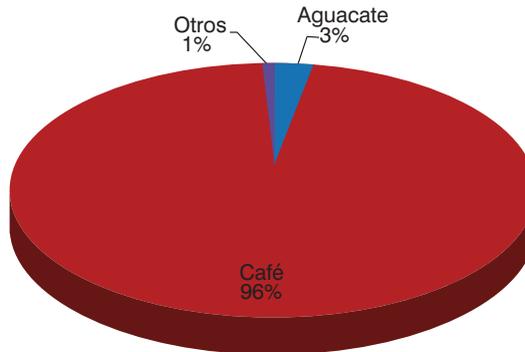
Fuente: Elaboración propia.

Figura 7
Composición de la categoría “agricultura anual”



Fuente: Elaboración propia.

Figura 8
Composición de la categoría “agricultura perenne”



Fuente: Elaboración propia.

- Coeficientes de cultivo: los valores de cada categoría de uso de la tierra se determinaron con base en el estudio de Allen, Pereira, Raes & Smith (1998) y la herramienta BISM (*Basic Irrigation Scheduling*) desarrollada por Snyder, Orang, Bali & Eching (2000). Los valores utilizados se muestran en el Cuadro 3.

Cuadro 3
Valores utilizados para el cálculo de los coeficientes de cultivo,
según categoría de uso de la tierra

Categoría de uso de la tierra	Valor utilizado
Agua Bosque conífero Café	Valores definidos por Pereira, Raes & Smith (1998).
Pastos naturales y arbustos	Valor para pastos definido por Snyder, Orang, Bali & Eching (2000).
Bosque latifoliado	Valor dado por Snyder, Orang, Bali & Eching (2000) para una vegetación siempreverde.
Bosque mixto	Promedio de los valores de las categorías de bosque latifoliado y conífero.
Área urbana	Valor definido por Snyder, Orang, Bali & Eching (2010) para un suelo desnudo.

Fuente: Elaboración propia.

Para poder calcular el coeficiente de cultivo mensual de las categorías de uso agrícola, primero se seleccionó el cultivo más representativo de las categorías “granos básicos” y “hortalizas”, para lo cual se revisó el Censo Agropecuario (INE y MAGA, 2004) de los departamentos de Guatemala y Chimaltenango. Asimismo, se analizaron las fechas de siembra de estos cultivos.

En el caso de los “granos básicos” se seleccionó el maíz, pues este cultivo representa más del 60% de la superficie de esta categoría en los dos departamentos. Para la categoría “hortalizas” se seleccionó al brócoli, ya que corresponde al cultivo más representado también en ambos departamentos (17%).

Las fechas de siembra se determinaron con base en el estudio de la FAO (2006), usando los datos definidos para la zona agroecológica 4 de Guatemala. En el caso del maíz, se utilizó el primero de abril como fecha de siembra, asumiendo una sola siembra por año. Para el brócoli se emplearon como fechas de siembra el primero de enero y el primero de julio, ya que se asumió había dos cosechas por año.

El Cuadro 4 muestra los valores obtenidos para el modelo.

Cuadro 4
Valores de coeficientes de cultivo (K_c) retenidos para el modelo

Categorías de uso de la tierra	Cultivo/vegetación representativa	K_{c1}	K_{c2}	K_{c3}	K_{c4}	K_{c5}	K_{c6}	K_{c7}	K_{c8}	K_{c9}	K_{c10}	K_{c11}	K_{c12}
Granos básicos	Maíz	0.24	0.23	0.22	0.21	0.34	1.4	1.4	0.61	0.24	0.25	0.26	0.26
Hortalizas	Brócoli	0.3	0.3	0.51	0.86	0.99	0.94	0.3	0.3	0.51	0.86	0.99	0.94
Café	Café	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Bosque latifoliado	Bosque latifoliado	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
Bosque conífero	Bosque conífero	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Bosque mixto	Bosque mixto	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
Agua	Agua	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
Área urbana	Suelo desnudo	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
Arbustos/pastos	Pastos	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95

Fuente: Elaboración propia.

- Factor de resistencia a la escorrentía: en WEAP, dicho factor corresponde a un índice que toma en cuenta factores de pendiente y de índice de área foliar. Se extiende entre 0.1 y 10 (los valores más altos significan más resistencia a la escorrentía). El presente estudio se construyó con base en los valores de índice de área foliar determinados por Scurlock, Asner & Gower (2001), y a los valores de pendiente derivados del modelo numérico de terreno (MNT), utilizando SIG. Se calcularon las pendientes promedio para cada una de las áreas fraccionales, y se determinaron tres clases, a las cuales se atribuyó un puntaje entre uno y diez (Cuadro 5). Luego se calculó el promedio entre el índice de área foliar y el puntaje de pendiente a nivel de cada área fraccional, dándole una ponderación doble al índice de área foliar.

Cuadro 5
Clases y puntajes de pendiente

Clases	$X < 10\%$	$10\% < X < 30\%$	$X > 30\%$
Puntaje	10	5	1

Fuente: Elaboración propia.

- Irrigación: para la categoría de uso “hortalizas” se tomaron en cuenta los flujos de entrada de agua de riego. En el modelo, el riego ocurre cuando la lámina de agua llega a un nivel crítico para la sobrevivencia de la planta (abajo del 30% de la capacidad de campo), llevando el nivel de la lámina hasta el 65% de la capacidad de campo.

1.4.3.3 Características del agua en el suelo

A continuación, se describen las características del agua del suelo utilizadas en el modelo:

- Capacidad de campo: este valor fue calculado para cada serie de suelos con base en sus clases texturales, según Simmons, Tarano y Pinto (1959). Los valores en porcentaje de volumen de suelo se calcularon gracias a las ecuaciones de Saxton & Rawls (2006), reunidas y automatizadas en el modelo *Soil Water Characteristics*. Seguidamente, se multiplicó el valor obtenido por los datos de profundidad dados por Simmons, Tarano y Pinto (1959), para obtener el contenido de agua a capacidad de campo, en milímetros. Con el fin de evaluar el efecto del tipo de cobertura, se aplicó un factor de compactación para las categorías de uso agrícola (granos básicos y hortalizas), y un factor de descompresión para las categorías de uso forestal (bosques de coníferas, latifoliadas y mixtos).
- Conductividad hidráulica saturada: para cada serie de suelo, este valor (en distancia/tiempo) también se obtuvo de la descripción de textura dada por Simmons, Tarano y Pinto (1959). Luego, se utilizó el modelo *Soil Water Characteristics* para calcular el valor de conductividad hidráulica. En el caso de la categoría de uso “áreas urbanas”, se usó el valor de conductividad hidráulica para un suelo urbanizado dado por el modelo *Soil Water Characteristics* (Saxton & Rawls, 2006) (Recuadro 3).

Recuadro 3 Modelo *Soil Water Characteristics*

Soil Water Characteristics es un modelo que permite determinar las características del agua en el suelo, como la conductividad hidráulica y la capacidad de campo, con base en variables simples, siendo la principal la textura.

En efecto, se ha logrado establecer una correlación estadística entre la textura del suelo y variables como la conductividad hidráulica y la capacidad de campo, lo que permite obtener estimaciones de calidad suficiente para diferentes tipos de análisis, sin pasar por un extenso y costoso trabajo de campo y/o de laboratorio. El modelo agrupa las ecuaciones determinadas por Saxton y Rawls (2006), y ha sido integrado a un interface gráfico.

Este modelo también ofrece soluciones prácticas para estimar las características del agua en el suelo, con aplicaciones en análisis hidrológicos o en la gestión del agua para la agricultura.

1.4.4 Calibración

1.4.4.1 Estudios existentes en la zona

Se encontraron dos estudios que presentan estimaciones de balances hidrológicos en la zona metropolitana de Guatemala (Cuadro 6).

El primero, consiste en un análisis hidrogeológico detallado de la zona del valle de Guatemala (microcuencas de Villalobos y de Las Vacas) (Insivumeh, IGN y ONU, 1978). En dicho estudio se presentan balances hidrológicos para cada subcuenca. No obstante, la mayor parte de los elementos de los balances fueron determinados por medio de procedimientos puramente empíricos, lo que reduce la fiabilidad de los resultados.

El segundo corresponde a una tesis de ingeniería en recursos naturales de la Universidad San Carlos de Guatemala (Manzo, 2008), la cual describe los balances hidrológicos para la subcuenca del río Pinula, ubicada dentro de la zona metropolitana. El estudio se basa en pruebas de campo para estimar la infiltración y la escorrentía. La evapotranspiración fue determinada a través de la metodología de *Hargreaves*.

1.4.4.2 El modelo *Cropwat*

Según Droubi *et al.* (2008), el parámetro que más influye los resultados del balance hidrológico en WEAP —es decir el más sensible— es la conductividad hidráulica saturada. Los autores indican que los valores de este parámetro no corresponden exactamente a los valores de conductividad hidráulica saturada, tales como están definidos en el ámbito de las ciencias del suelo. Es decir, el valor está utilizado de manera específica por WEAP, por lo que la conductividad hidráulica saturada según este modelo tiene que ser más baja que la determinada por las ciencias del suelo (Droubi *et al.*, 2008). Por lo tanto, este parámetro necesita pasar por una etapa de calibración.

Dada la poca disponibilidad de estudios y pruebas de campo en la zona, se propuso usar el modelo *Cropwat* (Recuadro 4) para obtener valores de evapotranspiración. De este modo, se pudo calibrar el parámetro de conductividad hidráulica saturada en WEAP con el objetivo de acercarse a los valores de evapotranspiración obtenidos con *Cropwat*.

Cuadro 6
Peso de cada elemento del balance hidrológico
en los estudios existentes (porcentaje)

Estudio	Cuencas	Escorrentía	Evapotranspiración	Infiltración
Insivumeh, IGN y ONU (1978)	Villalobos y Las Vacas	15.5	67.3	17.2
Manzo (2008)	Subcuenca río Pinula	25	60	15

Fuente: Elaboración propia.

Se calcularon los valores de evapotranspiración real para 256 de las 501 áreas fraccionales modeladas en WEAP. No se pudieron estimar valores para las áreas urbanas, ya que los procesos de evaporación ocurren de manera diferente y no se pueden modelar con *Cropwat*. Algunas series de suelos tampoco pudieron ser modeladas, dado que sus valores de conductividad hidráulica (determinadas por el modelo *Soil Water Characteristics*) se encontraban fuera del rango de *Cropwat*.

Se observó que, dividiendo los valores de conductividad hidráulica originalmente definidos en WEAP entre 100, los valores de evapotranspiración real se acercaban a aquellos obtenidos con *Cropwat*. Por lo tanto, se aplicó el factor de división entre 100 al parámetro de conductividad hidráulica saturada, inicialmente definido con el modelo *Soil Water Characteristics*, para cada una de las 501 áreas fraccionales.

A continuación, se compararon los valores de evapotranspiración real obtenidos para las 256 áreas fraccionales en WEAP y *Cropwat*. El promedio del valor absoluto de las tasas de variación estimadas para cada una resultó ser de 7.3%. Además, se calculó la desviación estándar a este promedio, la cual resultó ser de 11.5%. Por lo tanto, los resultados obtenidos con WEAP se consideraron como aceptables.

Recuadro 4 El modelo *Cropwat*

Cropwat es un modelo computarizado desarrollado por la FAO, que permite evaluar la evapotranspiración potencial y real de los cultivos, así como los requerimientos de irrigación. Los elementos modelados por *Cropwat* se basan en los documentos de trabajo No.33 (Doorenbos, Kassam & Bentvelsen, 1979) y 56 (Allen, Pereira, Raes & Smith, 1998) de la FAO.

Con base en información sobre el clima, los suelos y los cultivos o vegetación, *Cropwat* calcula el balance diario de humedad en el suelo, permitiendo evaluar el consumo real de los cultivos ($ET_{c\ adj}$), y estimar los requerimientos de irrigación (ver Recuadro 2).

Por lo tanto, este modelo constituye una herramienta de apoyo en la toma de decisiones para la planificación y la gestión de la irrigación. De hecho, permite planificar calendarios de riego bajo varias condiciones climáticas y de producción.

Fuente: Elaboración propia.

1.4.5 Escenarios modelados

El balance y la oferta hidrológica se estimaron tanto para la situación actual (línea base) –es decir con los datos climáticos y de uso de la tierra actuales–, como para dos escenarios a futuro:

- El primero, corresponde a un escenario de cambio climático sin respuesta por parte de la sociedad en términos de reforestación (escenario tendencial). Para ello, se usaron las proyecciones de precipitación y temperatura al 2020 obtenidas del modelo HCCPR-HADCM3 para el escenario A2 del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) (Recuadro 5). Se emplearon los datos de uso actual de la tierra (Anexo 3).
- El segundo, es un escenario de cambio climático acompañado de una respuesta por parte de la sociedad en términos de reforestación (escenario deseable). Se usaron las mismas proyecciones de precipitación y temperatura que para el escenario anterior. No obstante, en este caso se modificó la distribución del uso de la tierra de manera que se materializara un esfuerzo de reforestación máxima (Anexo 4). Para este escenario se consideró una superficie adicional de 37,400 hectáreas en la categoría de uso “bosque mixto” (Figura 9), de las cuales 25,797 hectáreas corresponden al manejo de la totalidad de las superficies clasificadas como “pastos naturales y arbustos” en el mapa de uso de la tierra actual, asumiendo que su regeneración podría llevar a una cobertura boscosa; y las restantes 11,603 hectáreas provienen de la conversión a bosque de superficies agrícolas clasificadas como sobreutilizadas según el mapa de capacidad de uso de la tierra (INAB, 2002).

Recuadro 5

Escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (SRES) y su modelación

Las emisiones futuras de gases de efecto invernadero (GEI) son el producto de complejos sistemas dinámicos movidos por fuerzas determinantes como el crecimiento demográfico, el desarrollo socioeconómico, el cambio tecnológico, entre otros. Los escenarios son imágenes alternativas futuras, y constituyen un instrumento apropiado para analizar de qué manera influirán esas fuerzas en las emisiones, así como para evaluar el margen de incertidumbre de dicho análisis. A continuación, se describe cada familia de escenarios:

- Línea evolutiva y familia de escenarios A1: describe un mundo futuro con un rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y luego disminuye, y una breve introducción de nuevas y más eficientes tecnologías. Sus características distintivas son la convergencia entre regiones, la creación de capacidad y el aumento de las interacciones culturales y sociales, acompañadas de una notable reducción de las diferencias regionales, en cuanto a ingresos por habitante. La familia de escenarios A1 se desarrolla en tres grupos que describen direcciones alternativas del cambio tecnológico en el sistema de energía.

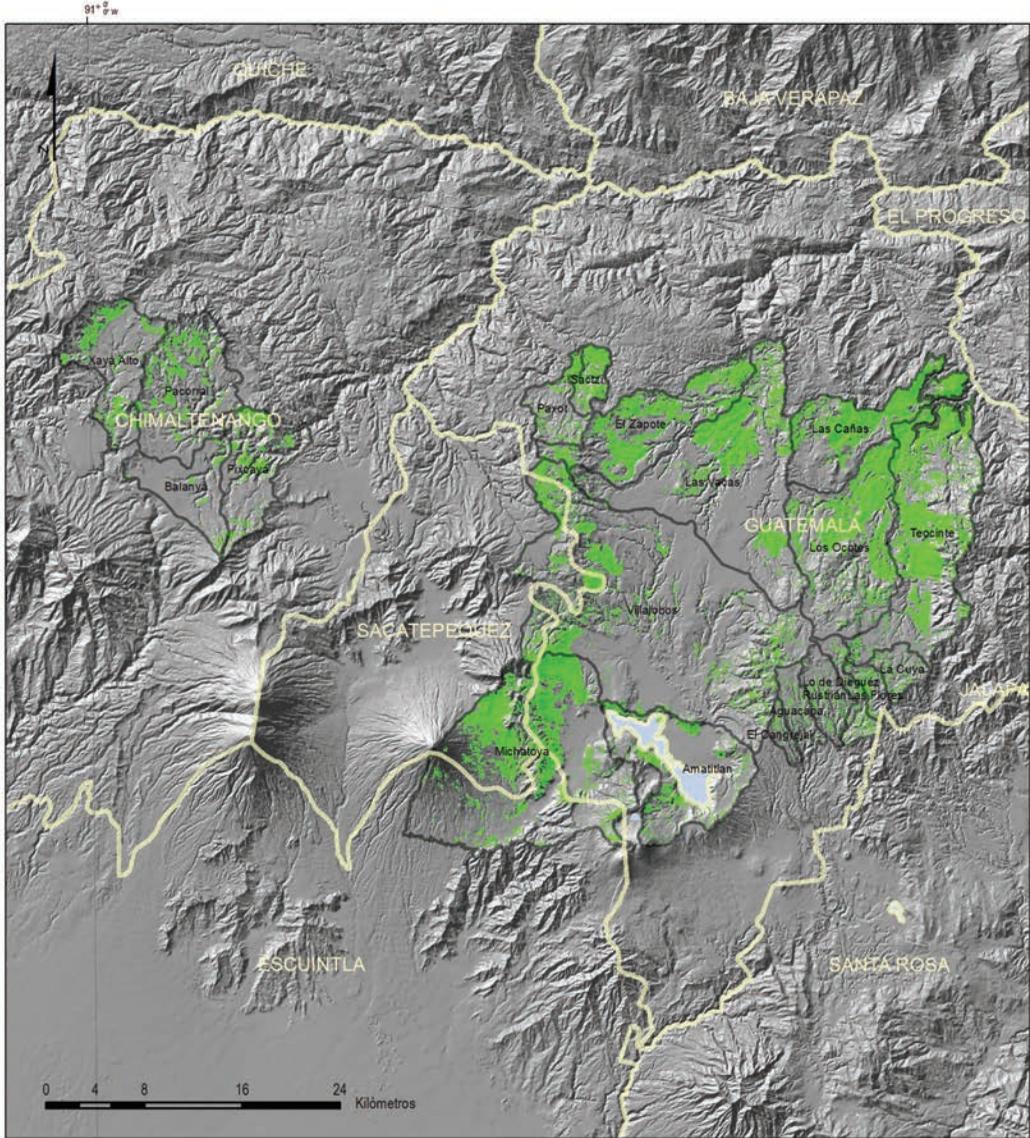
Continuación del Recuadro 5

- Línea evolutiva y familia de escenarios A2: describe un mundo heterogéneo. Sus características son la autosuficiencia y la conservación de identidades locales. Las pautas de fertilidad en el conjunto de las regiones convergen lentamente, con lo que se obtiene una población mundial en continuo crecimiento. El desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones, mientras que el crecimiento económico por habitante y el cambio tecnológico están fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.
- Línea evolutiva y familia de escenarios B1: describe un mundo convergente con una misma población mundial, que alcanza un máximo hacia mediados del siglo y desciende posteriormente, como en la línea evolutiva A1; pero presenta rápidos cambios orientados a una economía de servicios y de información, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales y la introducción de tecnologías limpias, con un aprovechamiento eficaz de los recursos. Da preponderancia a las soluciones de orden mundial encaminadas a la sostenibilidad económica, social y medioambiental, así como a una mayor igualdad, pero en ausencia de iniciativas adicionales relacionadas con el clima.
- Línea evolutiva y familia de escenarios B2: describe un mundo en el que predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y medioambiental. Es un mundo cuya población aumenta en forma progresiva, a un ritmo menor que en el escenario A2, con unos niveles de desarrollo económico intermedios y un cambio tecnológico menos rápido y más diverso que en las líneas evolutivas B1 y A1. Aunque este escenario está también orientado a la protección del ambiente y a la igualdad social, se centra en los niveles local y regional.

Modelo HADCM3

Es un modelo de circulación del clima global elaborado por el *Hadley Center* del Reino Unido, que incluye la relación entre la atmósfera y el océano. La resolución atmosférica del modelo cuenta con 19 niveles con una resolución de $2.5^\circ \times 3.5^\circ$, los cuales equivalen a unos 417×278 kilómetros en el Ecuador, y unos 295×278 km a 45° de latitud, aproximadamente. Dispone de seis bandas espectrales para longitudes de onda corta y ocho para longitudes de onda larga. Los efectos de los gases como el CO_2 , el vapor de agua y el ozono están representados de manera explícita, además incluye una simple categoría de parámetros para los aerosoles. Es decir, a partir de la concentración estimada de gases de efecto invernadero en la atmósfera es capaz de modelar temperaturas y precipitación, cuya base de análisis es la circulación climática global.

Figura 9
Mapa de zonas con potencial de reforestación



<p>ESTIMACIÓN DE LA OFERTA HIDROLÓGICA EN LA ZONA METROPOLITANA DE GUATEMALA</p> <p>Universidad Rafael Landívar (URL) Vicerrectoría de Investigación y Proyección Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (IARNA)</p>		<p>Zonas consideradas para reforestar</p> <p>Leyenda</p> <ul style="list-style-type: none"> Límites departamentales Límites de cuencas Cuerpo de agua Área para reforestación 	
<p>Proyección del mapa digital: UTM, zona 15, DATUM WGS 84. Proyección del mapa impreso: Coordenadas geográficas, Esferoide de Clarke 1866.</p>	<p>Fuente: Elaboración propia MAGA, 2006 Elaborado por: Laboratorio SIG IARNA Guatemala, 2012</p>		

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se identificaron las microcuencas vinculadas al abastecimiento de agua en la zona metropolitana. En la siguiente fase se aplicó el modelo hidrológico a nivel de microcuencas.

1.5 Resultados

1.5.1 Oferta anual total de agua en la zona metropolitana

La oferta total de agua para la zona metropolitana fue determinada a través de la suma entre el total anual de las precipitaciones registradas en las dieciséis microcuencas del área, más el total de las precipitaciones registradas en las cuatro microcuencas que abastecen al acueducto Xayá-Pixcayá.

El Cuadro 7 presenta los resultados de oferta total de agua para las microcuencas de la zona metropolitana y del área de Xayá-Pixcayá. A continuación, la Figura 10 muestra la distribución mensual de dicha oferta total y permite apreciar la importante variabilidad a la cual está sometida esta oferta a lo largo del año.

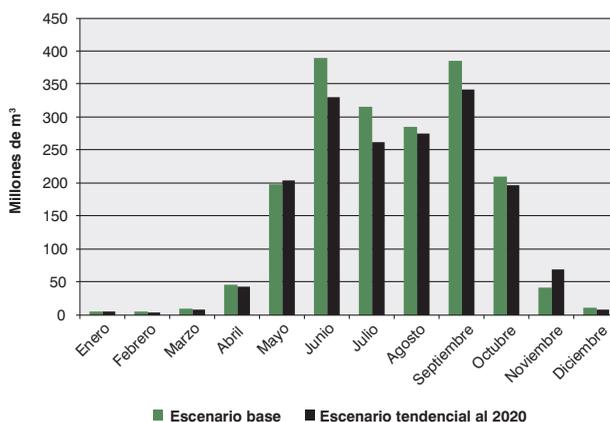
Con base en la oferta total, es necesario determinar el balance hidrológico para poder estimar el consumo de agua de los ecosistemas y cultivos, y la disponibilidad real de agua para la zona metropolitana.

Cuadro 7
Oferta total de agua en la zona metropolitana
(millones de metros cúbicos)

Escenario	Área metropolitana	Xayá - Pixcayá	Total
Escenario base	1,611	298	1,909
Escenario tendencial al 2020	1,481 (-8.1%)	275 (-7.7%)	1,755 (-8.1%)

Fuente: Elaboración propia.

Figura 10
Distribución mensual de la oferta total de agua en la zona metropolitana, incluyendo el área de Xayá-Pixcayá (millones de metros cúbicos)



Fuente: Elaboración propia.

1.5.2 Balance hidrológico

1.5.2.1 Situación actual (línea base)

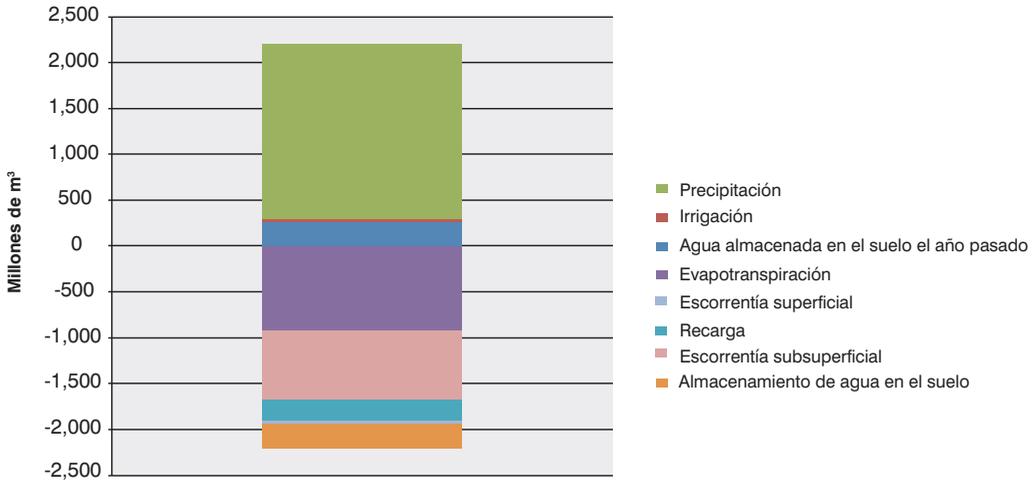
El balance hidrológico anual de las veinte microcuencas vinculadas a la zona metropolitana para el periodo actual se puede apreciar en el Cuadro 8 y en la Figura 11. En dicha figura, los valores positivos corresponden a los flujos de entrada de agua en el sistema (precipitaciones, irrigación y lámina de humedad acumulada en el suelo durante el año anterior) y los valores negativos son los flujos de salida (evapotranspiración, escorrentía superficial, escorrentía subsuperficial, recarga y lámina de humedad en el suelo acumulada durante el año).

Cuadro 8
Balance hidrológico actual de la zona metropolitana
(incluye el área de Xayá-Pixcayá)

Tipo de flujo	Flujos	Millones de metros cúbicos	Peso relativo (%)
Flujos de entrada	Precipitación	1,909	86
	Irrigación	34	2
	Agua almacenada en el suelo el año anterior	268	12
	Total de entradas	2,211	100
Flujos de salida	Evapotranspiración	929	42
	Escorrentía superficial	754	34
	Recarga	221	10
	Escorrentía subsuperficial	39	2
	Almacenamiento de agua en el suelo	268	12
	Total de salidas	2,211	100

Fuente: Elaboración propia.

Figura 11
Balance hidrológico actual en la zona metropolitana,
incluyendo el área de Xayá-Pixcayá (millones de metros cúbicos)



Fuente: Elaboración propia.

El balance hidrológico muestra que la mayor parte del agua que entra en el sistema sale bajo la forma de evapotranspiración, es decir es consumida por las plantas o evaporada en la atmósfera.

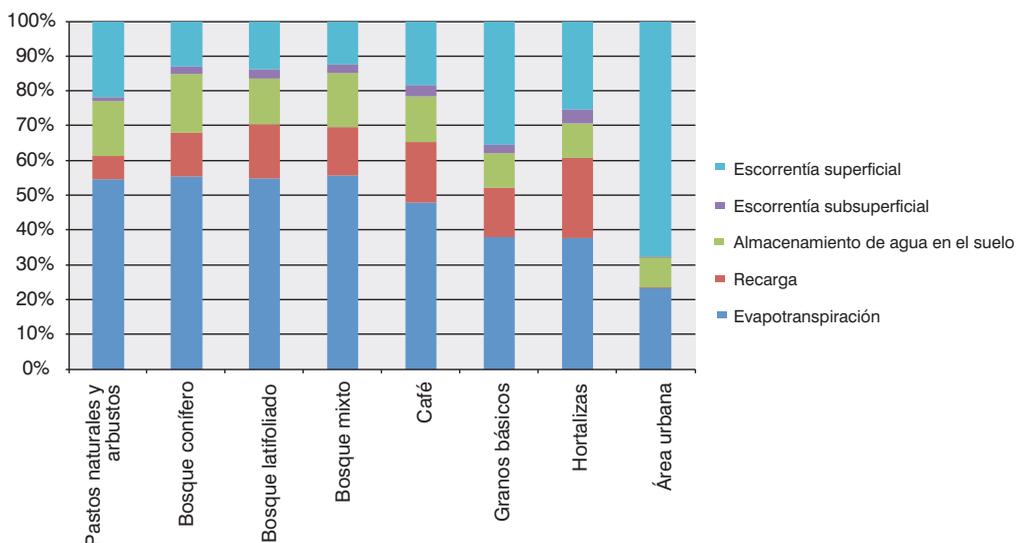
El segundo rubro más importante es la escorrentía superficial, que está relacionada con el hecho de que casi el 30% de la superficie de las veinte microcuencas modeladas corresponde a la categoría “áreas urbanas” según el mapa de uso de la tierra. Por lo tanto, la infiltración está muy limitada en estas zonas, pues tiene un alto nivel de impermeabilización y la producción de escorrentía superficial está favorecida.

Del balance total, el 10% corresponde a la recarga (percolación hacia los acuíferos), es decir, 221 millones de metros cúbicos por año; 12% a la lámina de agua acumulada anualmente; y 2% a la escorrentía subsuperficial.

La Figura 12 muestra la distribución de los flujos de salida para el total de las superficies de cada categoría de uso de la tierra.

Las categorías de bosque se caracterizan por una importante evapotranspiración (más del 50%), y una escorrentía menor del 15%. La recarga corresponde a alrededor del 15% del total de las salidas, al igual que la lámina de agua acumulada en el suelo.

Figura 12
Balance hidrológico de cada categoría de uso de la tierra



Fuente: Elaboración propia.

La evapotranspiración también tiene mucho peso en la categoría “pastos naturales y arbustos” (más del 50%). Como este tipo de vegetación ofrece menos resistencia a la escorrentía, este rubro es más importante (22%) que para las categorías de bosque, en detrimento de la recarga (7%).

El balance para la categoría “café” presenta similitudes con las categorías de bosque, aunque se observa un peso ligeramente menor para la evapotranspiración (48%), y una mayor escorrentía (18%).

Las categorías de uso agrícola presentan proporciones de evapotranspiración mucho menores que las de las otras categorías de uso con vegetación. Esto es principalmente debido al hecho de que los cultivos consumen menos agua que un bosque a lo largo del año. El peso de la escorrentía es mediano (superior o igual al 25%).

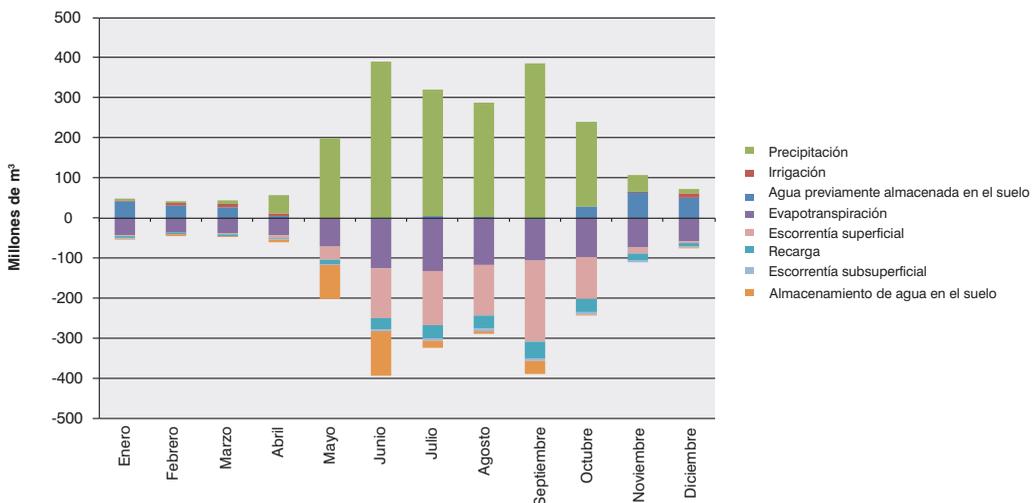
Es interesante notar que en el caso de las hortalizas, la recarga es más importante, y por el contrario, la escorrentía es menor. Esto es debido a que dentro del modelo, para esta categoría de uso, se toman en cuenta los flujos de entrada de agua de riego, el cual ocurre cuando la lámina de agua llega a un nivel crítico para la sobrevivencia de la planta (abajo del 30% de la capacidad de campo), y lleva el nivel de la lámina hasta el 65% de la capacidad de campo. Por lo tanto, esta entrada adicional de agua durante los periodos más “secos” favorece la recarga.

Finalmente, para las áreas urbanas se observa que la escorrentía es aproximadamente del 70%, y la recarga está casi ausente (menos del 1%).

Otro elemento que parece relevante de examinar es la evolución del balance hidrológico a lo largo del año. Esta información se presenta a escala mensual en la Figura 13, en la cual se observa que durante la temporada seca (noviembre-abril) el principal flujo de salida corresponde a la evapotranspiración, a consecuencia del consumo de agua por parte de la vegetación. Dada la escasez de precipitación que caracteriza esta estación, el agua requerida por la vegetación proviene de la lámina de agua acumulada en el suelo durante la estación lluviosa (mayo-octubre). A lo largo de la estación seca, esta lámina disminuye poco a poco, y probablemente genere cierto nivel de estrés hídrico en la vegetación. Este punto está ilustrado por la necesidad de riego que subraya el modelo para la categoría de uso “hortalizas”, principalmente en los meses de febrero, marzo y abril. Durante esta estación, los flujos de agua son acaparados por la vegetación, por lo que las contribuciones hacia los cuerpos de agua superficial y subterránea son muy limitadas.

Al inicio de la estación lluviosa, una fracción importante de los flujos contribuye al almacenamiento de agua en los suelos, que fueron drenados por la vegetación durante la estación seca. Esta situación hace que los flujos de recarga y escorrentía estén relativamente limitados. Por ejemplo, al comparar los meses de junio y septiembre (aunque sus niveles de precipitación sean parecidos), se puede notar que durante el segundo, se liberan los flujos más importantes de recarga y escorrentía debido a que el suelo ya ha sido “llenado” a inicios de la estación lluviosa.

Figura 13
Distribución mensual del balance hidrológico en la zona metropolitana, incluyendo el área de Xayá-Pixcayá (millones de metros cúbicos)



Fuente: Elaboración propia.

1.5.2.2 Escenario de cambio climático (A2) al 2020, sin reforestación (escenario tendencial)

Según el escenario A2 del IPCC, se espera el aumento de 1.5°C en la temperatura promedio mensual y la disminución del 9.3% de la precipitación promedio mensual en la zona metropolitana de Guatemala para el año 2020. En estas condiciones, el volumen total de precipitación en las veinte microcuencas del estudio pasaría de 1,909 millones a 1,755 millones de metros cúbicos.

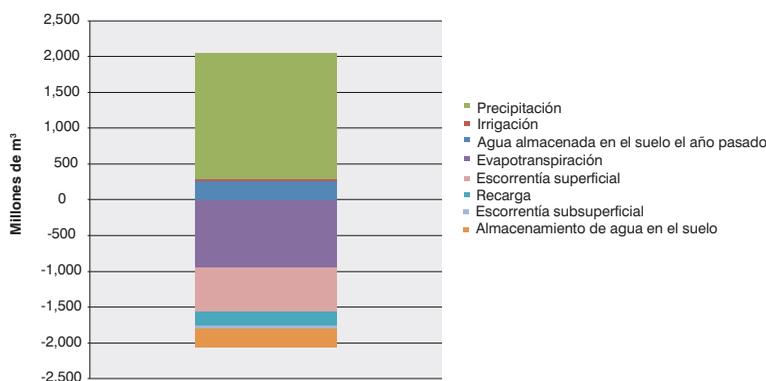
El balance hidrológico anual de dichas microcuencas en este escenario se puede apreciar en el Cuadro 9 y en la Figura 14.

Cuadro 9
Balance hidrológico en la zona metropolitana para el 2020
(incluye el área de Xayá-Pixcayá)

Tipo de flujo	Flujos	Millones de metros cúbicos	Peso relativo (%)
Flujos de entrada	Precipitación	1,755	85
	Irrigación	36	2
	Agua almacenada en el suelo el año anterior	262	13
	Total de entradas	2,053	100
Flujos de salida	Evapotranspiración	944	46
	Escorrentía superficial	616	30
	Recarga	200	10
	Escorrentía subsuperficial	35	2
	Almacenamiento de agua en el suelo	258	12
	Total de salidas	2,053	100

Fuente: Elaboración propia.

Figura 14
Balance hidrológico de la zona metropolitana en 2020,
incluyendo el área de Xayá-Pixcayá (millones de metros cúbicos)



Fuente: Elaboración propia.

En el balance general se puede observar que, dados los cambios en los parámetros climáticos, la evapotranspiración tiene un peso más importante. Al contrario, el rubro que pierde más relevancia es la escorrentía superficial. Los otros elementos del balance guardan más o menos la misma importancia relativa. La recarga baja 21 millones de metros cúbicos (10%) en comparación con la situación actual.

1.5.2.3 Escenario de cambio climático (A2) al 2020, con reforestación (escenario deseable)

Este escenario se basa en los mismos parámetros climáticos utilizados en el escenario anterior. A nivel del uso de la tierra, se toma en cuenta la reforestación de 37,400 hectáreas que corresponden actualmente a pastos naturales y arbustos, así como a espacios agrícolas. El balance hidrológico anual de las veinte microcuencas vinculadas a la zona metropolitana para este escenario se puede apreciar en el Cuadro 10 y en la Figura 15.

Dados los cambios en los parámetros climáticos y en el uso de la tierra, se observa que la evapotranspiración representa la mitad de la totalidad de los flujos de salida. Esto se explica por el hecho de que el bosque consume más agua que los otros tipos de cobertura. A esto se suma el aumento de las temperaturas.

El rubro que pierde más peso es la escorrentía superficial, que pasa del 30% en el escenario anterior, al 26% en el presente escenario. Además de consumir más agua, los árboles aumentan la infiltración en las capas profundas del suelo y también constituyen una barrera física a la escorrentía, cuyos volúmenes disminuyen.

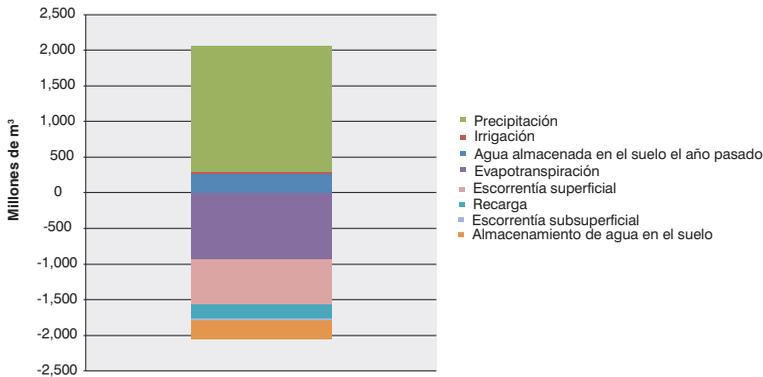
Se puede observar también que, en comparación con la situación actual, la reducción de la recarga es menor en el escenario de cambio climático con reforestación que en aquel sin reforestación.

Cuadro 10
Balance hidrológico de la zona metropolitana con reforestación, incluyendo el área de Xayá-Pixcayá. Año 2020

Tipo de flujo	Flujos	Millones de metros cúbicos	Peso relativo (%)
Flujos de entrada	Precipitación	1,755	85.4
	Irrigación	29.5	1.4
	Agua almacenada en el suelo el año anterior	270	13.2
	Total de entradas	2,054.5	100
Flujos de salida	Evapotranspiración	999	49
	Escorrentía superficial	538.5	26
	Recarga	212.5	10
	Escorrentía subsuperficial	37.5	2
	Almacenamiento de agua en el suelo	267	13
	Total de salidas	2,054.5	100

Fuente: Elaboración propia.

Figura 15
Balance hidrológico de la zona metropolitana con reforestación, incluyendo el área de Xayá-Pixcayá. Año 2020 (millones de metros cúbicos)



Fuente: Elaboración propia.

1.5.3 Estimación de la disponibilidad hídrica

Con base en el balance hidrológico definido previamente, se estimó la oferta hidrológica anual. Por oferta hidrológica se entiende el volumen de agua que deja disponible anualmente el subsistema ambiental.

La oferta hidrológica anual comprende la recarga de agua subterránea por año, más la contribución anual directa a los ríos, a través de la escorrentía superficial y subsuperficial. A nivel del agua subterránea no se tomó en cuenta el volumen ya almacenado en los acuíferos. No obstante, el conocimiento de la recarga anual provee insumos interesantes, ya que comparándola con los volúmenes extraídos anualmente se puede tener una idea del nivel de sostenibilidad de la extracción de agua.

Para evaluar la contribución del paisaje hacia los ríos, se tomaron en cuenta las 20 microcuencas de la zona de estudio. En el caso de la recarga, se excluyeron las microcuencas de las cuencas del Xayá y del Pixcayá (Xayá alto, Pixcayá, Balanyá y Pacorral), ya que por el factor distancia no se consideraron propicias para la explotación de aguas subterráneas para la zona metropolitana. Los volúmenes de agua disponible para cada escenario se presentan en el Cuadro 11.

Cuadro 11
Oferta hidrológica anual para los diferentes escenarios
(millones de metros cúbicos)

Escenario	Recarga (sin Xayá-Pixcayá)	Contribución hacia los ríos (con Xayá-Pixcayá)	Total
Situación actual	140	789	929
Escenario A2 al 2020, sin reforestación	125 (-10.5%)	647 (-18%)	772 (-16.9%)
Escenario A2 al 2020, con reforestación	138 (-1.6%)	572 (-27.5%)	710 (-23.6%)

Fuente: Elaboración propia.

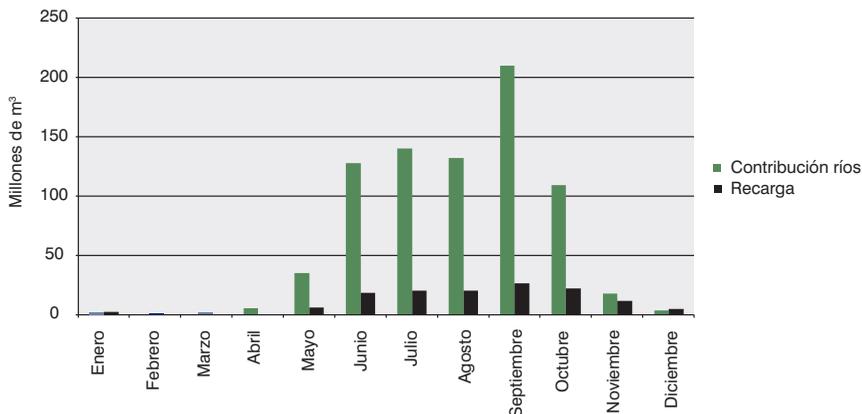
Al observar la oferta hidrológica anual de cada escenario, se pueden apreciar los efectos del cambio climático en la disponibilidad del agua. Comparando el escenario tendencial con la línea base se puede apreciar una disminución de la disponibilidad total del 16.9%, resultado de una reducción del 10.5% en la recarga y del 18% en la contribución hacia los ríos.

Si se compara la situación actual con el escenario A2 con reforestación al 2020, se observa la disminución del 23.6% de la oferta hidrológica total. Esta reducción es más importante bajo este escenario, ya que a los efectos del cambio climático se les suma una cobertura boscosa mucho más importante, lo que lleva a un mayor consumo de agua, a través de los procesos de evapotranspiración (Bruijnzeel, 2004; Farley, Jobbagy & Jackson, 2005). No obstante, el bosque, por sus características, facilita la infiltración y reduce la escorrentía, lo que hace que la recarga disminuya en menor proporción, si se le compara con el escenario de cambio climático sin reforestación (escenario tendencial) (1.6% contra 10.5%). Esto se debe principalmente a que la cobertura boscosa provee las condiciones favorables para mejorar la infiltración.

Aunque el consumo de agua por parte del bosque sea más importante, los flujos que quedan libres se reparten a favor de la infiltración, lo que implica, por otro lado, que hayan menores volúmenes de escorrentía. Por tanto, es importante notar que la reforestación limita considerablemente los efectos del cambio climático sobre la recarga, ya que permite que se mantengan los aportes hacia los mantos freáticos.

Otro tema importante de abordar es la variabilidad de la disponibilidad de agua en la zona metropolitana (Figura 16). Se puede observar que la disponibilidad es altamente fluctuante en función de las estaciones. En efecto, durante la estación seca los flujos de recarga y hacia los ríos están muy limitados, mientras que se incrementan durante la estación lluviosa. Esto es lógicamente debido a la variabilidad que marca el régimen de precipitaciones, típica de un clima tropical.

Figura 16
Variabilidad mensual de la disponibilidad de agua para la línea base¹
(millones de metros cúbicos)



Fuente: Elaboración propia.

¹ Toma en cuenta el área de Xayá-Pixcayá para la contribución hacia los ríos, pero no para la recarga.

1.5.4 Recarga

Para estimar la oferta hidrológica anual se tomaron en cuenta los aportes del agua superficial y subterránea. No obstante, varios factores limitan la explotación a futuro de las aguas superficiales en la zona metropolitana. Es poco factible considerar que se amplíe de manera significativa su infraestructura de aprovechamiento a corto plazo. Esto se debe principalmente al hecho de que la zona metropolitana está ubicada en las cabeceras de cuenca (parteaguas entre las cuencas de los ríos Villalobos y Las Vacas) y, por lo tanto, estos ríos reciben altos niveles de contaminación, principalmente de aguas negras provenientes de la industria, la agricultura y los hogares, hasta tal punto que limita las posibilidades de tratarlas para llegar a niveles suficientes de potabilidad.

Ante la consideración de desarrollar nuevos sistemas de captación de agua superficial en la zona metropolitana, es necesario iniciar un mejor manejo de las aguas residuales, de tal forma que los cuerpos de agua recobren niveles aceptables de contaminación bioquímica.

Por otro lado, el acueducto Xayá-Pixcayá tiene el potencial de transportar cantidades adicionales de agua. Sin embargo, durante la temporada seca los caudales de los ríos bajan considerablemente y existen problemas de contaminación en las zonas urbanas de Tecpán y Chimaltenango.

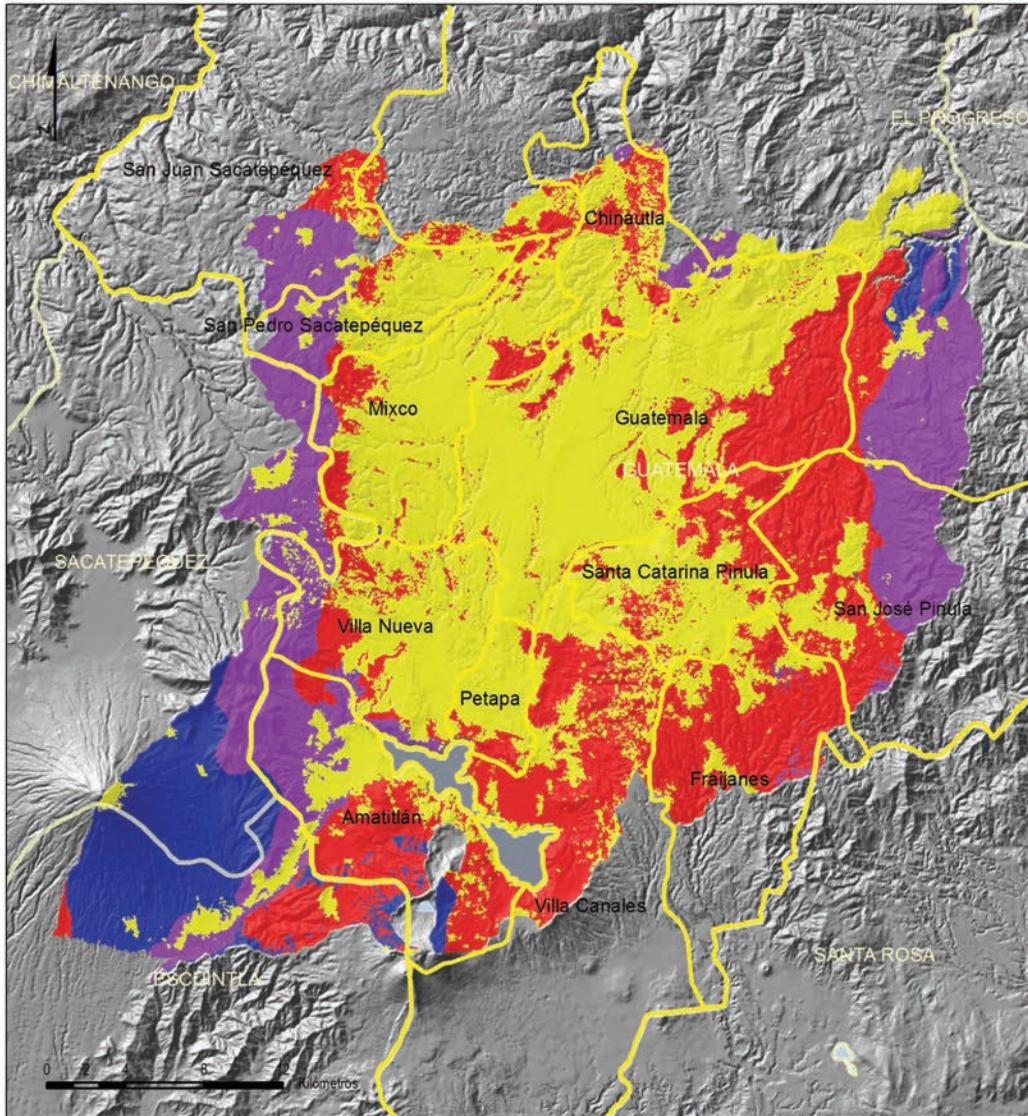
Por lo tanto, se puede afirmar que a corto plazo, la expansión del sistema de extracción de agua se dirigirá hacia el agua subterránea. Con el fin de aportar más información sobre este tema, se integraron los valores de recarga para poder elaborar un mapa que ilustrara el aporte de cada área fraccional del modelo al agua subterránea. Estos resultados se presentan en la Figura 17. Para definir los tipos de recarga, se usaron los umbrales de recarga definidos por Herrera (2005) (Cuadro 12).

Cuadro 12
Clasificación utilizada para determinar las zonas de recarga

Tipo de recarga	Umbrales ($\text{m}^3/\text{km}^2/\text{año}$)
Muy alta	$> 300,000$
Alta	$150,000 < x < 300,000$
Media	$50,000 < x < 150,000$
Baja	$< 50,000$
Nula	0

Fuente: Elaboración propia.

Figura 17
Recarga hídrica en la zona metropolitana



ESTIMACIÓN DE LA OFERTA HIDROLÓGICA EN LA ZONA METROPOLITANA DE GUATEMALA		Recarga hídrica en la zona metropolitana de Guatemala	
<p>Universidad Rafael Landívar (URL) Vicerrectoría de Investigación y Proyección Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (IARNA)</p>		<p>Legenda</p> <ul style="list-style-type: none"> Límites municipales Límites departamentales Cuerpo de agua 	<p>Recarga (m³/ha/año)</p> <ul style="list-style-type: none"> Nula Baja Media Alta Muy alta
<p>Proyección del mapa digital: UTM, zona 15, DATUM WGS 84. Proyección del mapa impreso: Coordenadas geográficas, Esferoide de Clarke 1866.</p>	<p>Fuente: Elaboración propia MAGA, 2006 Elaborado por: Laboratorio SIG IARNA Guatemala, 2012</p>	<p> </p>	

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que en el graben² que constituye el fondo del valle de Guatemala se encuentran las zonas con menores niveles de recarga. Esto se debe principalmente a que esta área está altamente urbanizada.

Las zonas de recarga media se encuentran mayormente en las laderas del valle de Guatemala, principalmente en la parte oriental de la zona metropolitana (norte de Santa Catarina Pinula, oeste de San José Pinula y zonas 16, 17 y 24 de la ciudad de Guatemala) y en la parte sur (microcuencas que drenan hacia los ríos María Linda y Los Esclavos en Fraijanes, microcuencas de los ríos Pinula y Las Minas en Villa Canales, y en las laderas del volcán de Pacaya).

Las zonas con altos niveles de recarga se encuentran especialmente en los altiplanos oriental (altiplano de San José Pinula en la subcuenca del Teocinte) y occidental (franja que se extiende desde la cordillera del Cerro Alux hasta el Volcán de Agua).

Las zonas con niveles muy altos de recarga se encuentran principalmente en el cono del Volcán de Agua, en algunas áreas del Volcán de Pacaya y en los valles donde confluyen los ríos Los Ocotes y Teocinte.

Las zonas sin recarga corresponden a los cuerpos de agua, siendo el principal el lago de Amatitlán.

El Cuadro 13 muestra la superficie y peso de los distintos niveles de recarga.

Los cambios más importantes entre cada escenario se dan a nivel de las recargas “baja” y “media”. Entre el escenario A2 al 2020 y la situación actual se puede notar el avance de las zonas con niveles bajos de recarga, a una altura de 73 km². Esto ocurre principalmente en detrimento de áreas de recarga media. Si bien la reforestación no permite el aumento de las superficies de recarga alta y muy alta, sí contribuye a mantener las proporciones de áreas de recarga media a los niveles actuales.

² Fosa tectónica que forma una larga depresión delimitada en ambos lados por fallas paralelas levantadas (*horst*), y entre las cuales el terreno se ha hundido por efecto de movimientos tectónicos.

Cuadro 13
Zonas de recarga hídrica en la zona metropolitana

Recarga	Superficie actual (km ²)	% actual	Superficie sin reforestación al 2020 (km ²)	% sin reforestación al 2020	Superficie con reforestación al 2020 (km ²)	% con reforestación al 2020
Baja	474.1	38.2	546.9	44	443.4	35.7
Media	446.3	35.9	374.6	30.2	474.4	38.2
Alta	202.7	16.3	201.6	16.2	205.3	16.5
Muy alta	100.4	8.1	100.4	8.1	100.4	8.1
Sin recarga	18.3	1.5	18.3	1.5	18.3	1.5
Total	1,241.8	100	1,241.8	100	1,241.8	100

Fuente: Elaboración propia.

1.5.5 Priorización de las zonas de reforestación

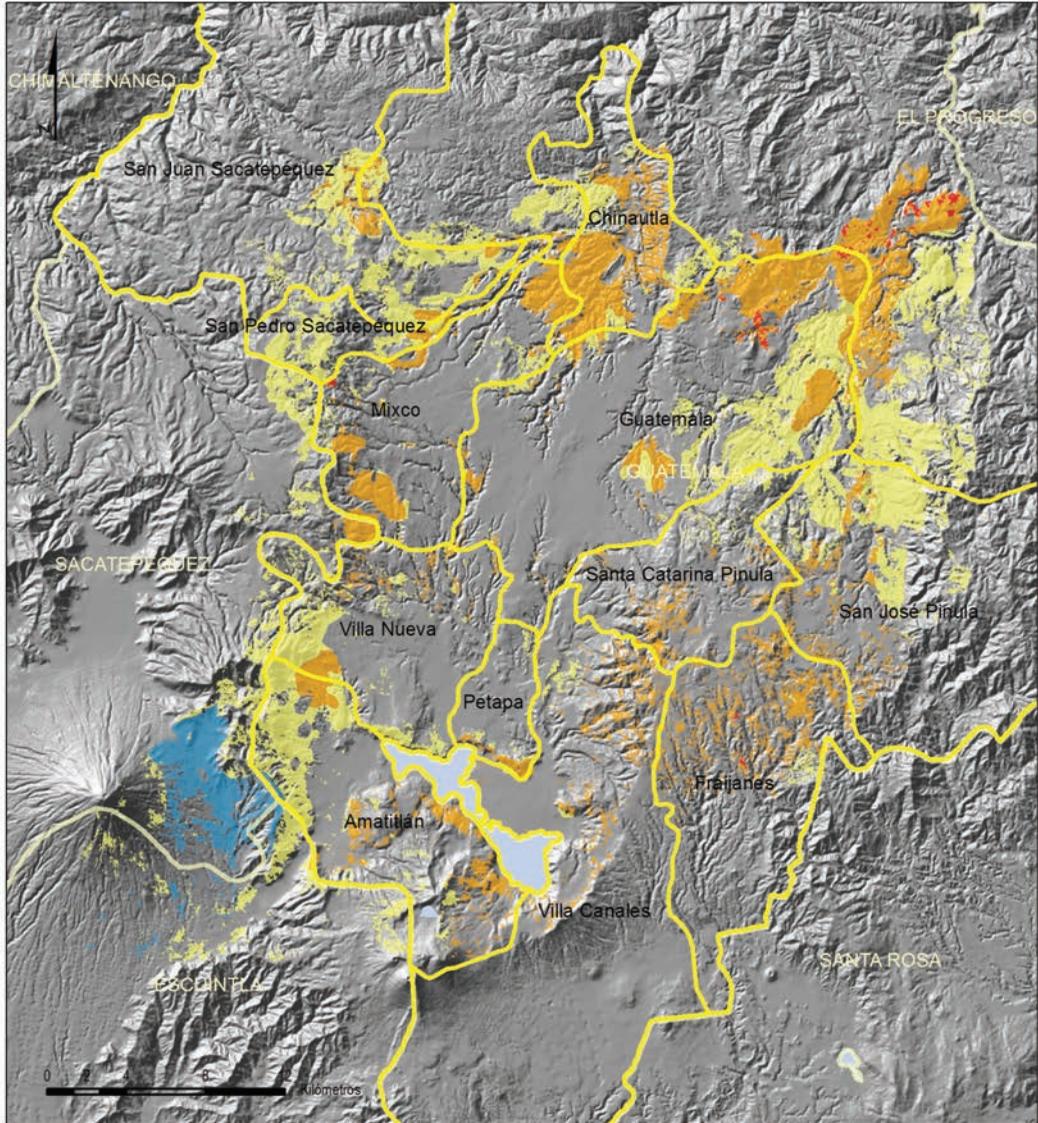
Con el objetivo de aportar elementos para orientar esfuerzos de reforestación, se priorizaron ciertas áreas dentro de las 37,400 hectáreas inicialmente propuestas, con base en el nivel de mejora de la recarga al pasar a un uso forestal.

Para ello, se calculó la tasa de evolución de los resultados de recarga del escenario A2 al 2020 con y sin reforestación. Se resaltaron las áreas en donde la reforestación incrementa la recarga, es decir, donde tendrá más eficiencia en términos de producción adicional de agua. Este análisis permite determinar en dónde tendrían un mejor balance costo-eficiencia los esfuerzos de reforestación. La Figura 18 presenta los resultados de la priorización.

Las áreas de reforestación que más incrementan la recarga son:

- Noreste de las zonas 17 y 18 de Guatemala;
- Límite entre los municipios de Mixco y Chinautla;
- Altos de Mixco, en los alrededores de la carretera Interamericana;
- Límite entre los municipios de Villa Nueva y Amatitlán, en los altos de Bárcenas;
- Algunos barrancos de la ciudad capital, principalmente en las zonas 11, 13, 15 y 16;
- Barrancos que bajan del norte de Villa Canales; y
- Cabeceras de cuenca en el norte del municipio de Fraijanes.

Figura 18
Zonas prioritarias de reforestación



<p>ESTIMACIÓN DE LA OFERTA HIDROLÓGICA EN LA ZONA METROPOLITANA DE GUATEMALA</p> <p>Universidad Rafael Landívar (URL) Vicerrectoría de Investigación y Proyección Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (IARNA)</p>	<p>Evolución de la recarga debida a la reforestación</p> <p>Legenda</p> <p> Límites municipales Límites departamentales Cuerpo de agua </p> <p>Evolución de la recarga</p> <p> Nula De 0 a 50% De 50 a 100% Más de 100% </p>	
<p>Proyección del mapa digital: UTM, zona 15, DATUM WGS 84. Proyección del mapa impreso: Coordenadas geográficas, Esferoide de Clarke 1866.</p>	<p>Fuente: Elaboración propia MAGA, 2006</p> <p>Elaborado por: Laboratorio SIG IARNA Guatemala, 2012</p>	<p>     </p>

Fuente: Elaboración propia.

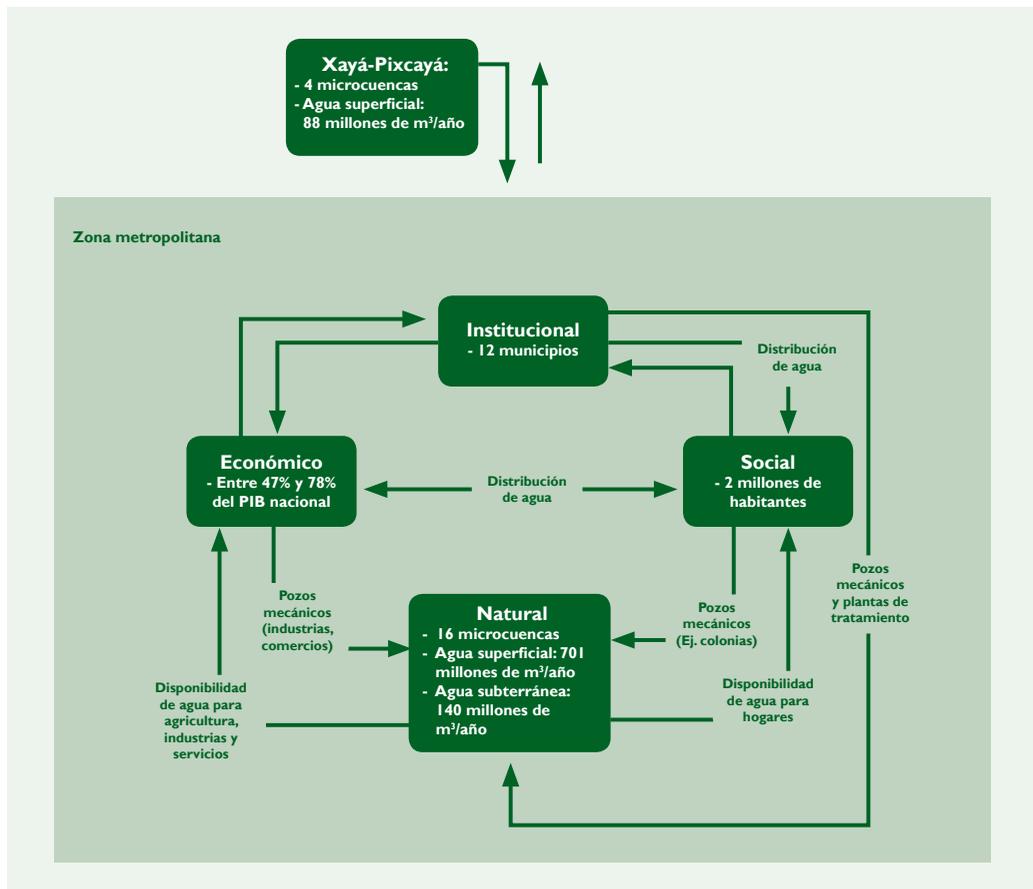
I.6 Conclusiones y recomendaciones

I.6.1 Conclusiones

La disponibilidad anual de agua actual en el área de estudio es de 929 millones de metros cúbicos al año, de los cuales el 85% corresponde a aguas superficiales (789 millones de metros cúbicos), y el resto a aguas subterráneas (140 millones de metros cúbicos). La importancia de la disponibilidad de agua para el sistema de la zona metropolitana se resalta en la Figura 19.

Mientras que los flujos de recarga se almacenan de manera natural en los acuíferos, los flujos de agua superficial viajan cuenca abajo, por lo que no están disponibles directamente para el consumo humano, y su calidad está amenazada por la contaminación. Estos factores hacen que su aprovechamiento esté comprometido, sobre todo para uso doméstico. Por lo tanto, en el contexto de la gestión integrada de los recursos hídricos se requeriría de un plan de manejo de aguas residuales provenientes ya sea de la industria, de la agricultura o de los hogares.

Figura 19
Oferta de agua en la zona metropolitana



Fuente: Elaboración propia.

Se ha evidenciado que los efectos del cambio climático sobre la oferta hidrológica podrían ser drásticos, como en el caso del escenario tendencial, donde se espera su disminución en un 16.9% para el 2020. No obstante, éste se basa en datos que corresponden al escenario de cambio climático más intenso construido por IARNA-URL con base en los marcos definidos por el IPCC (en términos de las variaciones de precipitación y temperatura). En todo caso, la disponibilidad de agua disminuirá en el futuro, aun a corto plazo (2020). En este escenario no se tomó en cuenta la evolución del uso de la tierra, que podría tender al aumento de las superficies urbanizadas y, por lo tanto, provocaría una reducción todavía más fuerte de los flujos de recarga. Esta situación evidencia la necesidad de iniciar esfuerzos de planificación del uso de la tierra que tomen en cuenta, entre otros, la realidad hidrológica de la zona metropolitana.

Otro punto que resaltó del análisis es la fuerte estacionalidad a la cual está sometida la disponibilidad de agua, que se ve limitada durante la estación seca, no sólo por las pocas precipitaciones, sino porque el agua almacenada en el suelo es consumida en su mayor parte por la vegetación. Durante este periodo es difícil abastecerse de aguas superficiales y, por lo tanto, la mayor parte del abastecimiento proviene del manto freático (INE, 2011). Estos factores deben ser tomados en cuenta para el diseño de soluciones eficientes que permitan optimizar la extracción de agua.

La reforestación podría ser un elemento de respuesta para frenar los efectos del cambio climático, ya que permitiría mantener los flujos anuales de recarga a un nivel similar al de la situación actual. En efecto, en el escenario de cambio climático con reforestación, la disminución de los flujos de recarga al 2020 es de 1.6%. No obstante, es importante mencionar que se tomó en cuenta la totalidad de las superficies con posibilidad de convertirse en bosque (pastos naturales y arbustos, y agricultura en sobreuso). A pesar de que la reforestación es deseable, no necesariamente es fácil, porque compite con otros tipos de uso de la tierra altamente lucrativos.

Sin embargo, es deber de las instituciones públicas (municipalidades) evaluar instrumentos (económicos, normativos, etc.) que puedan generar medidas encaminadas hacia la preservación del bien común. Desde esta perspectiva, el Fondo para la Conservación del Agua en la Zona Metropolitana de Guatemala se posiciona como un primer elemento para concretizar acciones frente a la problemática actual.-

Las áreas con bajos niveles de recarga podrían representar el 44% en 2020 –contra el 38% al día de hoy– de la totalidad de la superficie de las microcuencas de la zona metropolitana, y esto sólo por cambios en los factores climáticos. Si a eso se agregan los efectos de la expansión urbana, se puede esperar el crecimiento de dichas áreas, lo que podría contribuir a acelerar el agotamiento de los mantos freáticos de la zona metropolitana.

Algunos elementos de respuesta ante esta situación son el diseño e implementación de normas de urbanización respetuosas de las condiciones hidrológicas propias de la zona metropolitana, que permitirían limitar la impermeabilización de las superficies urbanizadas.

1.6.2 Recomendaciones

Considerando las principales conclusiones del presente estudio, se puede afirmar que es necesario y urgente poner en marcha iniciativas constructivas para mantener la oferta hidrológica a futuro en la zona metropolitana. Los esfuerzos tienen que ser asumidos por actores públicos y privados, así como por la sociedad civil, y deben encajar en el paradigma de la gestión integrada de los recursos hídricos, que privilegia las acciones locales e interinstitucionales bajo un enfoque sistémico y de largo plazo. Los principales esfuerzos deben enfocarse, por lo menos, en los siguientes puntos:

- A nivel del subsistema natural, es necesario iniciar lo más pronto posible un programa de reforestación en la zona metropolitana y sus alrededores, tomando en cuenta los resultados del presente estudio para priorizar la ubicación de dichos esfuerzos. Además, es indispensable seleccionar especies adecuadas a la realidad de los espacios terrestres (degradados, por ejemplo), a la realidad hidrológica (evitar especies altamente exigentes en agua) y multifuncionales, entre otros criterios. Asimismo, es importante asegurar el manejo silvícola permanente de las plantaciones.
- Con el fin de poder seguir aprovechando las aguas superficiales, es indispensable iniciar esfuerzos de conservación y restauración de los ríos. Bajo esta perspectiva, es necesario tomar en cuenta por un lado, su estado ecológico (que depende de factores biológicos, hidromorfológicos y físico-químicos); y por el otro, el estado puramente físico-químico y microbiológico del agua.
- Es imperativo implementar un sistema de monitoreo de aguas subterráneas, con el fin de tener certeza sobre sus volúmenes y su estado físico-químico y microbiológico.
- A mediano plazo es muy probable que la reforestación no sea suficiente para contrarrestar los efectos del cambio climático. Por lo tanto, es necesario establecer una estrategia a nivel de la zona metropolitana para facilitar el almacenamiento de agua, ya sea con infraestructura hidráulica de pequeña escala (techos verdes, áreas verdes bien ubicadas, estanques de retención, barreras naturales, etc.) o masiva.
- A nivel del sector agrícola se necesitan programas de incentivos que promuevan prácticas que tomen en cuenta el ciclo hidrológico y permitan mejorar las oportunidades de infiltración a nivel de las parcelas. Por lo tanto, es deseable promover prácticas de conservación de los suelos (terrazas, barreras naturales, etc.) que puedan facilitar la infiltración del agua y limitar la escorrentía. Espacios agrícolas bien manejados pueden llegar a tener propiedades hidrológicas cercanas a las de un bosque.
- Es indispensable crear normativas que fomenten la generalización de prácticas que favorezcan la infiltración. A nivel de las áreas urbanas se deben establecer normas a las empresas de lotificación y construcción, para que integren elementos de hidráulica de pequeña escala en sus proyectos, que permitan incrementar la recarga y limitar la escorrentía en las zonas urbanizadas.

- Es necesario optimizar el uso de los sistemas de extracción de aguas superficiales ya existentes. Esto es válido sobre todo para el acueducto Xayá-Pixcayá y la planta Lo de Coy, pues la posibilidad de implementar otros sistemas de aguas superficiales está comprometida por varios factores. Primero, en la zona metropolitana la calidad del agua está tan degradada que limita su uso para fines domésticos, aun con tratamiento. Y segundo, la implementación de un sistema de agua superficial exógeno a la zona metropolitana podría ser fuente de importantes tensiones sociales.
- Es necesario implementar un sistema de tratamiento de las aguas residuales provenientes de la industria, la agricultura y los hogares para limitar la contaminación hacia los cuerpos de agua superficial, y así asegurar una calidad de agua suficiente para consolidar los sistemas de captación existentes, y eventualmente crear nuevos.
- Por otro lado, es necesario regular la demanda, a través de instrumentos legales y reglamentaciones. Es imprescindible sensibilizar a los usuarios hacia nuevas prácticas que no generen desperdicio de agua, a través de campañas de comunicación masivas.
- Finalmente, es importante continuar esfuerzos de investigación para tener un conocimiento más preciso de los procesos biofísicos relacionados con el agua en la zona metropolitana.

1.7 Referencias bibliográficas

1. Allen, R., Pereira, L., Raes, D. & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration, guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and drainage paper 56*, 333. Roma: Food and Agriculture Organization (FAO).
2. Bahri, A. (2012). *Integrated urban water management*. Stockholm: Global Water Partnership
3. Bosch, J. & Hewlett, J. D. (1982). A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 55 (1-4), 3-23.
4. Bruijnzeel, L. (1990). *Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: a state of knowledge review*. Amsterdam: The Faculty of Earth Science.
5. Bruijnzeel, L. (2004). Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? *Agriculture, Ecosystems & Environment* 104 (1), 185-228.
6. Calder, I. (2007). Forests and water. Ensuring forest benefits outweigh water costs. *Forest Ecology and Management* 251 (1-2), 110-120.
7. Cardona, R. & Urioste, D. (1999). *La distribución del producto interno bruto en Guatemala, por región y departamento*. Guatemala: Instituto de Investigaciones Económicas y Sociales de la Universidad Rafael Landívar (IDIES-URL).

8. Census Bureau. (2012). *Metropolitan and micropolitan*. Recuperado el 14 de agosto de 2012, de: <http://www.census.gov/population/metro/data/omb.html>
9. *Constitución Política de la República de Guatemala*. (2002). Guatemala: Centro de Acción Legal-Ambiental y Social de Guatemala (CALAS).
10. Doorenbos, J., Kassam, A. & Bentvelsen, C. (1979). *Yield response to water*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).
11. Droubi, A., Al-Sibai, M., Abdallah, A., Wolfer, J., Huber, M., Hennings, V., El Hajji, K., et al. (2008). *Development and application of a decision support system (DSS) for water resources management in Zabadani bassin, Syria and Berrechid Basin, Morocco*. Syria: The Arab Center for the Studies of Arid Zones and Dry Lands & Federal Institute for Geosciences and Natural Resources.
12. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2006). *Calendario de cultivos América Latina y el Caribe*. Roma: Autor.
13. Farley, K., Jobbagy, E. & Jackson, R. (2005). Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy. *Global Change Biology* 11 (10), 1565-1576.
14. Goldman, R., Benítez, S., Calvache, A. & Ramos, A. (2010). *Water funds: protecting watersheds for nature and people*. USA: The Nature Conservancy.
15. GWP (Global Water Partnership). (2000). *Integrated water resources management*. Stockholm: Autor.
16. Herrera, I. (2005). Estudio hidrogeológico de la cuenca norte del lago de Atitlán, Sololá, Guatemala. En: *Congreso Latinoamericano de Hidrogeología* (p. 105), Managua.
17. Hijmans, R., Cameron, S., Parra, J., Jones, P. & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25 (15), 1965-1978.
18. IARNA-URL (Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar). (2005). *Situación del recurso hídrico en Guatemala*. Guatemala: Autor.
19. IARNA-URL (Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar). (2011). *Cambio climático y biodiversidad. Elementos para analizar sus interacciones en Guatemala con un enfoque ecosistémico*. Guatemala: Autor.
20. INAB (Instituto Nacional de Bosques). (2002). *Mapa de clasificación de tierras por capacidad de uso*. Guatemala: Autor.
21. INE (Instituto Nacional de Estadística). (2002). *Censos Nacionales XI de Población y VI de Habitación*. Guatemala: Autor.

22. INE (Instituto Nacional de Estadística). (2011). *Compendio estadístico ambiental 2010*. Guatemala: Autor.
23. INE y MAGA (Instituto Nacional de Estadística y Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación). (2004). *IV Censo Nacional Agropecuario*. Guatemala: Autor.
24. INSEE (Institut National de la Statistique et des Etudes). (2012). Aire Urbaine. Recuperado el 14 de agosto de 2012, de: <http://www.insee.fr/fr/methodes/default.asp?page=definitions/aire-urbaine.htm>
25. INSIVUMEH, IGN y ONU (Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología; Instituto Geográfico Nacional y Organización de las Naciones Unidas). (1978). *Informe final del estudio de aguas subterráneas en el valle de la ciudad de Guatemala*. Guatemala: Autor.
26. Kaimovitz, D. (2001). Cuatro medio verdades: la relación bosques y agua en Centroamérica. *Revista Forestal Centroamericana* 33, 6-10.
27. MAGA (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación). (2006). *Mapa de uso de la tierra y cobertura vegetal 2003*. Guatemala: Autor.
28. Manzo, D. (2008). *Reconocimiento hidrogeológico para la determinación de zonas de recarga hídrica en la subcuenca del río Pinula, jurisdicción de Santa Catarina Pinula, Guatemala*. Guatemala: Universidad San Carlos de Guatemala (USAC).
29. Müller, M. (2010). Fit for purpose: taking integrated water resource management back to basics. *Irrigation and Drainage Systems* 24 (3-4), 161-175.
30. Niemczynowicz, J. (1999). Urban hydrology and water management. Present and future challenges. *Urban Water I* (1), 1-14.
31. Office for National Statistics. (2012). *Urban area definitions*. Recuperado el 14 de agosto de 2012, de: <http://www.ons.gov.uk/ons/guide-method/census/census-2001/data-and-products/data-and-product-notes/urban-area-definitions/index.html>
32. PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). (1998). *Los contrastes del desarrollo humano*. Guatemala: Autor.
33. Sáenz, G. (1995). *Hidrología en la ingeniería*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
34. Saxton, K. & Rawls, W. (2006). Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Science Society of America Journal* 70 (5), 1569-1578.

35. Scurlock, J., Asner, G. & Gower, S. (2001). *Worldwide historical estimates of Leaf Area Index, 1932-2000*. USA: Department of Energy.
36. Simmons, C., Tarano, J. & Pinto, J. (1959). *Clasificación de reconocimiento de los suelos de la República de Guatemala*. Guatemala: Servicio Cooperativo Interamericano de Agricultura (SCIDA) e Instituto Agropecuario Nacional (IAN).
37. Snyder, R., Orang, M., Bali, K. & Eching, S. (2000). *Basic irrigation scheduling (BIS)*. USA: Regents of the University of California.
38. Van Tuylen, S. (2011). *Fondo para la Conservación del Agua de Guatemala*. Guatemala: The Nature Conservancy.
39. Yates, D., Sieber, J., Purkey, D. & Huber-Lee, A. (2005). WEAP2I A demand, priority, and preference-driven water planning model part I: Model characteristics. *Water International* 30 (4), 487-500.

Capítulo II

Análisis de la demanda de agua y evaluación del valor ambiental de las áreas de recarga hídrica en la zona metropolitana de Guatemala

Coordinación

Juventino Gálvez, IARNA-URL

Investigador principal y preparación del capítulo

Otoniel Monterroso, IARNA-URL

Apoyo estadístico

Pedro Pineda, IARNA-URL

Administración de encuesta y base de datos

*Programa de Opinión Pública de la Vicerrectoría
de Investigación y Proyección*

Aneliesse Burmester Chinchilla

Aura Waleska Ruíz Castañeda

Hans Quevedo Rossell

Issya José de León Gutiérrez

Sistemas de Información Geográfica

Gerónimo Pérez, IARNA-URL

2.1 Introducción

El Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar (IARNA-URL) realizó una alianza estratégica con la organización *The Nature Conservancy* (TNC), sede Guatemala, a través de la cual ambas instituciones se comprometieron a trabajar conjuntamente para procurar un mejor nivel de conocimiento acerca de las dinámicas hidrológicas y sociales de la zona metropolitana de Guatemala, con miras a mejorar los niveles de gestión en la materia. Ambas instancias están promoviendo la creación del Fondo para la Conservación del Agua de la Zona Metropolitana de Guatemala (FONCAGUA), que puede constituirse en un mecanismo institucional para abordar el manejo del territorio y asegurar agua en cantidad y calidad para todos los usos de la zona.

Para apoyar la pertinencia y el diseño del FONCAGUA y otros instrumentos afines, el IARNA-URL ha realizado diversos estudios ligados a los bienes hídricos. El marco analítico y metodológico general se basó en el estudio de la oferta y demanda de agua, así como en los aspectos institucionales relativos a su gestión en la zona metropolitana. Específicamente, las líneas de estudio han sido:

1. Estimación de la oferta hídrica actual y futura en la zona metropolitana de la ciudad de Guatemala. Para ello, se generaron modelos hidrológicos (usando WEAP-*Water Evaluation and Planning*) de las cuencas de influencia.
2. Cálculo del consumo de agua superficial en la zona metropolitana de Guatemala.
3. Estimación de la demanda actual y futura del recurso agua, a través de una valoración contingente que permita cuantificar el valor de la conservación del bosque y su contribución al ciclo hidrológico (estimación en términos sociales).

Este documento se refiere a la tercera de las líneas de estudio. Con los insumos anteriormente descritos, se podrá plantear, con mayor pertinencia, un Plan de Gestión Integral del Agua, así como una propuesta institucional para crear el FONCAGUA.

El objetivo del presente estudio es, entonces, proporcionar una visión integral de la demanda y consumo de agua en la zona metropolitana, así como establecer el valor económico que poseen los bosques por su contribución al ciclo hidrológico de la zona.

La presente publicación incluye una introducción, continúa con las consideraciones conceptuales acerca del valor del ambiente, analiza con detalle la metodología de valoración contingente –método elegido para realizar la valoración ambiental–, presenta los principales resultados de la demanda y consumo, así como la valoración ambiental. Se concluye con recomendaciones para la construcción del FONCAGUA.

2.2 Consideraciones conceptuales

2.2.1 ¿Por qué valorar el ambiente?

El creciente interés por la metodología de valoración de bienes y servicios ambientales se debe a que es un instrumento útil para la formulación de políticas ambientales, estudios de factibilidad de proyectos productivos y negociaciones de presupuestos públicos; o se constituye en elemento de juicio en litigaciones civiles de responsabilidad de daños ambientales. Es necesario enfatizar que la valoración del ambiente en general, y de los recursos forestales en particular, es un instrumento en la toma de decisiones, y no es un fin en sí mismo.

En el ámbito de la política sectorial, la valoración de bienes y servicios ambientales contribuye a elaborar instrumentos de política a través de evaluar los beneficios sociales y contrastarlos con los costos de la política.

La valoración ambiental ayuda a identificar los costos y beneficios de proyectos de desarrollo y a establecer los análisis económicos de beneficios netos. Con ello, la toma de decisiones se puede orientar de mejor forma. Esta valoración ha sido usada en muchos países para resaltar los beneficios sociales de la conservación forestal, y así poder reclamar mayores presupuestos públicos para los organismos encargados del sector forestal. Asimismo, ha sido ampliamente utilizada a nivel mundial para estimar daños ocasionados al ambiente, aspecto útil en litigaciones de responsabilidad civil.

Las instituciones encargadas de la administración de los recursos naturales en diversos países han desarrollado sus reglamentos de valoración, donde intentan asegurar que los daños de los descuidos privados son recompensados enteramente. Esto incluye la estimación de los costos de restauración, así como valores sociales y ambientales del recurso dañado y cualquier otro costo al ambiente que deba ser considerado.

En este estudio, la valoración ambiental es utilizada para estimar el valor del bosque para la producción y conservación de agua en la zona metropolitana de Guatemala. Es decir, se estima el valor del servicio ecosistémico que prestan los bosques para proveer el vital líquido. Con ello, se darán elementos para la creación de un fondo que promueva la conservación del bosque para asegurar la provisión de agua a la población. Los siguientes incisos analizan los servicios ecosistémicos y los métodos para su cuantificación monetaria.

2.2.2 Los servicios ecosistémicos

El término *servicios ecosistémicos* fue acuñado por la *Millennium Ecosystem Assessment* (MEA, 2005), que es una conferencia de científicos basada en el sistema de Naciones Unidas y dedicada a la conservación de la biodiversidad del planeta. El término *servicios ecosistémicos* es preferible al de *servicios ambientales*, para diferenciarlo del vocablo usado en negociaciones de comercio internacional, donde se refieren a una clasificación especial de productos o servicios que se comercializan a nivel internacional (y que no precisamente están relacionados con los ecosistemas).

MEA (2005) define a los *servicios ecosistémicos* como “los beneficios que la población obtiene de los ecosistemas. Estos incluyen *servicios de provisión* tales como alimento, madera, agua y fibras; *servicios de regulación* que afectan el clima, inundaciones, enfermedades, desechos y calidad del agua; *servicios culturales* que proveen recreación, belleza escénica y beneficios espirituales; y *servicios de soporte* como la formación de suelo, fotosíntesis y ciclaje de nutrientes” (ver también de Groot, Wilson & Boumans, 2002).

El Cuadro 14 ejemplifica algunos bienes y servicios que proveen los bosques según su categoría de manejo en Guatemala. El cuadro es esquemático y debe considerarse que un bosque puede ocupar una o varias filas al mismo tiempo.

El mismo cuadro muestra que, dependiendo de los objetivos sociales del bosque, así serán los principales beneficios brindados. Esto no significa que otros servicios ambientales dejen de generarse, sino que el rubro del bosque que tendrá más valor dependerá del fin último que la sociedad le ha conferido y por el cual se cultiva o se conserva. Así, se sugiere que elementos pueden ser considerados al realizarse una valoración de los servicios ecosistémicos, según el tipo de bosque (o sistema agroforestal) que se desea estudiar.

Por ejemplo, en las áreas protegidas (zona núcleo y de usos múltiples) el principal valor será el de no uso, pues la sociedad prefiere conservar los bosques en su estado natural que aprovechar la madera o cualquier otro recurso no maderable existente. Las zonas núcleo también podrán tener valores de uso indirecto (servicios ecosistémicos), dependiendo del lugar en el que se encuentren.

Cuadro 14
Identificación de los principales bienes y servicios de los bosques, según objetivos sociales

Tipo de bosque	Principales bienes o servicios que generan
Zona núcleo de áreas protegidas	Conservación de biodiversidad, valores de existencia, turismo ecológico, sitios arqueológicos, regulación del clima, protección del suelo, recarga hídrica, regulación del ciclo hidrológico.
Zona de usos múltiples de áreas protegidas	Conservación de biodiversidad, productos maderables y no maderables, turismo, ecoturismo, sitios arqueológicos.
Zona de amortiguamiento de áreas protegidas	Productos maderables y no maderables, biodiversidad, sustento familiar, ciclo hidrológico, otros servicios ambientales (el valor de existencia es menor que la zona de usos múltiples).
Bosques con fines de protección	Zonas de captación hídrica, protección del suelo, fuentes de agua (existencia, casos específicos).
Bosques con fines de producción	Productos maderables y no maderables.
Plantaciones	Productos maderables.

Fuente: Elaboración propia con base en CATIE e INAB (2003).

Fuera de las áreas protegidas, los bosques pueden tener como una de sus principales funciones la generación de servicios ecosistémicos (lo que técnicamente se ha denominado como *bosques de protección*). Así, existen comunidades que valoran el bosque por su función de conservación de agua, protección del suelo o defensa ante eventos climáticos extremos, por ser fuente de germoplasma, por proveer alimento y abrigo para la biodiversidad, entre otros.

A medida que se permite el aprovechamiento de madera y otros elementos del bosque, los valores de uso directo toman mayor relevancia, hasta llegar al caso de las plantaciones, donde los productores cultivan el bosque con el objetivo primordialmente maderable.

Para el caso específico de los bosques generadores de servicios ecosistémicos, IARNA-URL y TNC (2012a) analizaron la relación entre el bosque y el agua en Guatemala. Se partió del hecho de que el ciclo hidrológico está condicionado a nivel local por varios tipos de factores, entre los que están el clima, la geología y el uso de la tierra. Dentro de éstos, el que más llama la atención en el ámbito de la gestión es el uso de la tierra, ya que es el único sobre el cual las sociedades pueden tener un impacto directo y a corto plazo, sobre la disponibilidad de agua para consumo humano.

Recientemente, se ha puesto mucho énfasis sobre el rol que tiene el bosque en el ciclo hidrológico. La literatura científica sobre este tema menciona que la relación entre el bosque y el agua está influenciada por tres aspectos: i) disponibilidad anual de agua superficial, ii) atenuación de los extremos hidrológicos y iii) erosión y sedimentación (IARNA-URL y TNC, 2012a). Se ha logrado identificar aquellas áreas que pueden ser reforestadas y conservadas en la zona metropolitana de Guatemala para mejorar la disponibilidad de agua (IARNA-URL y TNC, 2012a). La sección 2.3 analiza con mayor detalle este tema.

2.2.3 ¿Cómo valorar los servicios ecosistémicos?

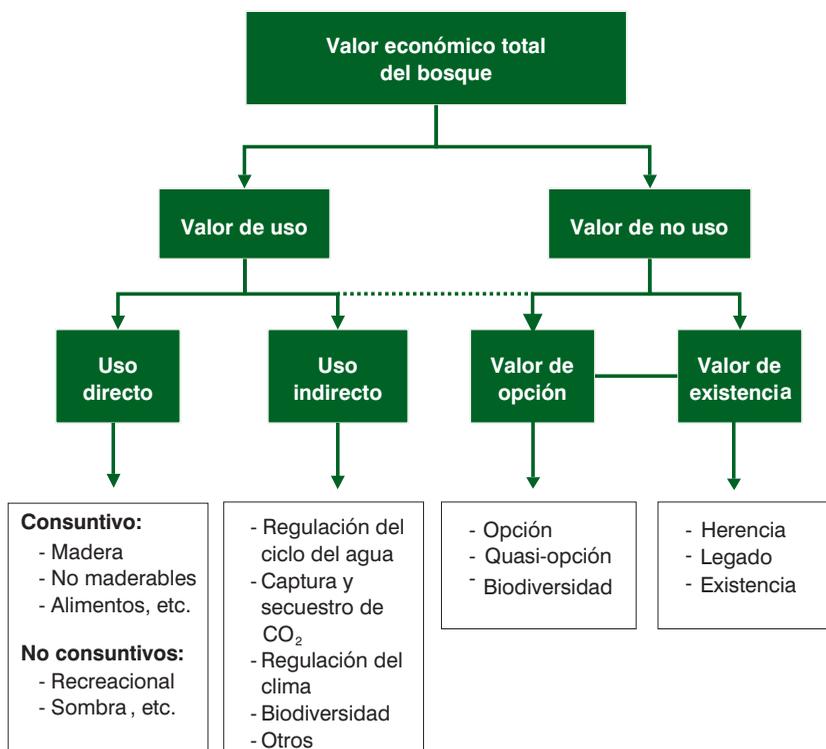
Como se mostró en el inciso anterior, los bosques tienen diferentes usos, los cuales van desde valores directos –como la madera–, hasta valores menos tangibles como la contribución del bosque para el control de la erosión, la captación de agua y la conservación de la biodiversidad.

La Figura 20 reproduce de manera gráfica el valor económico total del bosque, el cual se divide en valor de uso y valor de no uso. El primero se subdivide en uso directo, que incluye los productos maderables, no maderables o el turismo; es decir, los valores de uso directo representan los bienes consuntivos y no consuntivos del bosque.

Los *valores de uso* también incluyen a los valores indirectos, que han sido llamados *servicios ecosistémicos*, como se discutió en el apartado anterior. Aquí se encuentran aspectos como la captura de CO₂, la protección a la erosión y la recarga hídrica, entre otros.

Los *valores de no uso* producen bienestar a través de la conservación de los recursos naturales. La sociedad obtiene utilidad a través de la existencia del bosque, o bien por el hecho de dejar que las generaciones futuras gocen de los recursos. Así, los valores de no uso están subdivididos en valores de existencia y valores de opción.

Figura 20
Valor económico total del bosque



Fuente: Adaptado de Barbier (1998).

El valor económico total del bosque se obtiene de la suma de las cuatro columnas: valores de uso directo, indirecto, de opción y de existencia. Debe notarse, sin embargo, que la Figura 20 es esquemática y representa todas las posibles fuentes de bienestar que los bosques ofrecen a la sociedad. Se puede decir también que ilustra las funciones de los bosques desde una perspectiva técnica forestal.

La sociedad valorará cada bosque dependiendo de las condiciones socioeconómicas a su alrededor. En el tema de valoración, es más importante la identificación de los principales usos que los bosques proveen a la sociedad y valorar solo aquellos componentes que son importantes desde el punto de vista *social*. Es decir, lo que se valora es la externalidad positiva que genera el bosque, la cual produce bienestar desde el punto de vista social.³

Se utiliza una técnica específica para estimar cada valor señalado en la Figura 20, ya sea de uso o no uso. Los valores de uso directo se estiman con los precios de mercado, por lo que para determinar el valor monetario es necesario, por ejemplo, contar con los volúmenes promedio o cantidades extraídas de bienes maderables. Para el cálculo de los valores económicos proporcionados por belleza escénica y turismo se deben preferir técnicas tales como precios hedónicos o costo de viaje.

Los valores de uso indirecto requieren de la delimitación de las funciones de los bosques, esto es, se deben establecer las relaciones biofísicas entre el bosque y el servicio ecosistémico que se desea generar. Para el presente caso, la sección 2.3 muestra la relación biofísica entre la reforestación y el abastecimiento de agua en la zona metropolitana de Guatemala (IARNA-URL y TNC 2012a).

La economía ha propuesto diversos métodos de valoración para los usos indirectos del bosque, que se basan en la teoría económica de funciones de producción o en el método de valoración contingente. Métodos tales como costos evitados, costos inducidos y costos de oportunidad, son variantes de las funciones de producción.

Los valores de no uso se pueden estimar únicamente a partir de la valoración contingente, pues es un método que se basa en la teoría económica de la demanda. Los valores de este rubro están relacionados con la estimación de la utilidad social generada directamente por la conservación de los recursos. Puesto que este estudio se fundamenta en la valoración contingente, la siguiente sección amplía los elementos teóricos del método.

³ Se debe recordar en este punto que una externalidad se genera cuando existe un beneficio (o daño) social, y que dicho beneficio no es retribuido (o compensado).

2.2.4 El método de valoración contingente⁴

El método de valoración contingente (MVC) es una técnica que permite estimar los valores que la gente proporciona a cambios en la calidad de un bien o servicio ambiental, a través de preguntar directamente la disponibilidad a pagar (*willingness to pay*, WTP, por sus siglas en inglés) o su disponibilidad a aceptar (*willingness to accept*, WTA) compensación por daños (o beneficios) ambientales. El MVC ha sido usado para valorar diversos bienes y servicios ambientales: calidad del aire, de agua, contaminación por ruido, servicios recreacionales, biodiversidad y diversos valores de los bosques.

El objetivo de la valoración contingente es medir ya sea la variación equivalente o la variación compensatoria del bien en cuestión. Si el individuo debe pagar por el bien, la medida apropiada es la variación compensatoria: la mayor cantidad que la persona paga por un bien para conservar su utilidad constante. Si el individuo es dueño del bien y éste le será quitado (como en el caso de existencia de daño o pérdida de algún bien o servicio ambiental), entonces la medida apropiada es la variación equivalente: la mínima compensación que el individuo requiere para que su utilidad se conserve en el nivel original antes de perder el bien ambiental.

La variación compensatoria para el incremento de un bien de q_0 a q_1 , o la variación equivalente para la disminución de un bien de q_1 a q_0 , puede definirse usando la función de presupuesto del individuo. Señalando a la función de presupuesto como E , al vector de precios de los bienes mercadeables como P , la cantidad del bien ambiental consumida como q , el vector de otros bienes ambientales como Q y la utilidad individual como U_i cuando se consume q_i , la variación compensatoria (WTP) y la variación equivalente (WTA) están dadas por:

$$(1) \text{WTP} = E(P, q_0, Q, U_0) - E(P, q_1, Q, U_0)$$

$$(2) \text{WTA} = E(P, q_1, Q, U_1) - E(P, q_0, Q, U_1)$$

La Figura 21 reproduce la explicación gráfica de la variación compensatoria y la variación equivalente, siendo importante resaltar que la valoración contingente se basa en la teoría económica de la demanda, y que el objetivo central es identificar la variación equivalente (disponibilidad a pagar) o la variación compensatoria (disponibilidad a aceptar).

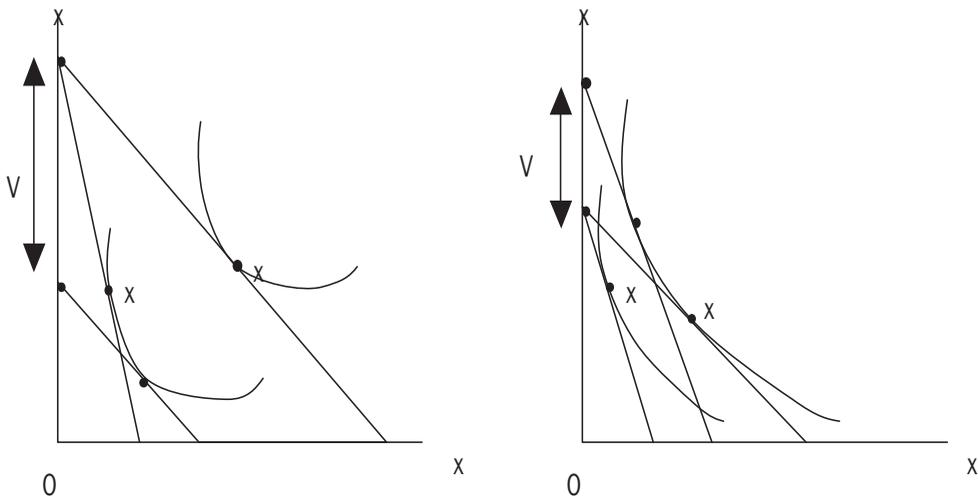
Existen algunos elementos importantes que se deben tomar en cuenta antes de realizar un ejercicio de valoración contingente. El MVC tiene dos componentes metodológicos principales: i) elaboración y desarrollo del cuestionario de VC y ii) estimación del valor ambiental a partir de WPT o WTA.

El cuestionario de VC es fundamental para la estimación, pues es el instrumento con el cual se recoge la disponibilidad de la gente para pagar por el bien ambiental: del diseño del cuestionario dependerá la confiabilidad de la estimación. Por su parte, la estimación del valor ambiental obedecerá a las herramientas econométricas utilizadas por el investigador, lo cual implica ciertas habilidades y entrenamiento previo.

⁴ Existe una amplia literatura para profundizar en los aspectos teóricos del MVC (v.gr. Carson y Hanemann, 2005); que en esta sección se presentan de forma sintética.

Venkatachalam (2004) resume las principales discusiones teóricas del método de valoración contingente, mientras que Whittington (2002) hace un recuento de problemas encontrados en estudios recientes de este tipo de valoración. El presente documento consideró cuidadosamente las recomendaciones del Panel NOAA (ver Recuadro 6), y de Whittington (2005) para hacer la valoración de los servicios ecosistémicos que prestan los bosques para mejorar la disponibilidad de agua en la zona metropolitana de Guatemala.

Figura 21
Variación compensatoria y variación equivalente



- Los conceptos de *variación compensatoria* y *equivalente* están basados en la Demanda Hicksina.
- Si los precios aumentan, se inclina más la función de presupuesto. Las selecciones se modifican de x^1 a x^2 .
- La variación equivalente (VE) en la primera gráfica es la cantidad de ingreso monetario que debería ser retirado del consumidor, a fin de que éste se ubique en la nueva curva de indiferencia.
- La variación compensatoria (VC) en la segunda gráfica es la cantidad de ingreso monetario que se requeriría dar al consumidor, para que éste regrese a la curva de indiferencia inicial —es decir, la cantidad necesaria para compensar al consumidor por un cambio de precios—.
- En preferencias cuasi-lineales: $VC = VE =$ excedente del consumidor.

Recuadro 6

Recomendaciones metodológicas del método de valoración contingente

La metodología para el desarrollo de cuestionarios de valoración contingente que se emplea en los Estados Unidos de América en casos legales y oficiales, es la expuesta por Arrow *et al.* (1993), que se titula “Reporte del Panel del NOAA⁵ sobre Valoración Contingente”. Dicho panel fue conformado por un premio nobel de economía (Robert Solow) y cinco prestigiosos economistas ambientales. En él se discutió sobre la pertinencia de utilizar el MVC para la evaluación de daños ambientales y se señalaron diversas consideraciones a tomar en cuenta para hacer valoración contingente:

- *Uso del formato de referéndum.* Se debe preguntar a los encuestados cómo votarían si se aumentaran los impuestos o se subieran los precios para obtener una mejora ambiental, las respuestas son *sí acepto* o *no acepto*. Los formatos abiertos –por ejemplo: “¿Cuál es la máxima cantidad de dinero que pagaría para evitar el daño ambiental x?” –no proveen los datos más confiables.
- *Evitar el “efecto de escala”.* Uno de los principales problemas del MVC es que los encuestados no diferencian las escalas o tamaños del bien evaluado. Por ejemplo, la gente no hace una clara diferencia entre 3,000 hectáreas o 300,000 hectáreas. Para evitar este problema, se requiere brindar suficiente información inicial, para contextualizar el bien ambiental que se desea abordar. Las consideraciones siguientes contribuyen a evitar el *efecto de escala* (*embedding effect*).
- *Dimensión del tiempo.* Típicamente, los daños ambientales son severos para el tiempo cercano al daño y gradualmente se reducen por fuerzas naturales o humanas a niveles muy bajos, o muy cercanos al estado inicial.
- *Diseño del tipo y tamaño de muestra.* El muestreo probabilístico es esencial para el MVC. La selección del tamaño de muestra y el diseño de muestreo es un tema técnico que requiere la opinión de expertos.
- *Entrevistas personales.* No se recomiendan entrevistas vía correo o telefónicas, aunque estas últimas se deben preferir a las enviadas por correo.
- *Pre muestreo cuidadoso.* Esto es para garantizar que la gente entiende lo que se está preguntando y que el instrumento de encuesta es válido.
- *Diseño conservador.* Un diseño conservador tiende a eliminar las respuestas fuera de la media, las cuales pueden aumentar la estimación.
- *Disponibilidad a pagar.* Se debe preferir el preguntar la disponibilidad a pagar, en lugar de la disponibilidad a aceptar. El primero es el formato más conservador.
- *Descripción detallada del programa o política.* Se debe proveer de información detallada a los encuestadores sobre el bien ambiental que se valorará.
- *Recordatorio de bienes sustitutos no dañados.* Se debe recordar a los encuestadores sobre cualquier bien sustituto, como cualquier otro bien natural que sea comparable a la zona.
- *Opción: “no respondió”.* El cuestionario debe tener explícitamente la opción de “no respondió” o “no sabe”, además de las respuestas de “sí” y “no”
- *Preguntas complementarias a “sí”/“no”.* Después de preguntar por la disponibilidad a pagar se debe hacer una serie de preguntas para delimitar el entendimiento del ejercicio.

Fuente: Elaboración propia con base en Arrow *et al.* (1993).

5 National Oceanic and Atmospheric Administration, Administración Oceanográfica y Atmosférica de Estados Unidos.

2.3 Metodología

2.3.1 Definición del objeto de valoración

El objeto de estudio es el servicio ecosistémico que prestan los bosques para generar mejores condiciones de abastecimiento de agua para la zona metropolitana de Guatemala —es decir, se estimó el valor de uso indirecto del bosque en términos de provisión de agua—.

El análisis de la relación causa-efecto entre bosque y disponibilidad de agua, se realizó en dos estudios previos de IARNA-URL y TNC (2012a y 2012b), donde se investigó la disponibilidad de agua en la zona metropolitana de Guatemala y la dinámica del agua subterránea.

El primer estudio parte de la delimitación de lo que podría llamarse zona metropolitana, la cual está conformada por doce municipios que tendrían que trabajar en común para el manejo de veinte microcuencas, y así poder asegurar el abastecimiento de agua del núcleo urbano. La delimitación de la zona metropolitana y sus microcuencas se muestra en la Figura 4.

Se estimó el balance hidrológico de la zona metropolitana, calculando que el total de flujo de entrada equivale a 2,211 millones de metros cúbicos de agua, donde la precipitación suma el 86%, el almacenamiento en el suelo el 12% y la irrigación el 2% (IARNA-URL y TNC, 2012a).

El segundo estudio muestra que la extracción de agua de los mantos acuíferos es la principal fuente de abastecimiento para el consumo del líquido en la zona metropolitana, la cual ha sido estimada en 91% del consumo total de la zona. En tal sentido, se puede afirmar que un componente importante de la gestión del agua estará relacionado con la sostenibilidad de las extracciones de agua subterránea, es decir, del correcto balance entre infiltración y extracción de agua de los mantos acuíferos (IARNA-URL y TNC, 2012b).

IARNA-URL y TNC (2012a) reportan que los bosques son los que aportan mejores condiciones para la infiltración de agua en los mantos acuíferos, identificándose las áreas que deben ser conservadas y aquellas que deben ser reforestadas para mejorar la oferta hídrica de la zona metropolitana. El Anexo 3 muestra el uso actual de la tierra, la Figura 9 las zonas que deben reforestarse y el Anexo 4 ambos indicadores.

La cobertura forestal actual en la zona metropolitana de Guatemala es de 21,244 hectáreas, que contribuyen a infiltrar al subsuelo un total de 214.5 millones de metros cúbicos de agua al año. Adicionalmente, se consideró la reforestación de 39,831 hectáreas, con lo que podrían infiltrarse unos 206.7 millones de metros cúbicos adicionales anualmente.

En el futuro cercano, debido al cambio climático, se espera que llueva menos en la zona metropolitana. Si se conserva la cobertura actual (21,244 hectáreas), para el 2020 se infiltrarán 195.6 millones de metros cúbicos, lo que representa un 10% menos de lo que se infiltra hoy. Si adicionalmente a la conservación del bosque se reforesta un total de 39,831 hectáreas, se infiltrarán 206.7 millones de metros cúbicos, lo que representará una disminución del 5% únicamente.

Por tanto, el valor ambiental estimado en este documento es el servicio que prestan los bosques para favorecer la infiltración de agua en los mantos freáticos, y con ello contribuir a la disponibilidad del líquido en la zona metropolitana de Guatemala en el presente y en un escenario al 2020⁶.

2.3.2 Diseño del cuestionario

El cuestionario consistió de cuatro secciones (Anexos 5 y 6):

- a) Datos básicos del entrevistado: edad, sexo y nivel educativo. El nivel de ingreso fue una variable cualitativa que se estimó con base en la colonia o barrio donde vivía el entrevistado. Estos datos se usaron como variables de la voluntad de pago (las llamadas variables *lexicográficas* en economía).
- b) Escenario contingente y licitación de la voluntad de pago.
- c) Preguntas de seguimiento y control de la voluntad de pago.
- d) Aspectos de la demanda de agua.

La sección B se subdividió en tres partes:

- a) Explicación general del problema y de todas las características del bien ambiental (Anexo 5). La introducción abordó las siguientes explicaciones: relación entre el bosque y la infiltración de agua en los mantos freáticos; situación del agua en el presente y en el futuro cercano (escenario 2020); y cómo los bosques pueden contribuir a solucionar el problema del agua en la zona metropolitana. Se utilizaron mapas de referencia para que el entrevistado pudiera tener una mejor idea de la superficie forestal actual, además de hacer referencia entre área forestal y campos de fútbol para tener puntos de referencia conocidos.
- b) Formulación del escenario contingente. Este se explicó a través de plantear un proyecto para la conservación del bosque y la reforestación de zonas específicas; se explicó el medio de pago (a través de la factura mensual de agua), y un pago por un período de diez años; se hizo el recordatorio de restricción presupuestaria y de posibles bienes sustitutos (traer agua de otras regiones). El proyecto sería coordinado y administrado por la Universidad Rafael Landívar a través del Fondo para la Conservación del Agua de la Zona Metropolitana de Guatemala (FONCAGUA).
- c) Disponibilidad a pagar por mejoras al ambiente. Para ello se realizó la siguiente pregunta:

⁶ En términos formales, el escenario q_0 es el nivel de agua actual, y el escenario q_1 es una disminución del 10% de la disponibilidad del agua. La variación compensatoria es cuánto el usuario está dispuesto a pagar para conservar el nivel del escenario q_0 , con la finalidad de mantenerse en su misma curva de indiferencia.

“¿Estaría usted dispuesto(a) a pagar la cantidad de Q _____ mensuales, adicionales a su factura de agua, durante 10 años, para **CONSERVAR** 40,000 manzanas y **REFORESTAR** 57,000 manzanas en las áreas que proveen agua a la zona metropolitana de Guatemala?”

Algunos aspectos considerados en esta sección fueron los siguientes:

- i. Formato de licitación. Se preguntó la disponibilidad a pagar (*willingness to pay* (WTP), realizando dos preguntas: disponibilidad a pagar para conservación y reforestación (pregunta cerrada tipo referéndum), y una segunda pregunta (tipo referéndum) donde se aumentó (o disminuyó) dependiendo la respuesta original. Es decir, si la respuesta era positiva, se preguntaba por Q10 adicionales; si era negativa, se preguntaba por Q10 menos.
- ii. Montos licitados (cf. *Bid*). Los montos iniciales fueron estimados a través de un pre muestreo, consistente de 90 encuestados en la zona metropolitana. De dicho pre muestreo se estimaron los montos iniciales de Q30, Q40, Q50, Q60 y Q70.
- iii. Vehículo de pago. El vehículo de pago fue el recibo del agua, por lo que la pregunta se realizó en términos mensuales.
- iv. Unidad de tiempo de la valuación. Se estimó un período de diez años, considerando que durante ese tiempo se podría conservar el bosque y ampliar la cobertura forestal —ello si no existiera ninguna otra eventualidad—.

Finalmente, las secciones C y D del cuestionario (Anexo 6) abordaron aspectos de seguimiento de la valoración contingente, así como temas diversos de la demanda de agua en la zona metropolitana. Esta información es de apoyo para el ejercicio de valoración, además de proporcionar información sobre la demanda y el consumo del agua.

2.3.3 Desarrollo de la encuesta⁷

La población objetivo (universo) fueron los hogares que habitan en la zona metropolitana. Para ello se tomó el dato total de población, equivalente a 2.9 millones de habitantes, y se dividió entre cinco personas por hogar, equivalente al promedio nacional. Esto dio un total de 586,160 hogares en la zona metropolitana (Cuadro 15).

⁷ El desarrollo de las encuestas, la supervisión y la digitación de datos, estuvo a cargo del Programa de Opinión Pública, instancia especializada de la Vicerrectoría de Investigación y Proyección de la Universidad Rafael Landívar.

Cuadro 15
Total de hogares en los municipios que conforman
la zona metropolitana de Guatemala

Municipio	Hogares	Municipio	Hogares
Guatemala	197,620	San Juan Sacatepéquez	41,600
Santa Catarina Pinula	17,060	Fraijanes	8,520
San José Pinula	13,540	Amatitlán	21,140
Chinautla	24,260	Villa Nueva	100,280
Mixco	94,880	Villa Canales	27,880
San Pedro Sacatepéquez	8,020	San Miguel Petapa	31,360
Total			586,160

Fuente: Estimación propia con base en INE (2004).

Para estimar el tamaño de muestra, se realizó un pre muestreo aleatorio de 90 encuestas en seis municipios (Amatitlán, Fraijanes, Guatemala, Mixco, Petapa y Villa Nueva), con el cual se obtuvo una representación de los cuatro estratos socioeconómicos. Con ello se determinó un valor preliminar de la disponibilidad a pagar (la media y su varianza), pudiéndose estimar el tamaño de muestra a través de la siguiente fórmula:

$$n = \frac{\sum_{i=1}^t \frac{N_i^2 S_i^2}{w_i}}{N^2 D + \sum_{i=1}^t N_i S_i^2}$$

Donde:

N_i = número total de hogares en el estrato i ,

S_i^2 = varianza (de la WTP) del estrato i ,

w_i = peso relativo del estrato i ,

D es igual a:

$$D = \frac{B^2}{4}$$

B está dado por:

$$B = \frac{Em\%}{100} * \bar{y}$$

$Em\%$ = error de muestreo en porcentaje,

\bar{y} = media general de la población.

El estrato utilizado fue el nivel de ingreso por municipio, para lo cual se empleó información de PNUD (2011). Usando estas fórmulas, asumiendo un error de muestreo de 4%, y substituyendo los datos del premuestreo, se obtuvo un tamaño de muestra de 836 encuestas. Al final, se realizaron 800 encuestas.

La distribución de la muestra, según estrato socioeconómico y municipio, se presenta en el Cuadro 16 y el Anexo 7 contiene el detalle del trabajo de campo por colonia y estrato.

Cuadro 16
Distribución de la muestra según estrato socioeconómico
y municipio (número de entrevistas)

Municipio	Estrato socioeconómico				Total
	Alto	Medio	Medio bajo	Bajo	
Guatemala	60	55	135	30	280
Santa Catarina Pinula	5	5	10	5	25
San José Pinula	5	5	10	5	25
Chinautla	0	5	20	5	30
Mixco	30	30	65	20	145
San Pedro Sacatepéquez	0	5	5	5	15
San Juan Sacatepéquez	0	10	30	10	50
Fraijanes	5	5	5	5	20
Amatitlán	0	5	15	5	25
Villa Nueva	0	30	70	20	120
Villa Canales	0	5	20	5	30
San Miguel Petapa	0	10	20	5	35
Total	105	170	405	120	800

Fuente: Elaboración propia.

La encuesta se desarrolló del 6 al 17 de agosto del 2013. Las entrevistas tuvieron una duración de 15 minutos por persona, aproximadamente. Para ello, se contó con un equipo de 17 encuestadores profesionales, a quienes se les capacitó en aspectos clave de la valoración contingente. El taller de capacitación consistió en dar el panorama general del estudio, así como entrenamiento para realizar las preguntas del escenario contingente. Se contó, además, con un equipo de tres supervisores, quienes acompañaron a los encuestadores durante el trabajo de campo.

El método de muestreo consistió en empezar en la primera avenida de cada colonia, y encuestar las casas hasta completar las encuestas requeridas. Si no se completaban las encuestas en dicha avenida, se tomaba la siguiente.

2.3.4 Digitación de encuestas y creación de la base de datos

Se creó una base de datos en *MS-Access*®, la cual contiene todas las preguntas de la encuesta. Estas se clasificaron según el número de entrada de cada pregunta. Se verificó cada cuestionario, y los que tenían errores se repitieron en campo. Esto para asegurar el mayor número de cuestionarios válidos.

Además, se realizaron análisis estadísticos para estimar si algún entrevistador influyó en las respuestas. Es decir, se agregó una variable por cada entrevistador, donde la $H_0: \beta=0$, $H_1: \beta \neq 0$. Si el coeficiente era diferente de cero, significaba que la información proveniente de dicho encuestador podía influir en las respuestas obtenidas. Los resultados de dichas pruebas de hipótesis mostraron que la β_1 correspondiente a cuatro entrevistadores era altamente significativa para el modelo. Sin embargo, no fueron descartados, pues a criterio del equipo supervisor no hubo problemas reales con estos encuestadores, y las diferencias pudieron darse por las características de las colonias entrevistadas.

Posteriormente, las entradas por pregunta se cambiaron a un formato disponible para ser utilizado en paquetes estadísticos y hojas de cálculo. Los datos se analizaron de diversa forma, a través de estadística descriptiva y realizando modelos econométricos, como se describe a continuación.

2.3.5 Estimación de la disponibilidad a pagar

La disponibilidad a pagar (WTP) se estimó con el siguiente modelo econométrico:

$$(I) \text{WTP} = f(P, P_2, Y, G, E, Ed, q_0, q_1) = X'\beta$$

Donde:

WTP = Disponibilidad a pagar (*willingness to pay*)

P = Oferta de pago (o bid inicial)

P_2 = Segunda oferta (segundo bid)

Y = nivel socioeconómico

G = género (masculino)

E = edad de la persona entrevistada

Ed = escolaridad de la persona entrevistada

q_0 = preguntas de control (para robustez del modelo)

q_1 = municipio donde vive el entrevistado

La estimación del vector de coeficientes β permite evaluar la consistencia interna de las respuestas y predecir la media WTP como una función de las características del entrevistado. Si se tiene un punto de estimación de la WTP por cada individuo de la muestra, entonces se puede agregar un error de estimación (ε) a la ecuación 1 y estimar una función para WTP.

Para el presente caso, se tiene que los encuestados responderán “sí” a la cantidad ofrecida, z_i , si $X_i'\beta + \varepsilon_i > z_i$, donde ε_i es el término de error que representa las variables que afectan la WTP, pero que no son observadas por el investigador.

Si $\{\varepsilon_i\}$ tiene una distribución idéntica e independientemente normal con media cero y desviación estándar σ , entonces el vector de coeficientes β puede estimarse usando una variante del modelo probit.

Específicamente, la probabilidad que un entrevistado no pague z_i está dado por $\Phi(z_i/\sigma - X_i'\beta/\sigma)$, donde Φ es la función estándar de distribución normal.

Al estimar un modelo *probit* con z y X como variables independientes, se logran estimaciones para $1/\sigma$ y β/σ , así como para la media WTP que se obtiene como $X_i'\beta$, es decir.

$$(2) \quad WTP_i = \beta_0 + X_i'\beta + \varepsilon_i$$

Para el cálculo de la WTP, diversos autores recomiendan usar la mediana en lugar de la media para evitar el peso de las respuestas muy alejadas al promedio. En el caso que se presenta, la mediana estará dada por:

$$(3) \quad E(WTP) = \beta_0 + \frac{\sum_{i=2}^7 \beta_i \bar{x}_i}{\beta_i}$$

Donde:

$E(WTP)$ = la mediana WTP

β_0 = intercepto

β_i = coeficiente del bid (o precio sugerido)

β_i donde $i = 2, \dots, 7$ = Coeficientes de género, ingreso, edad, escolaridad.

\bar{x}_i = media de la variable x_i

Para correr el modelo *Probit* se utilizó el software R (© The R Foundation for Statistical Computing), siguiendo lo recomendado Kleiber y Zeileis (2008). Después de estimar la mediana individual de la WTP, se procedió a estimar el valor agregado, multiplicando la WTP individual por el número total de hogares.

2.4 Resultados: La demanda de agua y el valor de los servicios ecosistémicos forestales

Este capítulo analiza la situación del consumo y la demanda de agua, con lo cual se plantea el marco de referencia y la importancia de la conservación de los bosques para la provisión de servicios ambientales. Posteriormente, se describe el valor de la conservación del ambiente en la zona metropolitana.

2.4.1 El consumo y la demanda de agua en la zona metropolitana

En los doce municipios que conforman la zona metropolitana de Guatemala (ver Figura 4) se consume un total de 553.4 millones de metros cúbicos de agua al año, lo que equivale a un promedio de 189 m³/cápita/año (Cuadro 17). El 91% del agua que se consume proviene de los mantos acuíferos, donde las microcuencas de Las Vacas y Villalobos proveen el 67% del total –lo cual denota la intensidad de la extracción en dichas cuencas– (IARNA-URL y TNC, 2012b). Para obtener más información sobre el estado y consumo de aguas subterráneas véase el Anexo 9.

Cuadro 17
Consumo total de agua por año en las cuencas que conforman la zona metropolitana de Guatemala, según extracción subterránea y agua superficial

Microcuenca	Extracción de agua por pozo (m ³ /año)	Contribución al total
Agua subterránea		
Aguacapa	2,988,614	1%
Amatitlán	7,787,757	1%
El Cangrejal	1,459,762	0%
El Zapote	35,312,779	6%
La Cuya	1,039,549	0%
Las Cañas	19,218,168	3%
Las Flores	1,374,727	0%
Las Vacas	175,917,347	32%
Lo de Diéguez	3,676,331	1%
Los Ocotes	15,993,937	3%
Michatoya	26,006,431	5%
Paxot	4,910,751	1%
Rustrián	412,418	0%
Sactzi	936,562	0%
Teocinte	14,070,873	3%
Villalobos	191,203,422	35%
Subtotal	502,309,428	91%
Agua superficial		
Acueducto Xayá-Picayá / [*] **	51,100,000	9%
Gran total	553,409,428	100%

^{*}/ Estimado con base en información de la Empresa Municipal de Agua (EMPAGUA).

Fuente: IARNA-URL (2012).

^{**}/ Corresponde a cuatro subcuencas.

El consumo de agua en la zona metropolitana puede dividirse en: industrial (incluye servicios), doméstico, municipal o agrícola. La Figura 22 muestra la distribución del consumo para las principales cuencas de la zona metropolitana de Guatemala, donde se aprecia que el agua para consumo humano predomina en las cuencas del municipio de Guatemala, y el uso industrial es más notorio en las cuencas periféricas al mismo. El uso agrícola del agua continúa (en bajos porcentajes) en los municipios con mayor población rural.

IARNA-URL y TNC (2012b) muestran que el 61% de las extracciones de agua subterránea son para fines domésticos, el 31% para municipalidades, el 7% para la industria y comercio, y el 2% para el riego. Estas cifras sugieren, por tanto, que los hogares son los principales consumidores en la zona metropolitana de Guatemala. En este documento se analizará únicamente la demanda de agua para consumo humano.

La Figura 23 muestra el principal proveedor del servicio de agua en los hogares que conforman la zona de estudio.⁸ El 73% del agua en la zona metropolitana es provista por empresas municipales, el 25% por empresas privadas y el 2% por pozos propios.

En la Figura 23a se aprecia el detalle por municipio, donde se advierte que en Chinautla, Santa Catarina Pinula y Villa Canales, el principal proveedor del servicio de agua son las empresas municipales. Por su parte, en San Juan Sacatepéquez, San Miguel Petapa y Villa Nueva más del 50% de los hogares reciben el servicio de empresas privadas –por ejemplo, comités de colonia o empresas privadas–. En municipios todavía altamente rurales, como San Juan y San Pedro Sacatepéquez, los pozos propios continúan siendo la fuente primaria para cerca del 15% de hogares.

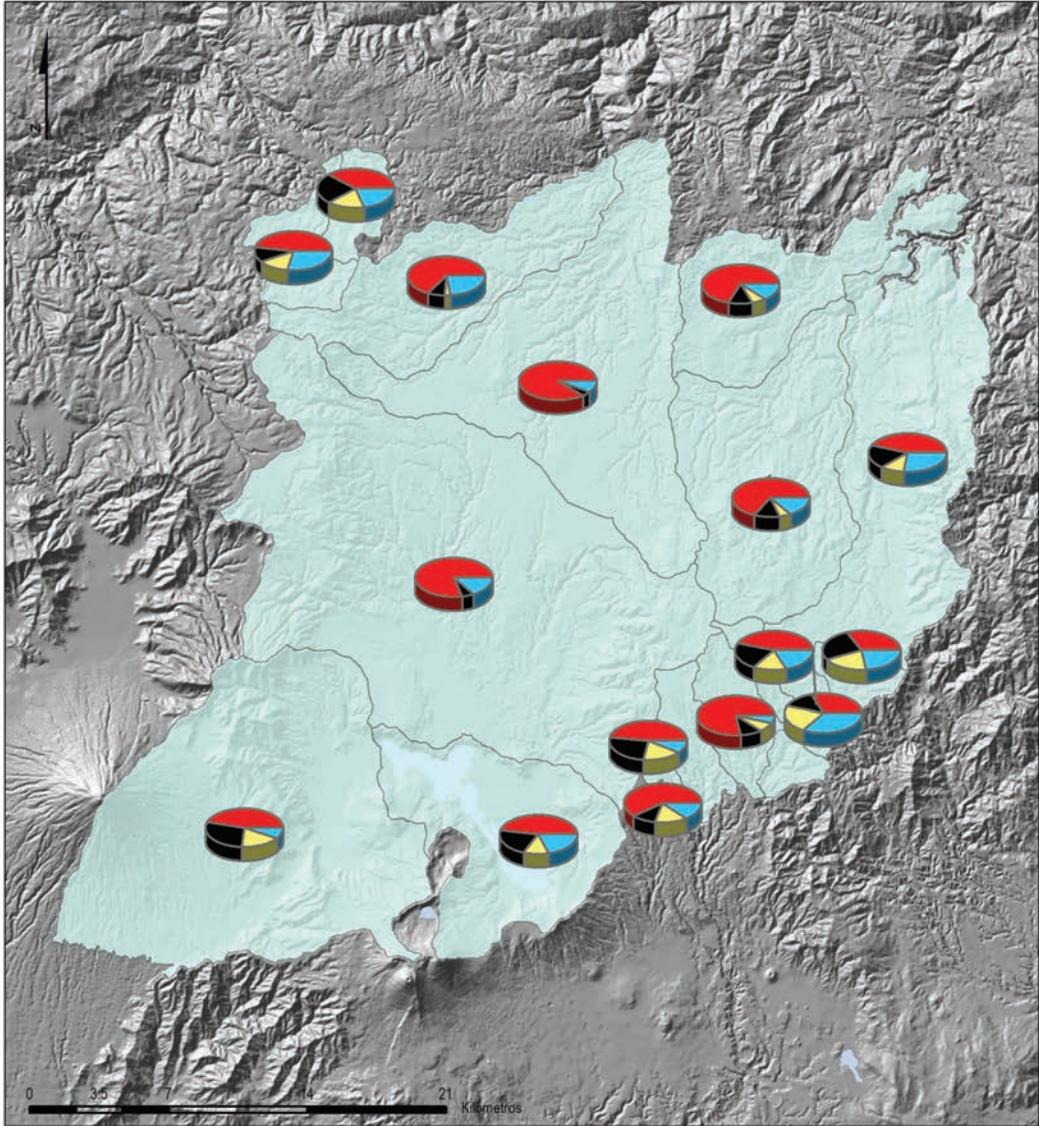
Al analizar las fuentes de provisión de agua en términos socioeconómicos, los niveles alto y medio tienden a tener hasta un 35% del servicio proveído por empresas privadas, mientras que en el nivel bajo el 80% del servicio es municipal. Los pozos propios se encuentran principalmente en el 5% de los hogares de los niveles medio y medio-bajo.

Es importante subrayar la creciente inclusión de empresas privadas y comités de vecinos como vías para cubrir los servicios de provisión de agua. Esto es notorio en los municipios de reciente urbanización (las llamadas “ciudades dormitorio”), como el caso de Mixco, San Miguel Petapa, Villa Nueva o San José Pinula.

El nivel de abastecimiento se puede percibir de manera cualitativa en la Figura 24. El 76% de los hogares de la zona metropolitana menciona que el agua que recibe sí es suficiente para abastecer las necesidades del hogar. En la Figura 24a se muestra que los municipios que más cubren sus requerimientos de agua son Villa Canales y Villa Nueva; mientras que en Chinautla, Petapa y Santa Catarina Pinula más del 45% de los hogares menciona que el agua que recibe de su proveedor principal no es suficiente. De igual forma, en términos socioeconómicos, el 85% de los hogares de los estratos altos menciona que sí es suficiente el agua que recibe, mientras que de los estratos bajos, el porcentaje llega al 63%.

⁸ Los datos que se muestran en esta sección provienen de entrevistas realizadas a una muestra de población, con un nivel de significancia de un 4% de error, tal como se indicó en la Sección 2.3.

Figura 22
Principales usos del agua subterránea en las cuencas que conforman la zona metropolitana de Guatemala

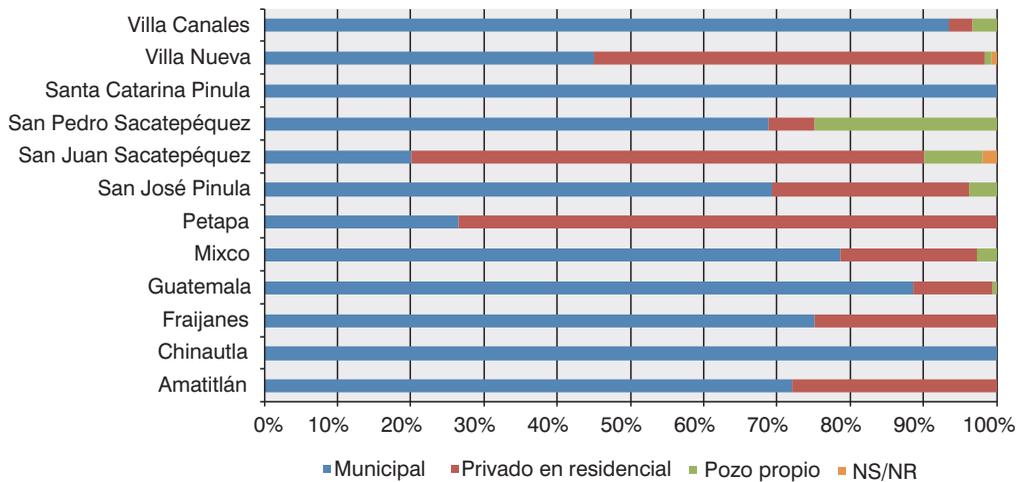


<p align="center">ESTIMACIÓN DEL CONSUMO DE AGUA EN LA ZONA METROPOLITANA DE GUATEMALA</p> <p align="center">Universidad Rafael Landívar (URL) Vicerrectoría de Investigación y Proyección Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (IARNA)</p>	<p align="center">Tipos de pozos por cuenca</p> <p>Leyenda</p> <p>■ Cuerpo de agua</p> <p>  Doméstico Riego Industrial Municipal </p>	
<p>Proyección del mapa digital: UTM, zona 15, DATUM WGS 84. Proyección del mapa impreso: Coordenadas geográficas, Esteroide de Clarke 1866.</p>	<p>Fuente: Elaboración propia MAGA, 2006</p> <p>Elaborado por: Laboratorio SIG IARNA Guatemala, 2012</p>	<p align="center">    </p>

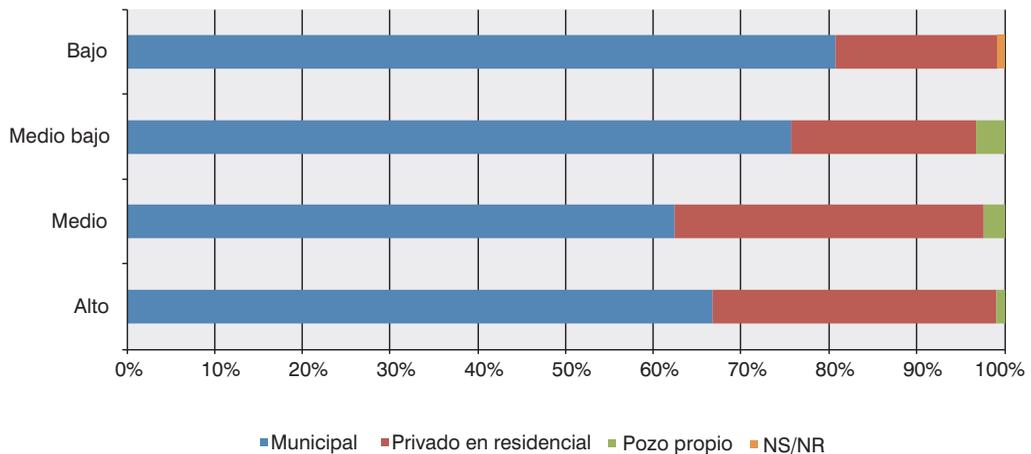
Fuente: Elaboración propia.

Figura 23
Principales proveedores de agua en los municipios
de la zona metropolitana de Guatemala

a. Principal proveedor de agua en los municipios de la zona metropolitana de Guatemala



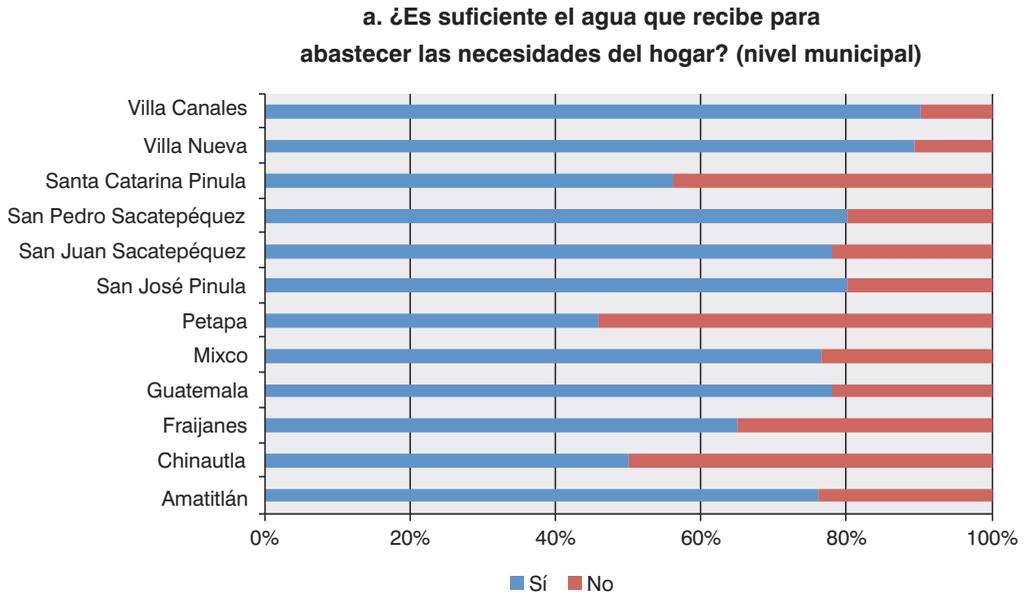
b. Principal proveedor de agua, según estrato socioeconómico en la zona metropolitana



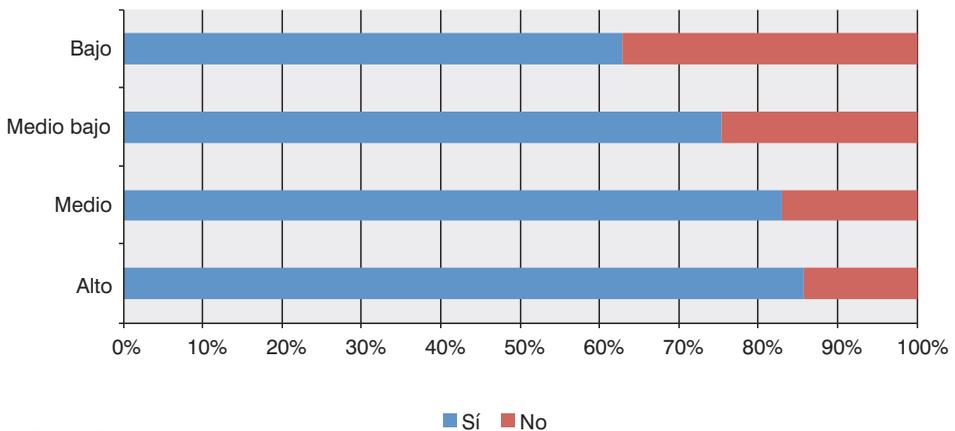
Abreviaturas
 NS: No sabe
 NR: No responde

Fuente: Elaboración propia.

Figura 24
Nivel de abastecimiento de agua para satisfacer las necesidades del hogar



b. ¿Es suficiente el agua que recibe para abastecer las necesidades del hogar? (estrato socioeconómico)



Fuente: Elaboración propia.

Llama la atención que mientras en Chinautla el principal proveedor del servicio es la empresa municipal, en Petapa son empresas privadas; en ambos casos la deficiencia del agua supera el 50% de los hogares. Independientemente del proveedor, resalta entonces que la falta de agua es generalizada en todos los municipios y en todos los estratos socioeconómicos. Esto subraya que el problema de desabastecimiento de agua es generalizado en la zona metropolitana, y que se deben tomar acciones para contrarrestar dicho problema.

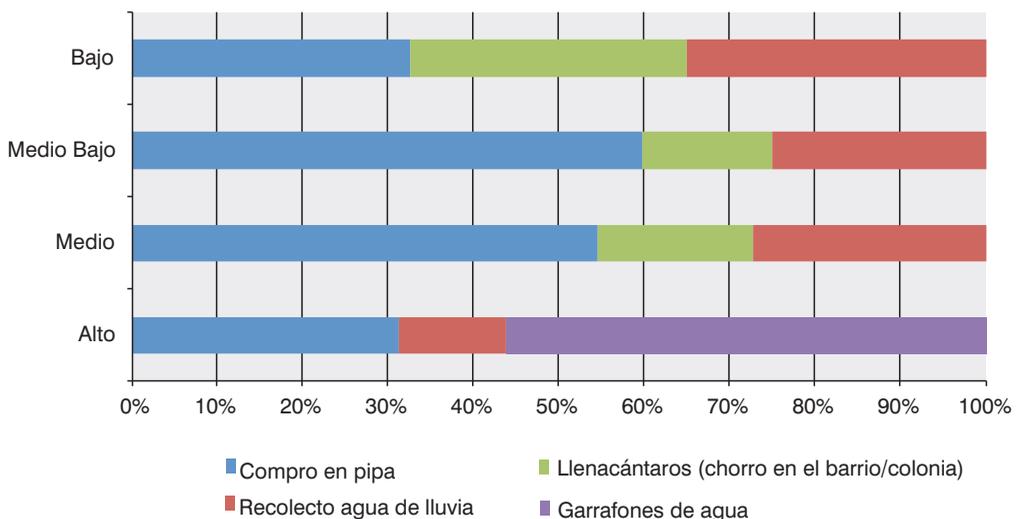
Pero si el agua es insuficiente, ¿cómo se suplir el faltante para satisfacer las necesidades del hogar? La Figura 25 muestra las diversas estrategias según estrato socioeconómico, donde se aprecia que el nivel bajo se abastece: comprando pipas de agua (31%), en llenacántaros ubicados en el barrio o colonia (34%) o recolectando agua de lluvia (35%). Los niveles medio-bajo y medio utilizan más el servicio privado de pipas, y en menor medida los llenacántaros, pero resalta también la recolección de agua de lluvia. En el estrato alto sobresale la compra de garrafones de agua, seguramente para alimentación o bebida.

Los problemas en la provisión de agua pueden analizarse a través de evaluar el número de días que los hogares reciben el servicio durante el mes, pues racionar el servicio ha sido una opción constante. Por ejemplo, algunos municipios como Villa Canales, Santa Catarina Pinula y San Pedro Sacatepéquez han optado por la estrategia de proveer agua sólo en ciertos días a la semana, por lo que más del 70% de los hogares recibe agua menos de 30 días al mes (Figura 26).

En otros municipios, como San Miguel Petapa o Chinautla, donde la mayoría de hogares recibe agua todos los días del mes, la estrategia ha sido proveer el servicio por algunas horas, lo que ha tenido como resultado que el agua que les llega no satisface las necesidades diarias del hogar (Figuras 24 y 26).

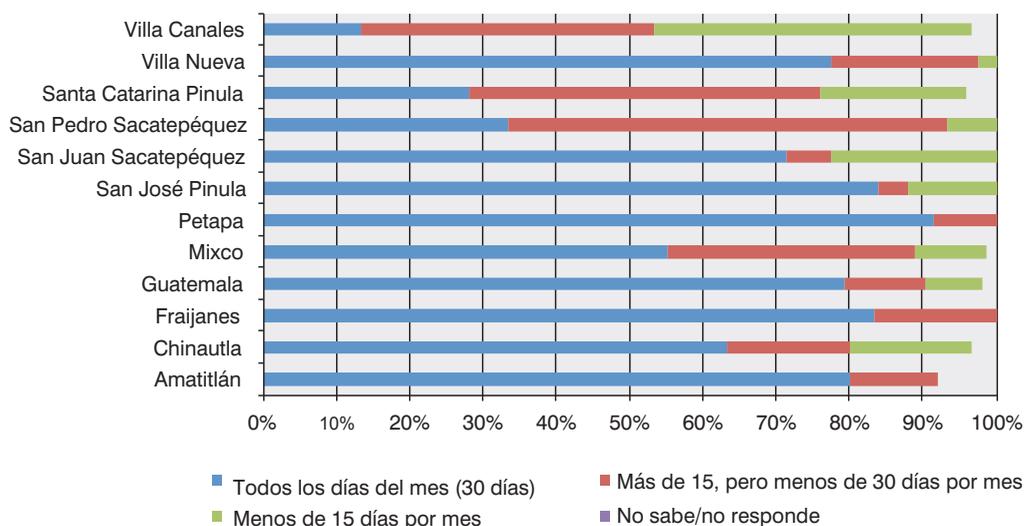
Figura 25

Formas de suplir déficit en el suministro de agua, según estrato socioeconómico



Fuente: Elaboración propia.

Figura 26
Cantidad de días al mes en los que se recibe agua
en los municipios de la zona metropolitana



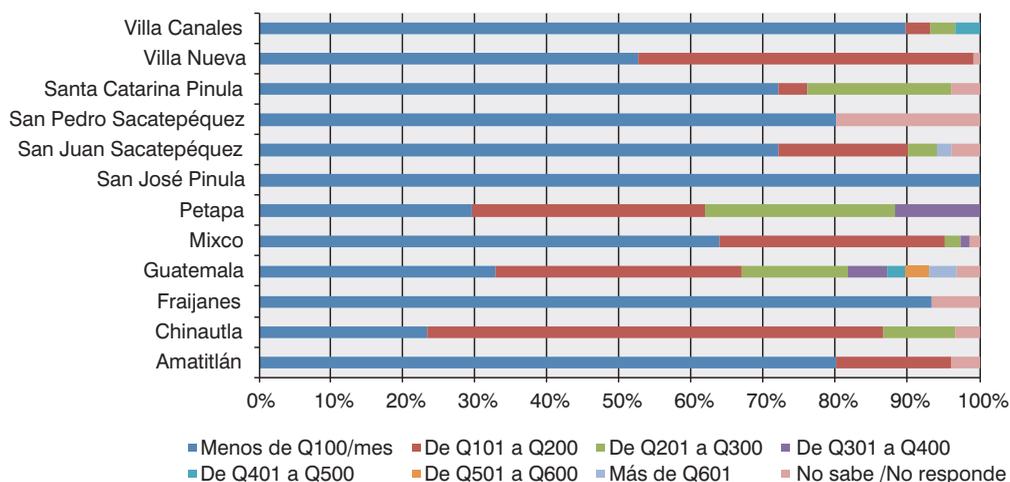
Fuente: Elaboración propia.

Dado el déficit de agua en los hogares de la zona metropolitana, no debe extrañar, por tanto, que más del 65% de los hogares posean cisternas, tinacos o algún otro medio de almacenamiento durante los días que no tienen servicio de agua en su hogar.

Con respecto a las tarifas del servicio, la Figura 27 muestra que en municipios como Chinautla, San Miguel Petapa, Guatemala y Villa Nueva, más del 50% de los hogares pagan arriba de Q150/mes por servicio de agua. En algunas colonias o residencial en estos municipios, la tarifa de agua puede sobrepasar los Q300/mes. En contraste, en Amatitlán, Fraijanes, San José Pinula y Villa Canales el servicio se provee por menos de Q100 al mes.

El Cuadro 18 muestra el promedio pagado por municipio, donde puede apreciarse que la tarifa más alta es la pagada en el municipio de Guatemala, seguido por San Miguel Petapa y Chinautla. Llama la atención que estos dos últimos municipios son también los que menos cubren las necesidades de abastecimiento de agua en los hogares. Contrastantemente, San José Pinula y San Pedro Sacatepéquez, donde la tarifa promedio es la más baja, son municipios que suplen en gran porcentaje los requerimientos de agua de los hogares.

Figura 27
Tarifas promedio mensuales de agua en los municipios de la zona metropolitana de Guatemala



Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 18
Tarifas promedio de pago por servicio de provisión de agua en los municipios que conforman la zona metropolitana de Guatemala

Municipio	Cantidad promedio (quetzales/mes)	Municipio	Cantidad promedio (quetzales/mes)
Guatemala	187.26	Mixco	90.14
Petapa	170.59	Villa Canales	74.14
Chinautla	136.21	Amatitlán	66.67
Villa Nueva	96.96	Fraijanes	50.00
Santa Catarina Pinula	95.83	San José Pinula	50.00
San Juan Sacatepéquez	91.67	San Pedro Sacatepéquez	50.00

Fuente: Elaboración propia.

El abastecimiento de agua a los hogares y las tarifas que se cobran dependerán de los costos de provisión del servicio y de la infraestructura disponible, por ejemplo, del grado de urbanización de los núcleos urbanos. También influirán los costos incurridos para su tratamiento, entre otros.

Dadas las limitaciones de las empresas municipales para proveer agua, se ha incrementado la provisión privada del recurso. Por ejemplo, EMPAGUA compra aproximadamente el 20% del agua que distribuye a empresas privadas (EMPAGUA, 2012). Sin embargo, los problemas de abastecimiento se dejan sentir en la zona metropolitana, por lo que vale la pena analizar el valor de los bosques en su función de proteger y mejorar el abastecimiento de este recurso.

2.4.2 El valor de la conservación de los bosques para proveer agua en la zona metropolitana

Como se mencionó anteriormente, los bosques contribuyen a la infiltración de agua, y con ello retroalimentan los mantos freáticos. En esta sección se estima el valor social que tiene el servicio ambiental de los bosques en dicho sentido, a través de mostrar los resultados del ejercicio de valoración contingente.

El Anexo 8 muestra la estadística descriptiva de las variables consideradas en el estudio, donde puede apreciarse que la mayoría son dicotómicas (o variables *dummy*). El total de entrevistas válidas fue de 771, luego de descartar las respuestas de 'no sé' del estudio. Dos variables presentan una alta dispersión, como la cantidad ofertada (o BID) y la edad de los entrevistados.

Se estimaron dos modelos logísticos (*probit*). En el primero no fueron consideradas las variables correspondientes a los municipios, para poder así estimar una WTP agregada. En el segundo, se agregaron los municipios, con lo que se perseguía estimar alguna influencia a nivel municipal.

El Cuadro 19 presenta los resultados de la estimación, donde se muestra que para los dos modelos resultaron estadísticamente significativas las variables BID inicial, edad, escolaridad y segunda oferta (segundo BID). De estas variables, el BID y la segunda oferta no tienen una explicación económica, sino que sus valores son usados para la estimación de la WTP final.

El mismo cuadro sugiere que los más jóvenes son los que tienen una mayor disponibilidad a pagar, de casi 1.4% más por grupo etéreo. De igual forma, a mayor educación, la disponibilidad a pagar tiende a subir, casi en el orden de un 5.5% por nivel educativo formal ganado. Es de resaltar que la variable género no fue significativa, pero el signo negativo sugiere que las mujeres pueden tender a una mayor disponibilidad de pago por la conservación.

De igual forma, aunque el nivel socioeconómico no es significativo, el signo positivo de la estimación sugiere que la población más pobre tiene una WTP mayor. Al bajar un quintil en el nivel de ingreso, la disponibilidad a pagar por la conservación y provisión de agua aumenta entre un 4% y 6%. Esto podría deberse a que la población con menos recursos es la que más problemas de agua presenta, por lo que la oferta de una mayor disponibilidad del recurso es llamativa para el usuario. Por su parte, los círculos con mayor poder adquisitivo han resuelto el problema a través de conformar asociaciones o empresas, con las que aseguran la oferta de agua en sus hogares.

Cuadro 19
Resultados del análisis Probit de dos modelos de disponibilidad a pagar por la conservación de los bosques en la zona metropolitana de Guatemala

Variable	Modelo A		Modelo B	
	Estimado	Pr(> z)	Estimado	Pr(> z)
(Intercepto)	0.19826	0.673	4.43215	0.9616
BID	-0.01034	0.002(**)	-0.01016	0.0031 (**)
Nivel socioeconómico	0.04239	0.506	0.05936	0.3703
Edad	-0.01423	0.002(**)	-0.01646	0.0004(***)
Masculino	-0.12602	0.259	-0.10875	0.3353
Escolaridad	0.05457	0.000 (***)	0.04701	0.0005(***)
WTP (segunda oferta)	1.34020	< 2 e-16 (***)	1.34085	< 2 E-16(***)
¿Fueron preguntas difíciles?	-0.12868	0.573	-0.10779	0.6408
¿Cree posible el proyecto?	0.11462	0.164	0.11512	0.1675
Nivel de conocimiento	-0.02365	0.750	-0.02176	0.7732
Otros servicios ecológicos del bosque	-0.09324	0.582	-0.06561	0.7021
Proveedor empresa municipal	-0.02336	0.843	-0.09351	0.5141
¿Es suficiente el agua?	0.13472	0.275	0.16303	0.2059
Amatitlán			-4.07087	0.9648
Chinautla			-4.24803	0.9632
Fraijanes			-4.15924	0.9640
Guatemala			-4.05131	0.9649
Mixco			-4.04953	0.9649
Petapa			-3.90885	0.9662
San José Pinula			-3.83979	0.9668
San Juan Sacatepéquez			-4.47017	0.9613
San Pedro Sacatepéquez			-4.62029	0.9600
Santa Catarina Pinula			-4.14739	0.9641
Villa Nueva			-4.21642	0.9635
Villa Canales			-4.34943	0.9623
	Devianza nula: 1,029.60 con 769 grados de libertad		Devianza nula: 1,029.60 con 769 grados de libertad	
	Devianza residual: 790.36 con 757 grados de libertad		Devianza residual: 781.88 con 745 grados de libertad	
	AIC: 816.36		AIC: 831.88	

Códigos de significancia: 0 (***) 0.001 (**) 0.01 (*) 0.05 (.) 0.1 () |

Fuente: Elaboración propia.

Las variables restantes del Modelo A se refieren a preguntas para comprobar el grado de robustez de la estimación. Las preguntas: ¿fueron difíciles las preguntas? y ¿cree que es posible un proyecto como el presentado?, tenían como finalidad evaluar el nivel de votos de desconfianza sobre el escenario contingente elaborado. La baja significancia estadística de estas variables sugiere que hubo un buen nivel de entendimiento del escenario contingente por parte de los entrevistados. El signo positivo de la segunda pregunta (¿cree que es posible el proyecto?) abona a la hipótesis que el FONCAGUA se beneficiaría de la construcción de una institucionalidad fuerte para lograr una buena aceptación por parte de la población.

De igual forma, las variables relacionadas con el proveedor principal, o sobre el nivel de abastecimiento de agua, tenían como finalidad estimar alguna correlación entre estas variables y la WTP. De éstas, la que llama la atención es la pregunta: ¿es suficiente el agua que recibe en el hogar?, la cual, aunque tiene un nivel de significancia bajo ($\Pr(<|z|) = 0.2059$), sugiere que mientras más agua se tiene, la WTP puede ser hasta de un 13% mayor. Por su parte, en el Modelo B, el hecho que ningún municipio salga significativo, permite agregar la WTP individual hacia toda la población en estudio.

Los datos del Cuadro 19 fueron usados para la estimación de la WTP individual (según metodología expuesta en la sección 3), la cual se estimó en Q56.12 por mes, por hogar. El valor agregado (para un total de 586,160 familias), es de Q32.8 millones al mes y de Q394.7 millones anuales. Dado que la estimación se realizó para 10 años, es posible multiplicar el dato anual por dicha temporalidad, obteniendo un valor presente neto de Q2,425 millones. Esta cantidad puede asumirse como el valor de la conservación y reforestación de los bosques en la zona metropolitana de Guatemala para asegurar la provisión de agua en el presente, y ante un escenario de mayor escasez al año 2020.

¿Es rentable un programa de pago de servicios ambientales en la zona metropolitana? Para responder a dicha pregunta, se debe analizar el dato estimado previamente y compararlo, por lo menos, con los costos de reforestación y manejo. Es decir, si el valor de la conservación es mayor que los costos de manejo, entonces es factible un programa de manejo de las áreas verdes de la zona metropolitana de Guatemala. Para ello, se tomaron los montos actuales que paga el Programa de Incentivos Forestales (PINFOR) para reforestación y manejo de bosque natural.

El área a reforestar es de 39,831 hectáreas, mientras que para conservación existe un total de 21,244 hectáreas. Tomando los montos actuales, se requieren Q478.0 millones para reforestar y Q41.4 millones para conservación del bosque, haciendo un total de Q519.4 millones. Tomando en cuenta que el valor de la conservación es de por lo menos Q2,490 millones, puede asegurarse que el valor social de conservación de las áreas boscosas en la zona metropolitana es mucho mayor a los costos del manejo forestal sostenible. El Cuadro 20 resume los datos obtenidos en la valoración.

Cuadro 20
Comparación del valor de conservación y los costos de manejo
de los bosques en la zona metropolitana de Guatemala

Variable	Quetzales
Beneficios	
WTP individual (mensual/hogar)	Q 56.12
WTP agregada anual	Q 394,731,997
WTP por 10 años (VPN@10%) (A)	Q 2,425,457,243
Costos	
Conservación del bosque	Q 41,425,800
Reforestación	Q 477,972,000
Costo total (B)	Q 519,397,800
Diferencia (C= A-B)	Q 1,906,059,443

Fuente: Elaboración propia.

Cabe destacar que los datos mostrados en el Cuadro 20 subestiman el verdadero costo de oportunidad de la tierra en la zona metropolitana. Por ejemplo, en un estudio realizado por IARNA-URL (2012), se mostró que el cambio de uso de la tierra para fines de urbanización es un motor importante de deforestación en Guatemala.

Esto significa que para conservar los bosques de la zona metropolitana debe considerarse no únicamente el costo de conservar o plantar árboles, sino todos aquellos valores que harían que un propietario de bosque promueva su cambio de uso. Por ejemplo, una posible opción es la compra de tierra por parte de las municipalidades y la conformación de parques de conservación. El alto valor social de los bosques de la zona metropolitana sugiere que es posible proponer instrumentos de política novedosos que busquen el bien común.

2.5 Conclusiones y recomendaciones

El presente estudio muestra que los bosques tienen diversos valores, los cuales van desde bienes tangibles (como madera y leña), hasta valores de servicio, como la provisión de servicios ecosistémicos. Los bosques de la zona metropolitana de Guatemala son valorados por los servicios que prestan, tales como belleza escénica, provisión de aire puro y su contribución al ciclo hidrológico.

Se ha mostrado que sólo el valor de provisión de agua es mayor al valor de la madera en pie. Ello se debe a que la principal fuente de agua en la zona metropolitana es el agua subterránea. En este sentido, los bosques contribuyen a una mejor infiltración del agua de lluvia, y con ello, a una mayor disponibilidad del recurso en la zona.

Con respecto a la demanda y consumo de agua, el estudio mostró que el 61% de las extracciones de agua son para consumo de los hogares. Sin embargo, independientemente de la unidad que provee el servicio o el nivel socioeconómico, los hogares no logran suplir todas sus necesidades del líquido. Por ello se han visto en la necesidad de recurrir a medios alternos, como compra de agua en camiones (pipas) o bien, recolectar agua de lluvia. El déficit de agua se da incluso, independientemente de la tarifa de agua que se pague al proveedor.

Ante la situación de consumo, la población ve con optimismo la posibilidad de conservar las fuentes de agua y los bosques de la zona. En promedio, la población estaría dispuesta a pagar Q 56.12 por mes/hogar, para conservar y proteger el bosque. Por ello, el valor de los bosques (únicamente en su componente de conservación), equivale a Q 2,425 millones durante 10 años.

Los costos de reforestación y conservación del bosque en la zona metropolitana ascienden a Q519 millones. Esto significa que existen posibilidades reales para poder impulsar un instrumento de gestión como el FONCAGUA. Sin embargo, debe considerarse que uno de los principales competidores de la gestión de los bosques en la zona metropolitana es el crecimiento urbano. Esto implica que para conservar el bosque se requerirá no sólo de los costos de mantenimiento, sino de poder ofrecer a los actuales dueños del bosque alternativas competitivas reales. Una de las principales, es la compra de los terrenos en lugar de proveer incentivos económicos.

2.6 Referencias bibliográficas

1. Arrow, K., Solow, R., Portney, P., Learner, E., Radner, R. & Schuman, H. (1993). Report of the NOAA panel on contingent valuation. *Federal Register* 58: 4601-4614. Recuperado en noviembre de 2012, de: <http://www.darp.noaa.gov/pdf/cvblue.pdf>.
2. Barbier, E. (1998). Valuing environmental functions: tropical wetlands. In: E. Barbier. *The economics of environment and development. Selected essays*. UK: Edward Elgar Publisher.
3. Carson, R. & Hanemann, W. (2005). Contingent valuation. In: K.G. Mäler & J.R. Vincent. *Handbook of environmental economics* (2). Holland: Elsevier.
4. CATIE e INAB (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza e Instituto Nacional de Bosques). (2003). *Valoración económica, ambiental y social de daños ocasionados por incendios forestales durante 2003 en Guatemala* (Informe de consultoría realizado por O. Monterroso). Manuscrito no publicado, Guatemala.

5. de Groot, R., Wilson, M. & Boumans, R. (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological economics* 41 (3): 393-408.
6. EMPAGUA (Empresa Municipal de Agua). (2012). *Dato de transacciones con entes privados*. Manuscrito no publicado, Guatemala.
7. IARNA-URL y TNC (Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar y *The Nature Conservancy*). (2012a). *Análisis de la disponibilidad de agua en la región metropolitana de Guatemala: bases fundamentales para la gestión hídrica con visión a largo plazo*. Guatemala: Autor.
8. IARNA-URL y TNC (Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar y *The Nature Conservancy*). (2012b). *Elementos de análisis para caracterizar el estado y estimar el consumo de las aguas subterráneas en la zona metropolitana de Guatemala*. Guatemala: Autor.
9. IARNA-URL (Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar). (2012). *Análisis sistémico de la deforestación en Guatemala y propuesta de políticas para revertirla*. Manuscrito no publicado, Guatemala.
10. INE (Instituto Nacional de Estadística). (2004). *Proyecciones de población al 2020, con base en Censo 2002*. Guatemala: Autor.
11. Kleiber, C. & Zeilis, A. (2008). *Applied econometrics with R*. USA: Springer.
12. MEA (Millennium Ecosystem Assessment). (2005). *Ecosystems and human well-being: biodiversity synthesis*. Washington, DC.: World Resources Institute.
13. PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). (2011). *Cifras para el desarrollo humano: Guatemala* (Colección estadística departamental No. 1). Guatemala: Autor.
14. Venkatachalam, L. (2004). The contingent valuation method: A review. *Environmental impact assessment review* 24 (1): 89-124.
15. Whittington, D. (2002). Improving the performance of contingent valuation studies in developing countries. *Environmental and resource economics* 22 (1-2): 323-367.

Anexos

Anexo I
Abreviaturas de la ecuación del balance hidrológico

Abreviatura	Significado
J	Área fraccional
Sw	Capacidad de campo
T	Tiempo
P _e	Precipitación
PET	Evapotranspiración potencial
k _c	Coefficiente de cultivo
z _l	Almacenamiento relativo de agua en el suelo (% de la capacidad de campo)
RRF	Factor de resistencia a la escorrentía
K	Conductividad hidráulica saturada
F	Dirección preferencial de flujo

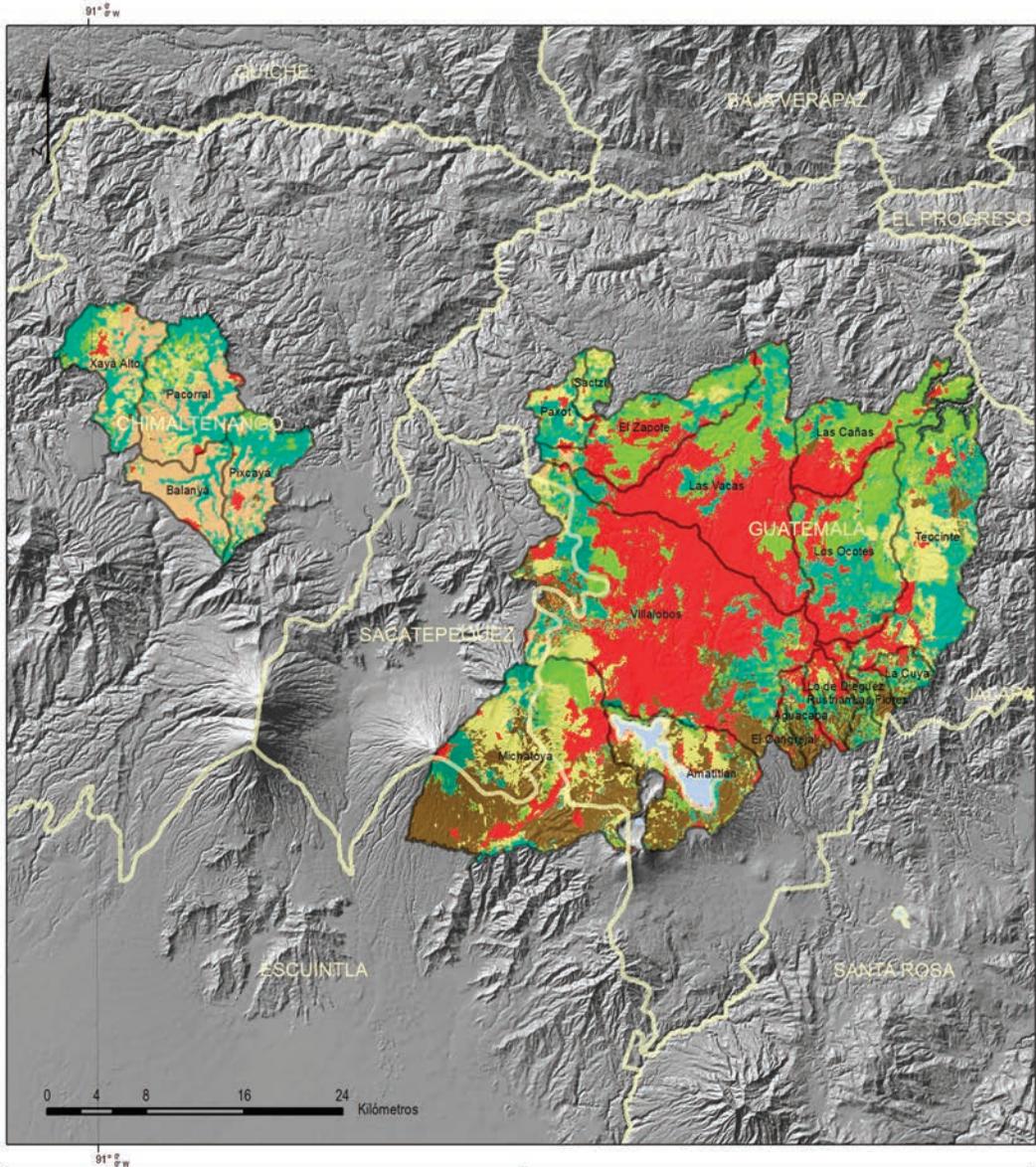
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2
Microcuencas vinculadas a la zona metropolitana

Microcuenca	Cuenca	Cuenca mayor	Área (ha)
Aguacapa	Aguacapa	Maria Linda	1,621.5
Amatitlán	Michatoya	Maria Linda	8,451
Balanyá	Pixcayá	Motagua	3,915.5
El Cangrejal	Maria Linda	Maria Linda	660.1
El Zapote	Las Vacas	Motagua	7,255.5
La Cuya	Pinula	Los Esclavos	1,340.6
Las Cañas	Plátanos	Motagua	6,330.3
Las Flores	Pinula	Los Esclavos	884.5
Las Vacas	Las Vacas	Motagua	15,870.3
Lo de Diéguez	Las Cañas	Los Esclavos	1,522.4
Los Ocotes	Plátanos	Motagua	10,331.8
Michatoya	Michatoya	Maria Linda	20,673.4
Pacorral	Pixcayá	Motagua	7,543.6
Paxot	Pixcayá	Motagua	2,217.8
Pixcayá	Pixcayá	Motagua	4,749.5
Rustrián	Las Cañas	Los Esclavos	2,015
Sactzí	Pixcayá	Motagua	1,251.1
Teocinte	Plátanos	Motagua	12,781.1
Villalobos	Villalobos	Maria Linda	31,012.5
Xayá alto	Xayá	Coyolate	5,687.7

Fuente: Elaboración propia.

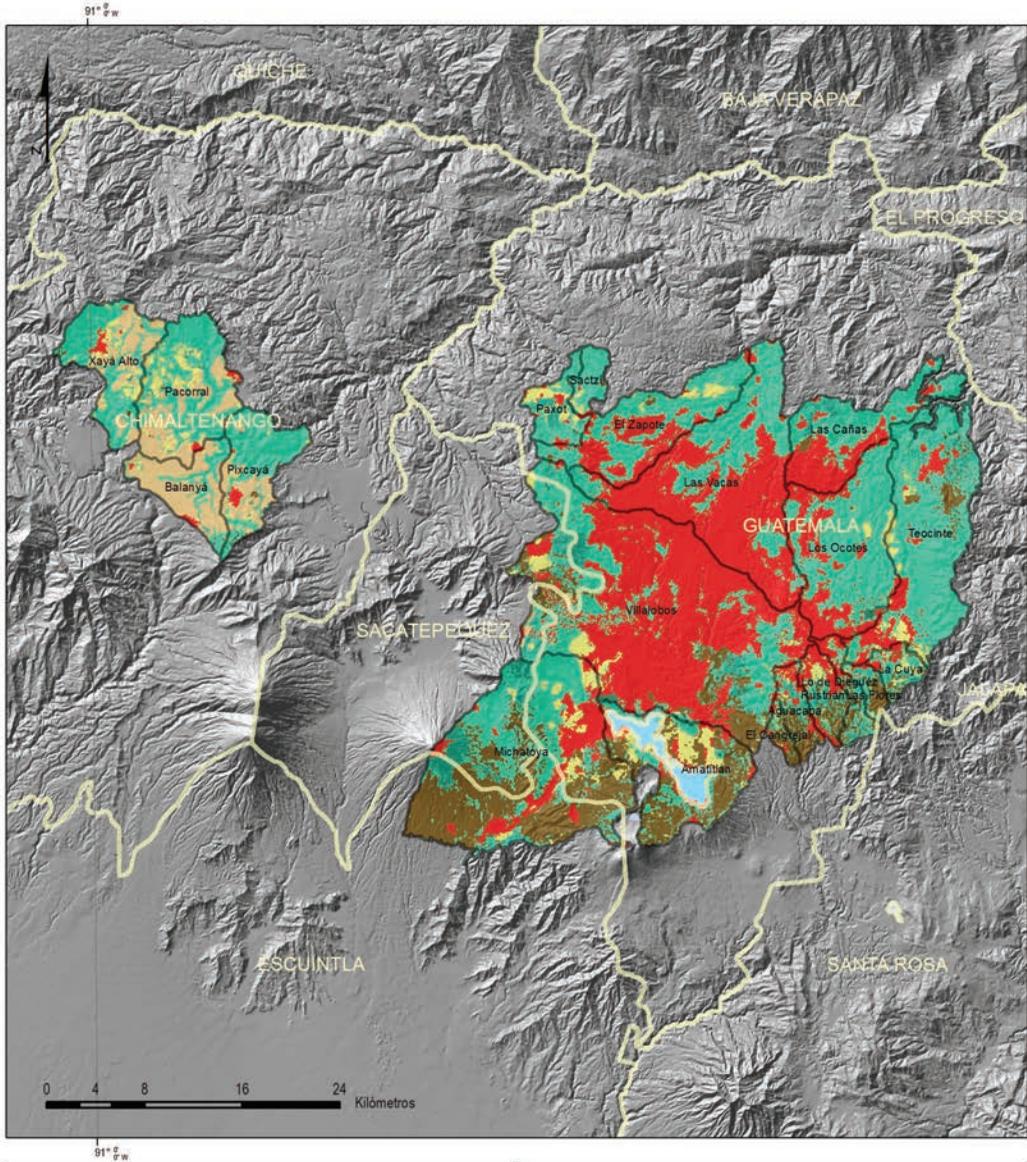
Anexo 3 Mapa de uso actual de la tierra



<p>ESTIMACIÓN DE LA OFERTA HIDROLÓGICA EN LA ZONA METROPOLITANA DE GUATEMALA</p> <p>Universidad Rafael Landívar (URL) Vicerrectoría de Investigación y Proyección Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (IARNA)</p>		<p>Mapa de uso de la tierra actual (2003)</p>	
<p>Legenda</p> <ul style="list-style-type: none"> Límites departamentales Límites de cuencas Cuerpo de agua Área Urbana/suelos desnudos Pastos naturales y arbustos Bosque Mixto Bosque de Latifoliadas Bosque de Coníferas Café Hortalizas Granos básicos 			
<p>Proyección del mapa digital: UTM, zona 15, DATUM WGS 84. Proyección del mapa impreso: Coordenadas geográficas, Esferoide de Clarke 1866.</p>	<p>Fuente: Elaboración propia MAGA, 2006 Elaborado por: Laboratorio SIG IARNA Guatemala, 2012</p>		

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 4 Mapa de uso de la tierra con reforestación



<p>ESTIMACIÓN DE LA OFERTA HIDROLÓGICA EN LA ZONA METROPOLITANA DE GUATEMALA</p> <p>Universidad Rafael Landívar (URL) Vicerrectoría de Investigación y Proyección Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (IARNA)</p>		<p>Mapa de uso de la tierra en el escenario con reforestación</p> <p>Legenda</p> <ul style="list-style-type: none"> Límites departamentales Límites de cuencas Cuerpo de agua Área Urbana/suelos desnudos Bosque Mixto Bosque de Latifoliadas Bosque de Coníferas Café Hortalizas Granos básicos 	
<p>Proyección del mapa digital: UTM, zona 15, DATUM WGS 84. Proyección del mapa impreso: Coordenadas geográficas, Esferoide de Clarke 1866.</p>	<p>Fuente: Elaboración propia MAGA, 2006</p> <p>Elaborado por: Laboratorio SIG IARNA Guatemala, 2012</p>		

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 5

Introducción encuesta

Universidad Rafael Landívar
Vicerrectoría de Investigación y Proyección
Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (IARNA)
Programa de Opinión Pública (POP)

Boleta de encuesta

Valoración de los bosques para conservación y producción de
agua en la zona metropolitana de Guatemala

Presentación del encuestador

Llenar POP

Introducción

La presente encuesta es para saber su opinión sobre la conservación del agua, los bosques que proveen agua y cómo podemos conservar los recursos en la zona metropolitana de Guatemala.

Datos (mostrar mapas):

- Diversos estudios han estimado que los bosques ayudan a conservar las fuentes de agua.
- La zona metropolitana de Guatemala se abastece principalmente de agua de pozos subterráneos. Menos del 30% de la zona metropolitana viene de ríos, como el acueducto Xayá-Pixcayá. Por ello, el agua subterránea es importante para la población.
- En los barrancos y en la parte alta de las montañas de la zona metropolitana de Guatemala existen 30,400 manzanas con bosque (equivalente a 27,000 canchas de fútbol). Con ello se infiltra a los pozos subterráneos un total de 214.5 millones de metros cúbicos de agua al año, con lo que tomamos agua más de dos millones de personas.

- En el futuro, debido al cambio climático, se espera que llueva menos en la zona metropolitana. Si mantenemos todos los bosques (las 30,400 manzanas), para el 2020 se infiltrarán 195.6 millones de metros cúbicos, lo que representa un 10% menos de lo que se infiltra hoy. Esto afectará los pozos que abastecen a la zona metropolitana.
- En la zona metropolitana aun existen áreas que podrían reforestarse. Si reforestamos un total de 57,000 manzanas, se infiltrarán 206.7 millones de metros cúbicos, lo que representa una disminución del 5% únicamente.

Escenario hipotético

Ahora, le haremos una serie de preguntas, las cuales son un **experimento**. Diversas organizaciones están creando el Fondo para la Conservación del Agua de la Zona Metropolitana de Guatemala (FONCAGUA); las instituciones son empresas privadas, organizaciones internacionales y universidades (como la Universidad Rafael Landívar). El FONCAGUA tendrá como objetivo conservar y reforestar áreas para la conservación del agua en la zona metropolitana. Pero para poder conservar y reforestar, el FONCAGUA **necesita** recursos financieros para llevarlo a cabo.

Imagine que se pide la opinión de todos los que habitamos en la zona metropolitana para evaluar si se hace un nuevo impuesto con lo cual llevar a cabo el Proyecto de conservación y reforestación de bosques para producción de agua. Para ello debemos votar con un “sí” o un “no” al respecto. Usted puede estar seguro de que el 100% del dinero se usará para el proyecto. El nuevo impuesto se cobraría durante 10 años y la forma de pago será a través de su factura mensual de agua.

Al tomar su decisión, debe tomar en cuenta que si usted acepta el pago, su ingreso se reducirá para la compra de otras mercancías útiles para usted.

Debe tomar en cuenta que puede proveerse de agua de otras maneras, por ejemplo, comprando garrafones, contratando pipas de agua, recolectando agua de lluvia. Pero considere que el problema del agua es de los que habitamos en la ciudad, y tarde o temprano tendremos problemas serios para abastecernos del vital líquido.

Anexo 6

Boleta de encuesta

Universidad Rafael Landívar
Vicerrectoría de Investigación y Proyección
Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (IARNA)
Programa de Opinión Pública (POP)

–Boleta de encuesta–
 Valoración de los bosques para conservación y producción de agua
 en la zona metropolitana de Guatemala

Correlativo boleta: _____ Municipio: _____

Cantidad (bid) : _____ Lugar: _____

Encuestador: _____ Estrato: _____

Verificación lugar de residencia

0. ¿En qué municipio reside usted?

Amatitlán	San José Pinula
Chinautla	San Juan Sacatepéquez
Fraijanes	San Pedro Sacatepéquez
Guatemala	Santa Catarina Pinula
Mixco	Villa Nueva
Petapa	Villa Canales

A. Datos generales

1. Edad:	2. Sexo:	3. Escolaridad
1.1 18-30	2.1 Masculino	3.1 No sabe leer
1.2 31-40	2.2 Femenino	3.2 Ninguna –sí sabe leer
1.3 41-50		3.3 Primaria
1.4 Más de 51		3.4 Secundaria
		3.5 Bachillerato
		3.6 Universidad
		3.7 Postgrado

Nota: Contar la historia del agua y el caso hipotético

B. Disponibilidad a pagar

4. Los bosques de la zona metropolitana de Guatemala proveen agua a la población. Se estima que si para el 2020 logramos conservar el bosque existente (28,333 hectáreas) y si reforestamos otras 40,000 hectáreas, perderíamos 5% de la capacidad actual de extracción de agua y no el 10% o más.

¿Estaría usted dispuesto(a) a pagar la cantidad de Q_____ mensuales, adicionales a su factura de agua, durante 10 años, para CONSERVAR 40,000 manzanas y REFORESTAR 57,000 manzanas en las áreas que proveen agua a la zona metropolitana de Guatemala?

- 4.1 Sí
 4.2 No
 4.3 No sabe

5. Segunda pregunta: aumentar Q10 (si dijo SI) o bajar Q10 (si dijo NO). ¿Y estaría usted dispuesto(a) a pagar la cantidad de Q _____ mensuales, durante 10 años?
- 5.1. Sí
5.2. No
5.3. No sabe

C. Por qué de su disposición de pago

6. ¿Por qué sí (o por qué no) pagaría por la **CONSERVACIÓN** y la **REFORESTACIÓN** del bosque que provee agua a la zona metropolitana de Guatemala?

Por qué SI

- 6.1. Tenemos que hacer algo
6.2. Evitar problemas futuros de agua
6.3. Es algo que debemos cuidar
6.4. Otra _____

Por qué NO

- 6.5. No tengo dinero
6.6. No tengo agua
6.7. No me interesa
6.8. Es obligación del Gobierno
6.9. Otra _____

7. ¿Cree usted que las preguntas hasta este momento han sido difíciles de contestar?

- 7.1. Sí
7.2. No

D. Sobre la conservación

8. ¿Cree usted que exista alguna organización (nacional o internacional), ya sea privada, social o estatal, que pueda llevar a cabo un proyecto como el que hemos señalado?

- 8.1. Sí
8.2. No
8.3. No sabe

9. ¿Cómo calificaría su conocimiento o información sobre el problema de agua en la zona metropolitana de Guatemala?

- 9.1. Muy bueno (tengo mucha información)
9.2. Intermedio, necesito saber más
9.3. No tengo mucha información
9.4. No responde

10. ¿Cree usted que la conservación de los bosques para proveer agua a la gente es algo bueno?

- 10.1. Sí ¿Por qué? _____
10.2. No ¿Por qué? _____
10.3. No sabe

11. Además del AGUA, ¿cree usted que obtiene algún beneficio directo adicional por la protección de los bosques que están en los barrancos y en las partes altas de la zona metropolitana de Guatemala?

- 11.1. Sí: ¿Cuáles? _____
11.2. No
11.3. No sabe

E. Sobre el consumo de agua

12. ¿Quién le provee el servicio de agua en su hogar?
- 12.1. Servicio municipal
12.2. Servicio privado o pozo en el residencial/colonia donde habito
12.3. Pozo propio en mi casa
12.4. Compró el servicio en pipa
12.5. Recolecto agua de lluvia
12.6. Otro: _____
13. Además del proveedor principal de agua, ¿tiene la necesidad de abastecerse de agua con alguna de las fuentes siguientes?
- 13.1. Compró el servicio en pipa
13.2. Recolecto agua de lluvia
13.3. Llena-cántaros (chorro en el barrio/colonia)
13.4. Otro _____
14. ¿Tiene cisterna, tinaco, toneles o algún otro depósito para guardar agua durante los días que no tiene servicio?
- 14.1. Sí
14.2. No
15. ¿Es suficiente el agua que llega a su casa para satisfacer las necesidades del hogar (ejemplo, para cocinar, aseo personal, aseo de la casa)?
- 15.1. Sí
15.2. No
16. ¿Le llega agua todos los días del mes? ¿Cuántos días recibe agua?
- 16.1. Todos los días del mes (30 días)
16.2. Más de dos semanas, pero falta unos cuantos días al mes (de 15 a 30 días por mes)
16.3. Menos de 15 días por mes
16.4. No sabe/no responde
17. Cuando le llega agua a su casa, ¿recibe agua durante todo el día?
- 17.1. Sí
17.2. No
17.3. No sabe/no responde

Anexo 7
Ubicación de los lugares encuestados,
según municipio, colonia y estrato socioeconómico

Municipio	Colonia y/o zona			
	Alto	Medio	Medio bajo	Bajo
Guatemala	Zona 10, Okland	10 Zona 13, Aurora II	10 Zona 7, Colonia Landívar	10 Zona 6, La Pedrera
	Vista Hermosa I	10 Zona 11, Mariscal	10 Zona 5, Ciudad Olímpica	10 Zona 6, La Línea
	Vista Hermosa II	10 Zona 7, Ciudad de Plata II	15 Zona 21, Nimajuyú	10 Zona 13, Colonia Santa Fe
	Vista Hermosa III	10 Villa Linda	5 Zona 21, Venezuela	10 Ave. Simeón Cañas final, zona 2
	Vista Hermosa IV	15 Tikal I	5 Zona 6, Proyectos	25
	Residenciales Villas de Alcala, zona 2	5 Villa Sol, zona 12	10 Zona 12, La Reformita	20
			Zona 7, Colonia Centroamérica	5
			Zona 6, Diagonal 13	5
			Zona 2, San Antonio	10
			Zona 2, Colonia El Cerrito	10
			Zona 18, Colonia Atlántida	15
			Zona 1, Ira a 3ra ave y entre 1ra y 5ta calle	5
Mixco	Colonia Balcones	10 Colonia Molino las Flores	10 Monte Verde	10 Lotificación San José Las Rosas
	Atrás de Burger King	10 Montserrat I y II	15 La Florida	10 Zona 1 de Mixco, Colonia Tinco
	Pinares de San Cristóbal	5 Panorama	5 Belén	10 Ave. Empagua
	San Cristóbal entre 11 calle y 8va calle	5	Residencial las Buganvillas, San Francisco	10 Ciudad Satélite
			La Brigada	10
		Lomas de Portugal	10	
		Santa Bárbara	5	

Continúa...

Continuación del anexo 7

Municipio	Colonia y/o zona				Bajo		
	Alto	Medio	Medio bajo	Bajo			
Villa Nueva		San José Villa Nueva	10	Altos de Bárcenas II y III	25	COVITIGGS	10
		Altos de Monte María	10	Residenciales Catalina	10	Altos de Bárcenas I, II o III	5
		Colonia Eterna Primavera	5	El Frutal I y II	10	Alrededores Plaza Villa Nueva, Zona I VN	5
		Altos de Bárcenas I, II o III	5	COVITIGGS	10		
				Residenciales Villa Lobos	5		
San Juan Sacatepéquez				Residenciales Villa Nueva	10		
		Ciudad Quetzal	10	Cementerio Sajavilá	30	Ciudad Quetzal	10
San Miguel Petapa		Fuentes del Valle	10	Rivera del Río	10	Santa Inés	5
				Zona I, alrededores del mercado	10		
Villa Canales		Residenciales Agua Santa	5	Boca del Monte, centro	20	Boca del Monte, alrededores del centro	5
Chinautla		Centro Chinautla	5	Jocotales	20	Jocotales	5
Santa Catarina Pinula	Panorama		5	Cristo Rey	10	Cristo Rey	5
				Piedraprada	0	Piedraprada	0
				Ciénaga Grande	0	Ciénaga Grande	0
San José Pinula	Residenciales San José Valle de Navarra		5	Residenciales San José	10	Afuera de los residenciales	5
		La Mariposa	5	Centro Amatitlán La Mariposa	10	La Mariposa	5
Fraijanes					5		
	Colonia Santiago de Compostela		5	Pueblo de Fraijanes Lo de Diéguez	5	Lo de Diéguez	5
San Pedro Sacatepéquez		El Aguacate Centro	5	El Aguacate Centro	5	El Aguacate Centro	5
			0		0		0
Total			105	170	405		120

Anexo 8

Estadística descriptiva de las variables analizadas en la valoración contingente

Variable	Conteo	Media	Desviación estándar	Min.	Máx.
WTP-1	614	0.6645	0.4722	0	1
WTP-2	614	0.4853	0.4998	0	1
BID	614	48.0619	16.1625	10	70
Amatitlán	614	0.0407	0.1976	0	1
Chinautla	614	0.0277	0.1641	0	1
Fraijanes	614	0.0326	0.1775	0	1
Guatemala	614	0.3567	0.4790	0	1
Mixco	614	0.1743	0.3793	0	1
Petapa	614	0.0570	0.2318	0	1
San José Pinula	614	0.0407	0.1976	0	1
San Juan Sacatepéquez	614	0.0586	0.2349	0	1
San Pedro Sacatepéquez	614	0.0114	0.1062	0	1
Santa Catarina Pinula	614	0.0228	0.1493	0	1
Villa Nueva	614	0.1336	0.3402	0	1
Villa Canales	614	0.0456	0.2086	0	1
Nivel socioeconómico	614	2.6596	0.8840	1	4
Edad	614	40.3404	11.9069	24	55
Masculino	614	0.3567	0.4790	0	1
Escolaridad	614	10.4609	4.5377	0	19
¿Fueron preguntas difíciles?	614	0.0521	0.2223	0	1
¿Cree posible el proyecto?	614	0.7980	0.6393	0	2
Nivel conocimiento sobre el problema de agua	614	2.2003	0.7178	0	3
Cree que hay otros servicios ecológicos del agua	614	0.9739	0.3318	0	2
Empresa municipal como principal proveedor	614	0.7264	0.4458	0	1
¿Es suficiente el agua?	614	0.7655	0.4237	0	1

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 9

Elementos de análisis para caracterizar el estado y estimar el consumo de las aguas subterráneas en la zona metropolitana de Guatemala

Coordinación

Juventino Gálvez, *IARNA-URL*

Investigadores y preparación del capítulo

Fernando Samayoa (investigador principal), *IARNA-URL*

Nils Saubes, *IARNA-URL*

Sistemas de Información Geográfica

Gerónimo Pérez, *IARNA-URL*

I. Introducción

La zona metropolitana de Guatemala se encuentra directamente influenciada por 16 microcuencas hidrográficas, en 12 municipios. Desde la fundación de sus ciudades, se aprovecharon fuentes hídricas superficiales y subterráneas para suplir las necesidades de una población que, al ir creciendo, provocó un mayor aprovechamiento de agua subterránea a través de pozos manuales y mecánicos, que actualmente han incrementado su profundidad y cantidad. Inicialmente, este tipo de aprovechamiento afectó a los acuíferos superiores o libres dada su facilidad de acceso (profundidad), pero posteriormente se utilizaron acuíferos más profundos, presentes en las formaciones geológicas de la zona.

Derivado del problema de escasez que rápidamente se manifestó en la ciudad capital, a partir de 1961 el gobierno central y la municipalidad de Guatemala realizaron estudios para buscar nuevas soluciones. En 1978 se terminó de construir el acueducto Xayá-Pixcayá, el cual tiene como fin aprovechar cuencas hidrográficas importantes, cuyas aguas son conducidas hacia plantas de tratamiento, a través de obras de captación como presas, derivadores y embalses, para atender las necesidades de consumo humano.

En la década de los noventa, el abastecimiento de agua en el municipio de Guatemala provenía en un 40% de fuentes subterráneas y en un 60% de fuentes superficiales. Desde 2001, y con la puesta en marcha del proyecto de pozos denominado Emergencia I, la mitad del abastecimiento manejado por la Empresa Municipal de Agua (EMPAGUA) proviene de fuentes subterráneas (principalmente de los pozos de la zona denominada Ojo de Agua), y la otra mitad de fuentes superficiales (principalmente de las aguas del acueducto Xayá-Pixcayá). En el resto de los municipios de la zona metropolitana, la mayor parte del abastecimiento proviene de fuentes subterráneas.

Actualmente, el agua subterránea abastece parte de las áreas urbanas, rurales, industriales y actividades de riego, y se estima que cubre entre el 60% y el 70% de la demanda de la zona metropolitana.

Para la elaboración del presente anexo, que se encuentra dentro del marco de los programas de investigación del IARNA-URL: “Situación y tendencias del ambiente natural” y “Socioeconomía ambiental de Guatemala”, se colectó y analizó la información (estudios y bases de datos disponibles) relacionada con la hidrogeología local y el aprovechamiento del agua subterránea en la zona metropolitana. Posteriormente, se realizaron encuestas a las municipalidades de esta zona, siendo éstas: San Juan Sacatepéquez, San Pedro Sacatepéquez, Mixco, Chinautla, Guatemala, Santa Catarina Pinula, San José Pinula, Villa Nueva, Villa Canales, San Miguel Petapa, Amatitlán y Fraijanes.

Finalmente, el análisis e interpretación de la información recopilada permitió establecer una caracterización hidrogeológica de la zona metropolitana de Guatemala y la estimación preliminar del consumo del agua subterránea en las diferentes cuencas que están relacionadas con los municipios que forman parte de esta zona.

2. Conceptos básicos

2.1 Ciclo hidrológico y aguas subterráneas

La disponibilidad del agua subterránea está íntimamente relacionada con la dinámica del ciclo hidrológico (Figura 28), que tiene como principales componentes: la evaporación, la precipitación, la evapotranspiración y la infiltración.

Esta dinámica da origen tanto a las aguas superficiales, como a las subterráneas, las cuales se encuentran en diferentes acuíferos que se alimentan por infiltración a través de las zonas de recarga de las cuencas hidrográficas (Figuras 4 y 29).

2.2 Geología y aguas subterráneas

Las formaciones geológicas en la República de Guatemala están constituidas por rocas volcánicas, metamórficas y sedimentarias, las cuales han sido afectadas en el tiempo por los diferentes periodos geológicos. Estas formaciones se constituyen en la zona de recepción de las precipitaciones y, dependiendo de la composición y características de los suelos (como su estado estructural), propiciarán la infiltración del agua hacia los acuíferos. Por ello, es importante el conocimiento de la geología regional (Figura 30).

La hidrogeología es la ciencia que estudia el comportamiento de las aguas subterráneas para poder interpretar su ocurrencia y presencia en los acuíferos de diferentes regiones (Figura 31).

Existen diferentes tipos de acuíferos, cuya formación ha dependido de los tiempos geológicos, la precipitación, la infiltración y la dinámica de la corteza terrestre:

- Acuíferos libres.
- Acuíferos colgados.
- Acuíferos semi confinados.
- Acuíferos confinados.

Por su dinámica de formación, y si se admite que reciben agua de la precipitación (aunque puede recibirla por otras vías), en estos acuíferos se pueden definir tres zonas (Figura 32):

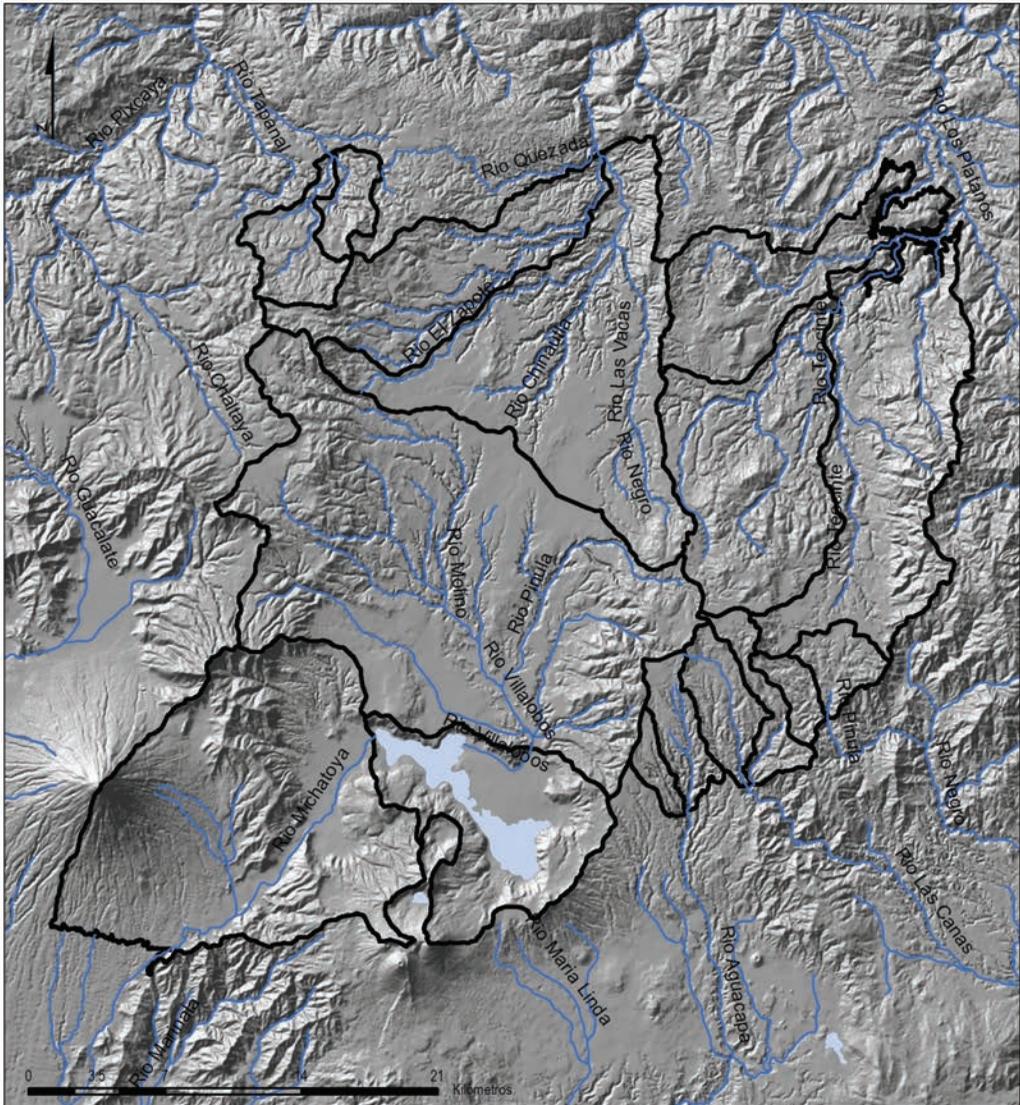
- Alimentación o recarga.
- Circulación o almacenamiento.
- Descarga.

Figura 28
El ciclo hidrológico



Fuente: Elaboración propia con base en U.S. Geological Survey (s.f.).

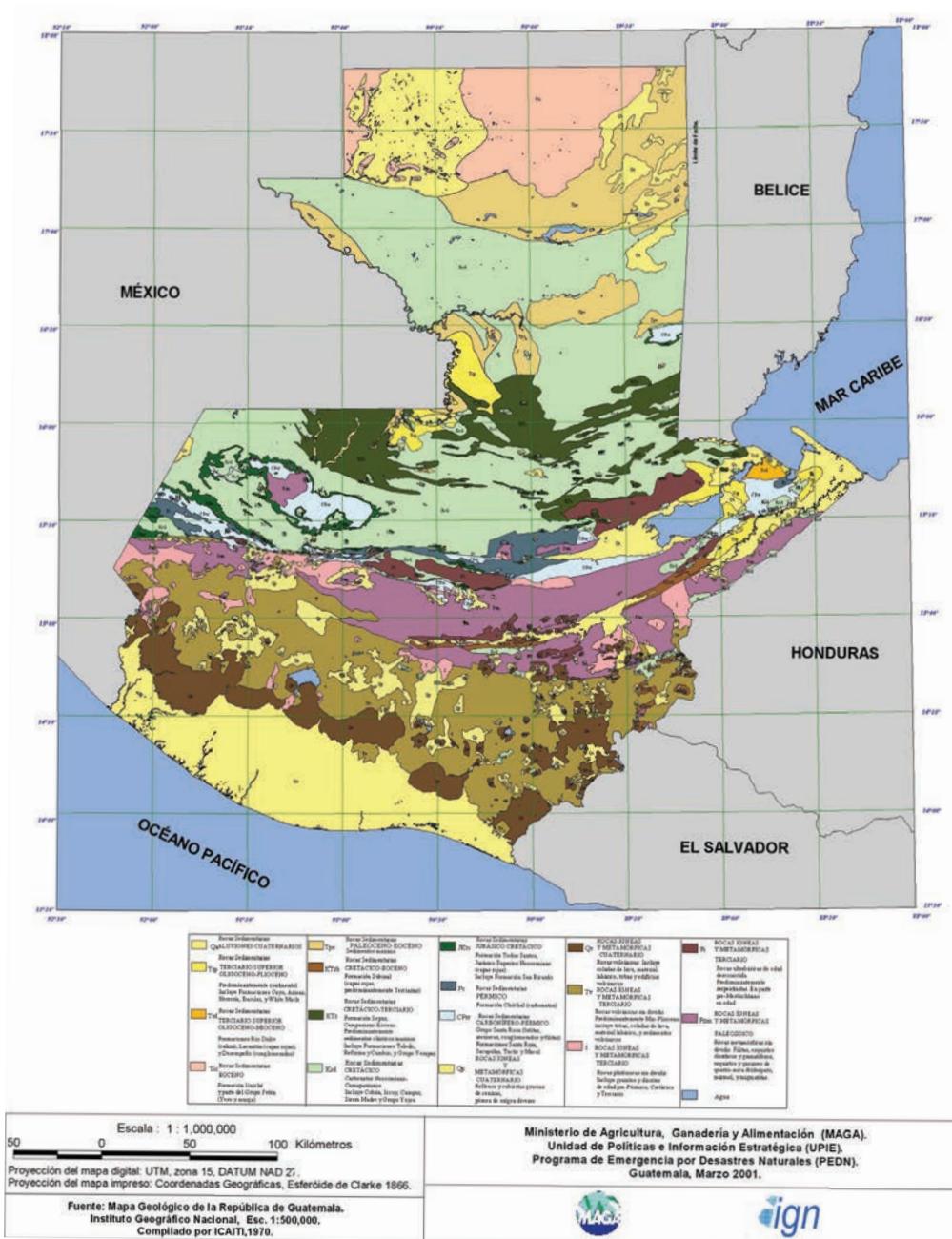
Figura 29
Red hidrográfica de la zona metropolitana



<p>ESTIMACIÓN DE LA OFERTA HIDROLÓGICA EN LA ZONA METROPOLITANA DE GUATEMALA</p> <p>Universidad Rafael Landívar (URL) Vicerrectoría de Investigación y Proyección Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (IARNA)</p>		<p>Hidrología lineal</p>	
<p>Leyenda</p> <p>— Hidrografía lineal</p>		<p>■ Cuerpo de agua</p> <p>▭ Límites de subcuencas</p>	
<p>Proyección del mapa digital: UTM, zona 15, DATUM WGS 84. Proyección del mapa impreso: Coordenadas geográficas, Esferoide de Clarke 1866.</p>	<p>Fuente: Elaboración propia MAGA, 2006</p> <p>Elaborado por: Laboratorio SIG IARNA Guatemala, 2012</p>	<p>Universidad Rafael Landívar</p>	<p>iarna Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente</p> <p>Red de los Países Bajos</p>

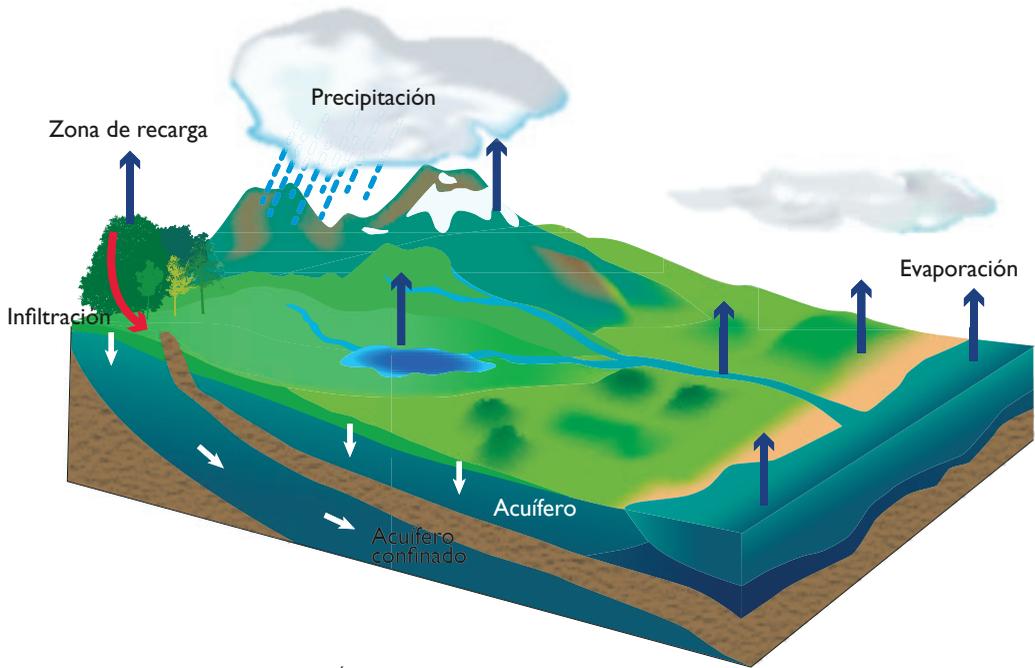
Fuente: Elaboración propia.

Figura 30
Mapa geológico de la República de Guatemala



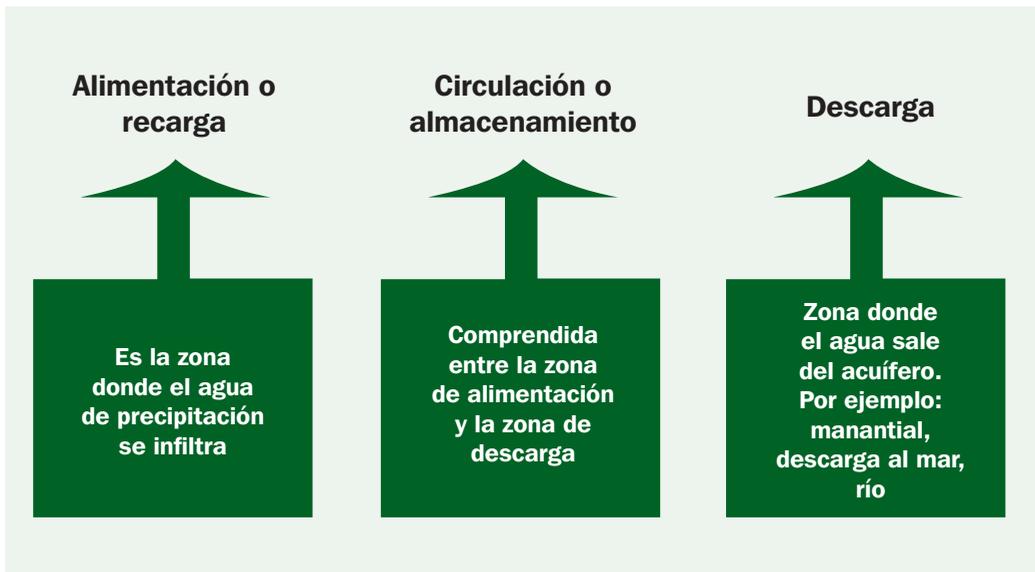
Fuente: MAGA e IGN (1970).

Figura 31
Hidrogeología-acuíferos



Fuente: USAC y Universidad Diego del Ávila (2012, agosto).

Figura 32
Zonas de un acuífero



Fuente: USAC y Universidad Diego del Ávila (2012, agosto).

3. Caracterización hidrogeológica de la zona metropolitana

3.1 Geología de la zona metropolitana

La zona metropolitana de Guatemala corresponde a la unidad de relieve comúnmente llamada *Valle de Guatemala* o *Valle de Ermita*. Desde el punto de vista de la geomorfología, la denominación “valle” para esta zona no es conveniente, ya que el relieve no es el resultado de la erosión fluvial, sino de una depresión tectónica de tipo graben. Dicha estructura está delimitada al oeste y al este por las fallas de Mixco y Pinula, respectivamente; al norte por los afloramientos de rocas intrusivas y metamórficas presentes alrededor de la falla del Motagua, y al sur por la falla de Jalpatagua que pasa alrededor del lago de Amatitlán.

El gradiente en la parte hundida, llamada graben (ciudad de Guatemala) y las partes levantadas, denominadas *horst* (altiplanos de San Lucas y San José Pinula), es de aproximadamente 500 metros. Esta depresión tectónica está drenada al norte por el río Las Vacas y sus tributarios, y hacia el sur por el río Villalobos. Ambos ríos corresponden a dos microcuencas, cuyo límite⁹ divide la parte central del denominado Valle de Guatemala.

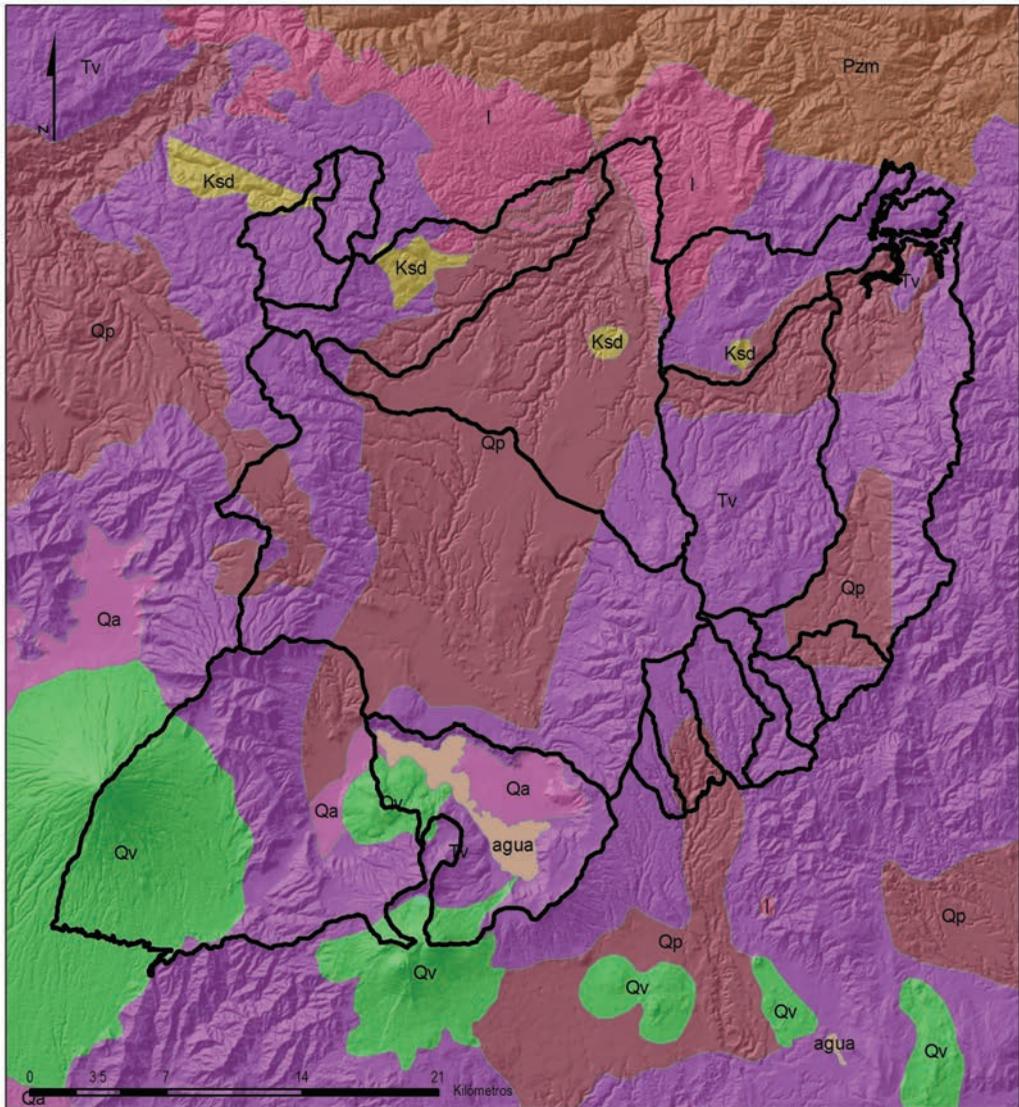
En esta zona existen varias formaciones geológicas, con sus particularidades en el ámbito de la hidrogeología y de los recursos hídricos subterráneos. Las formaciones geológicas que se describen a continuación, se encuentran presentes en las diferentes cuencas de la zona metropolitana y están constituidas por rocas volcánicas (extrusivas e intrusivas) y sedimentarias (Figura 33).

- KSD: roca sedimentaria (Cretácico): caliza gris, lutitas calcáreas, conglomerados, caliza café grisácea, lutitas inter estratificadas y brechas.
- Tv: rocas ígneas (Terciario): rocas volcánicas, tobas, coladas de lava, material lahárico y sedimentos volcánicos.
- I: rocas ígneas (Cuaternario): rocas intrusivas –principalmente granito–, diorita y granodiorita.
- Qp: rocas ígneas (Cuaternario): rellenos y cubiertas gruesas de cenizas pómez y depósitos piroclásticos.
- Qv: rocas ígneas (Cuaternario): rocas volcánicas, coladas de lava, material lahárico, tobas y edificios volcánicos.
- Qa: rocas sedimentarias (aluviones cuaternarios): aluvión cuaternario.

El basamento de la zona metropolitana está constituido en su mayor parte por lavas andesíticas, producto de la actividad volcánica del terciario (Tv). De manera más marginal, en la parte norte (cuenca del río Las Vacas) se encuentran afloramientos de rocas sedimentarias

⁹ Este límite también corresponde al parteaguas entre las vertientes del Pacífico y del Caribe.

Figura 33
Mapa geológico superficial de la zona metropolitana



<p>ESTIMACIÓN DEL CONSUMO DE AGUA EN LA ZONA METROPOLITANA DE GUATEMALA</p> <p>Universidad Rafael Landívar (URL) Vicerrectoría de Investigación y Proyección Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (IARNA)</p>		<p>Geología</p>	
		<p>Leyenda</p> <p> Cuerpo de agua</p> <p> Límites de cuencas</p>	
Proyección del mapa digital: UTM, zona 15, DATUM WGS 84. Proyección del mapa impreso: Coordenadas geográficas, Esteroide de Clarke 1866.	Fuente: Elaboración propia MAGA, 2006 Elaborado por: Laboratorio SIG IARNA Guatemala, 2012		

Fuente: Elaboración propia.

del cretácico (Ksd), que constituyen el basamento, por ser de mayor edad que las lavas del terciario.

Otra formación presente en la zona metropolitana (no representada en la Figura 33) corresponde a sedimentos fluvio-lacustres del cuaternario, los cuales se encuentran en la parte sur de la zona metropolitana (cuenca del río Villalobos), y fueron depositados por el paleo lago de Amatitlán y los paleo cauces de sus afluentes.

La mayor parte de graben (depresión) que ocupa la zona metropolitana está cubierto por los depósitos volcánicos del cuaternario (tefras o piroclastos), compuestos principalmente de pómez y cenizas volcánicas (Qp). Estos depósitos se originaron durante la formación de la caldera de Amatitlán, así como por las erupciones de los volcanes de Agua y Atitlán, y más recientemente del de Pacaya. Este relleno volcánico ha sido erosionado por los ríos del área, formando cañones, localmente denominados “barrancos”.

Finalmente, se encuentran depósitos aluviales del cuaternario (Qa), los cuales se ubican en los valles y riberas de los principales ríos actualmente presentes en la zona. Dichos aluviones corresponden, en general, a sedimentos secundarios de los materiales volcánicos (relleno volcánico) movilizados por los ríos, sobre todo durante los episodios de crecida.

3.2 Características hidrogeológicas de las formaciones geológicas presentes en la zona metropolitana

Las formaciones geológicas que conforman el basamento de la zona metropolitana pueden tener una permeabilidad primaria (porosidad) o secundaria (fracturas, fisuras, karstificación, etc.). Ello, más su estructura, dictan las características de los recursos hídricos subterráneos disponibles y explotables.

En dichas formaciones se han conformado diferentes tipos de acuíferos.

3.3 Acuíferos en rocas volcánicas fracturadas (Terciario)

Los eventos tectónicos desarrollados en el país han marcado la estructura geológica del valle de la ciudad de Guatemala y la zona metropolitana. La estructura en graben que comprende la parte superior y central de las cuencas hidrográficas del río Villalobos y del río las Vacas está delimitada lateralmente por una serie de fallas geológicas sobre las rocas volcánicas del Terciario, las cuales han desarrollado una importante red de fracturación.

Este sistema de fracturas (diaclasas) ha creado una permeabilidad secundaria importante. Es a través de estas fracturas que se almacena y circula el agua en este acuífero. Su extensión ha sido estimada en aproximadamente 550 km² (INSIVUMEH, IGN y ONU, 1978), y se supone que su espesor es mayor a 300 metros. Por lo tanto, esta unidad hidrogeológica constituye el mayor acuífero de la zona metropolitana.

La recarga de este acuífero ocurre mediante las precipitaciones que caen directamente sobre los afloramientos de lavas andesíticas (principalmente en las laderas oriental y oc-

cidental del graben), así como por la percolación desde el acuífero presente en el relleno volcánico. En efecto, los sedimentos superpuestos constituyen un buen medio para retener y alimentar estos acuíferos, ya que los espesores de relleno volcánico son extensos y profundos, propiciando la infiltración hacia los acuíferos formados en rocas volcánicas fracturadas.

Los estudios realizados para la cuenca del río Villalobos y la zona del Ojo de Agua muestran que las principales zonas de recarga para este acuífero están ubicadas alrededor de Mixco por un lado, y en las partes montañosas de Santa Catarina Pinula por otro lado (Herrera y Orozco, 2010).

Esta unidad hidrogeológica constituye un acuífero inferior, el cual subyace a otros acuíferos superiores (principalmente el acuífero del relleno volcánico, y en menor parte acuíferos en sedimentos fluvio-lacustres y aluviones cuaternarios). Ha sido evidenciado, al menos en la parte sur de la zona metropolitana, que dicho acuífero se encuentra en condiciones confinadas o semi-confinadas (Herrera y Orozco, 2010), lo cual se debe a que sobre él se encuentran piroclastos o sedimentos finos que son casi impermeables. Los análisis realizados a través de pruebas de bombeo en la zona del Ojo de Agua muestran que este acuífero es particularmente productivo (transmisividad entre 500 y 5,000 m²/día, para un coeficiente de almacenamiento de 8×10^{-3}).

Por otro lado, tanto el graben como el complejo de fallas del volcán de Pacaya y la fosa del lago de Amatitlán, constituyen una gran unidad hidrotermal de origen profundo y están relacionadas con otras fallas en la zona.

3.4 Acuíferos en rocas sedimentarias karstificadas y fracturadas (Cretácico)

En parte de la cuenca de los ríos Paxot, Sactzi, El Zapote, Las Vacas y Las Cañas, afloran formaciones sedimentarias del Cretácico (calizas). Aunque faltan estudios, se estima que dichas formaciones están cubierta por depósitos volcánicos (partes bajas), pero conforman un acuífero inferior (Empagua y Sogreah, 1990). Su estructura propicia una permeabilidad secundaria por fracturación y, en ciertos casos, por algún grado de karstificación, conformando acuíferos en calizas.

Las zonas karsificadas corresponden a las zonas más productivas del acuífero, y siempre están cubiertas por los depósitos volcánicos. En comparación, los afloramientos en sí corresponden generalmente a zonas con poco interés para la explotación de los recursos hídricos subterráneos (son pocos o insaturados).

En las zonas karstificadas del acuífero (presencia de cavernas), se ha evidenciado que la transmisividad es muy alta (1,728 m²/día), con caudales superiores a 50 l/s en los pozos, alcanzando, en ciertos casos, los 100 l/s. En comparación, en las zonas únicamente fracturadas, se ha estimado una transmisividad bastante baja, que oscila entre 6 y 173 m²/día (caudales de los pozos entre 5 y 25 l/s) (Empagua y Sogreah, 1990).

La recarga de estos acuíferos se encuentra directamente en los afloramientos fracturados y se da a través de la infiltración en las formaciones del relleno volcánico que están superpuestas a estas formaciones, propiciando la recarga de los acuíferos en calizas, que se encuentran a mayor profundidad.

El flujo de agua subterránea sigue principalmente las direcciones del drenaje superficial (río Las Vacas hacia el norte y río Los Ocotes hacia el noreste), y es muy probable que las principales zonas de recarga de este acuífero se ubiquen en la parte alta de la microcuenca del Zapote (área de San Pedro Sacatepéquez y Ciudad Quetzal), así como en la parte alta occidental de la cuenca del río Las Vacas (área del Encinal en Mixco) (Empagua y Sogreah, 1990).

3.5 Acuíferos en rocas sueltas del periodo Cuaternario (rellenos volcánicos, sedimentos y aluviones cuaternarios)

Los sedimentos cuaternarios que se han ido depositando sobre el basamento de las rocas volcánicas y sedimentarias del valle de la ciudad de Guatemala y zonas aledañas, han dado origen a dos tipos de formaciones, las cuales conforman el acuífero superior de la zona metropolitana.

El primero, corresponde a los materiales de origen volcánico, principalmente piroclásticos (arenas, bombas volcánicas, lapilli, cenizas, pómez y otros), transportados por el viento y depositados en estratos a diferentes profundidades. Se pueden observar intercalaciones de sedimentos volcánicos semi-consolidados de diferente transporte, paleosuelos y sedimentos fluviales y lacustres. Se estima que la extensión de esta formación alcanza 664 km², con espesores que varían desde algunos metros hasta más de 300. Las zonas de mayor profundidad se encuentran en la parte central del valle, alrededor del parteagua entre las cuencas de los ríos Villalobos y Las Vacas (INSIVUMEH, IGN y ONU, 1978).

Esta formación presenta características de permeabilidad primaria (porosidad). El agua en dicho acuífero se encuentra principalmente en condiciones libres, o semi-confinadas en menor escala. La permeabilidad varía en función de la granulometría de los materiales, ya que estos son heterogéneos. Se le atribuye una transmisividad entre 50 y 750 m²/día, y un coeficiente de almacenamiento de 0.09 (Herrera y Orozco, 2010).

Este acuífero ha sido y aún está siendo explotado de manera intensa hasta el **día de hoy, principalmente por su fácil acceso (profundidad menor)**; sin embargo, por sus características, no es sostenible considerarlo como fuente de abastecimiento a futuro. En efecto, desde el punto de vista hidrogeológico, dicho acuífero presenta niveles de productividad medios a bajos, y además, por ser de tipo libre, es particularmente vulnerable a la contaminación por percolación desde la superficie (ciudad de Guatemala). De hecho, esta formación juega un papel importante como capa purificadora para los acuíferos inferiores (lavas del terciario y rocas sedimentarias del cretácico). Finalmente, la recarga de este acuífero está fuertemente limitada hoy en día, ya que la mayor parte de su extensión se caracteriza por un uso de la tierra urbano.

El segundo tipo de formación corresponde a los aluviones del cuaternario, producto de la erosión de las aguas y del depósito de materiales arrastrados en los caminos de escurrimiento, y de los ríos de las cuencas que forman acumulación de arenas, gravas, limos y otros.

Estas formaciones propician los acuíferos **más superiores en la zona**, que son del tipo libres y colgados. Se encuentran principalmente en la parte sur de la zona, alrededor del lago de Amatitlán y el delta del río Villalobos.

Según estudios realizados, la transmisividad de estos acuíferos es muy alta, y varía entre 150 y 2,000 m²/día, para un coeficiente de almacenamiento de 0.20 (Herrera y Orozco, 2010). Por ello, se considera que estos acuíferos podrían ser muy productivos; sin embargo, dado que son de tipo libre, están particularmente contaminados (INSIVUMEH, IGN y ONU, 1978). Su principal fuente de recarga es la precipitación directa, así como la percolación desde el lecho de los ríos de la zona.

3.6 Consideraciones generales sobre el agua subterránea en la zona metropolitana y dirección estimada de su flujo

Como ha sido mencionado anteriormente, gran parte del abastecimiento de agua para diferentes usos en la zona metropolitana de Guatemala depende de los recursos hídricos subterráneos (acuíferos).

Acorde a los análisis e investigaciones realizadas, se determinó que existen acuíferos libres, colgados, semi confinados y confinados. Por lo mismo, se puede hablar de una zona multiacuíferos.

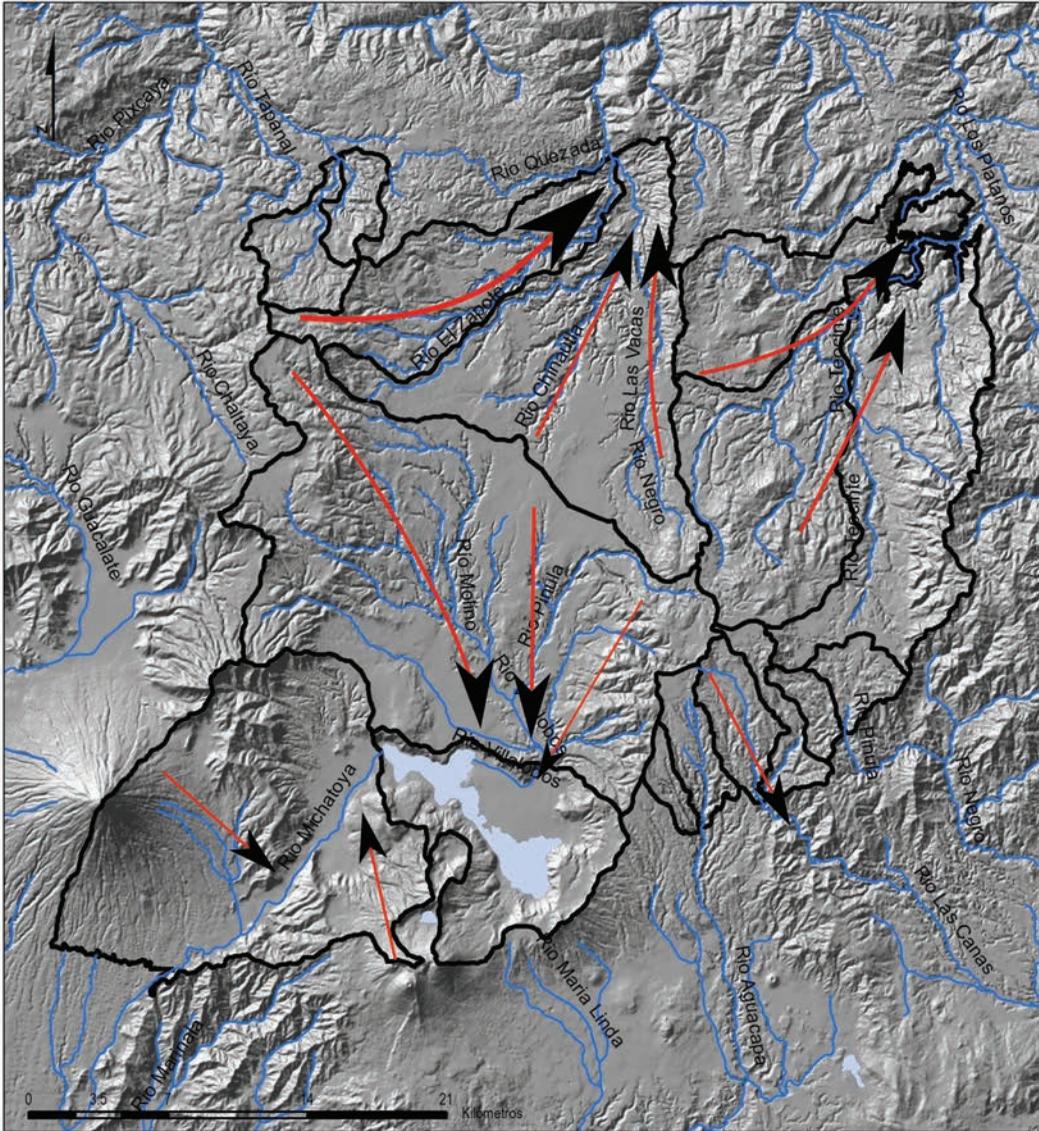
En el transcurrir del tiempo, los acuíferos que más han disminuido su potencial son los libres, principalmente en las zonas altas de las cuencas (zonas de recarga de los acuíferos), luego en las partes medias (zonas de circulación y almacenamiento de los acuíferos) y finalmente en las partes bajas (zonas de descarga de los acuíferos).

Diversos estudios (Empagua y Sogreah, 1990; Herrera y Orozco, 2010; INSIVUMEH, IGN y ONU, 1978) concuerdan en el hecho de que las cuencas hidrogeológicas de la zona metropolitana corresponden en su mayor parte a las delimitaciones topográficas de las cuencas de los ríos Las Vacas y Villalobos.

Estos estudios relatan que los flujos de agua subterránea en el acuífero superior, así como en los acuíferos inferiores (lavas del terciario y calizas del cretácico) siguen las direcciones de los drenajes superficiales. Además, los mismos estudios afirman, con más o menos certeza, que las zonas de recarga de estos acuíferos se encuentran en las partes altas de las cuencas vinculadas con la zona metropolitana. No obstante, falta estudiar con precisión los mecanismos de recarga de cada uno de los acuíferos que abastecen a la zona metropolitana.

La dirección del flujo de agua subterránea en la zona metropolitana fue estimada, tal como lo muestra la Figura 34.

Figura 34
Flujo del agua subterránea estimada en la zona metropolitana



<p>ESTIMACIÓN DEL CONSUMO DE AGUA EN LA ZONA METROPOLITANA DE GUATEMALA</p> <p>Universidad Rafael Landívar (URL) Vicerrectoría de Investigación y Proyección Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (IARNA)</p>		<p>Legenda</p> <p>— Hidrografía lineal</p> <p>■ Cuerpo de agua</p> <p>□ Límites de subcuencas</p>	
<p>Proyección del mapa digital: UTM, zona 15, DATUM WGS 84. Proyección del mapa impreso: Coordenadas geográficas, Esteroide de Clarke 1866.</p>	<p>Fuente: Elaboración propia MAGA, 2006</p> <p>Elaborado por: Laboratorio SIG IARNA Guatemala, 2012</p>		

Fuente: Elaboración propia.

Los niveles estáticos de los pozos en la zona metropolitana varían entre 25 hasta más de 600 metros de profundidad, dependiendo del acuífero o acuíferos captados. Como una estimación, se describen los rangos de profundidad de los pozos y los rangos de nivel del agua subterránea por cuenca (Cuadro 21).

Algunos estudios revelan el descenso de los niveles estáticos de los pozos observados en distintos acuíferos. En la cuenca del río Villalobos, ya en la década de los setenta, se había evidenciado la constante disminución de los niveles de agua subterránea, sin que se haya logrado recuperar el almacenamiento (INSIVUMEH, IGN y ONU, 1978).

Estudios más recientes en el sector del Ojo de Agua y El Diamante han mostrado reducciones promedio de 9 y 25 metros, respectivamente, para el periodo 1968-1996. No obstante, en ciertos pozos del Ojo de Agua se ha observado el descenso de 13.2 metros en nueve años, mientras que para El Diamante ha sido de 22.5 metros en siete años (Herrera y Orozco, 2010).

El estudio hidrogeológico del acuífero de las calizas de la zona norte (Empagua y Sogreah, 1990) evidencia también la disminución de los niveles de varios acuíferos de la zona. Esto refleja la intensidad en la explotación del recurso, así como la degradación e impermeabilización existentes en las zonas de recarga, a causa de la expansión urbana.

Cuadro 21
Rango de profundidad de pozos y rango del nivel del agua subterránea

Cuenca	Río	Municipios	Rango de profundidad de los pozos mecánicos (metros)	Rango de profundidad del agua subterránea en los pozos (metros)
1	Paxot	San Juan Sacatepéquez San Pedro Sacatepéquez	120 - 180	30 - 60
2	Sactzi	San Juan Sacatepéquez San Raymundo	270 - 300	120 - 180
3	El Zapote	San Pedro Sacatepéquez San Juan Sacatepéquez Mixco San Raymundo Chinautla	150 - 600	30 - 270
4	Las Vacas	Mixco Santa Catarina Pinula Guatemala Chinautla	150 - 210	30 - 240
5	Las Cañas	Chinautla San Pedro Ayampuc Guatemala	180 - 390	45 - 320
6	Los Ocotes	Santa Catarina Pinula San José Pinula Guatemala	120 - 390	30 - 150 ^{continúa...}

Continuación del cuadro 21

Cuenca	Río	Municipios	Rango de profundidad de los pozos mecánicos (metros)	Rango de profundidad del agua subterránea en los pozos (metros)
7	Villalobos	San Pedro Sacatepéquez Santiago Sacatepéquez San Lucas Sacatepéquez San Bartolomé Milpas Altas Santa Lucía Milpas Altas Magdalena Milpas Altas San Juan Sacatepéquez Mixco Guatemala Villa Nueva Santa Catarina Pinula Villa Canales Petapa	30 - 600	12 - 210
8	Michatoya	Santa María de Jesús Antigua Guatemala Magdalena Milpas Altas Villa Nueva Amatitlán Palín San Vicente Pacaya Escuintla	24 - 330	6 - 240
9	Teocinte	Fraijanes San José Pinula Palencia Guatemala	90 - 450	30 - 105
10	Amatitlán	Villa Canales Amatitlán Villa Nueva San Vicente Pacaya	90 - 300	7.5 - 225
11	El Cangrejal	Fraijanes	150 - 210	30 - 90
12	Aguacapa	Fraijanes	150 - 210	30 - 75
13	Rustrián	Santa Catarina Pinula	90 - 210	30 - 90
14	Lo de Diéguez	Fraijanes	150 - 315	9 - 135
15	Las Flores	Fraijanes	150 - 330	12 - 165
16	La Cuya	San José Pinula	120 - 450	12 - 45

Fuente: Elaboración propia.

3.7 Estimación preliminar del número de pozos por cuenca y por municipio (uso urbano, industrial, riego y municipal)

Se realizó una estimación preliminar del número de pozos que se encuentran en las diferentes cuencas hidrográficas, las cuales son compartidas por los diferentes municipios.

Para ello, se tomaron en cuenta los resultados de las encuestas llevadas a cabo en las municipalidades, se consultaron estudios hidrogeológicos y se realizaron evaluaciones de campo.

Las Figuras 22, 35 y 36 muestran, respectivamente, la estimación por uso del recuso agua subterránea (urbano, industrial, riego y municipal), por cuenca y por municipio.

3.8 Estimación preliminar del caudal extraído de agua subterránea, por cuenca

Se estimó el caudal extraído a través de pozos mecánicos, tomando como unidad de referencia la cuenca hidrográfica. Se calcularon los caudales promedio de aprovechamiento para cada actividad (urbano, industrial, riego y aprovechamiento municipal), las horas de bombeo y los días bombeados.

Se logró hacer una estimación preliminar de la extracción del agua subterránea en cada cuenca, con lo cual se obtuvo un valor útil para la construcción de un modelo integrado de gestión del agua en la zona metropolitana (Figuras 37 y 38).

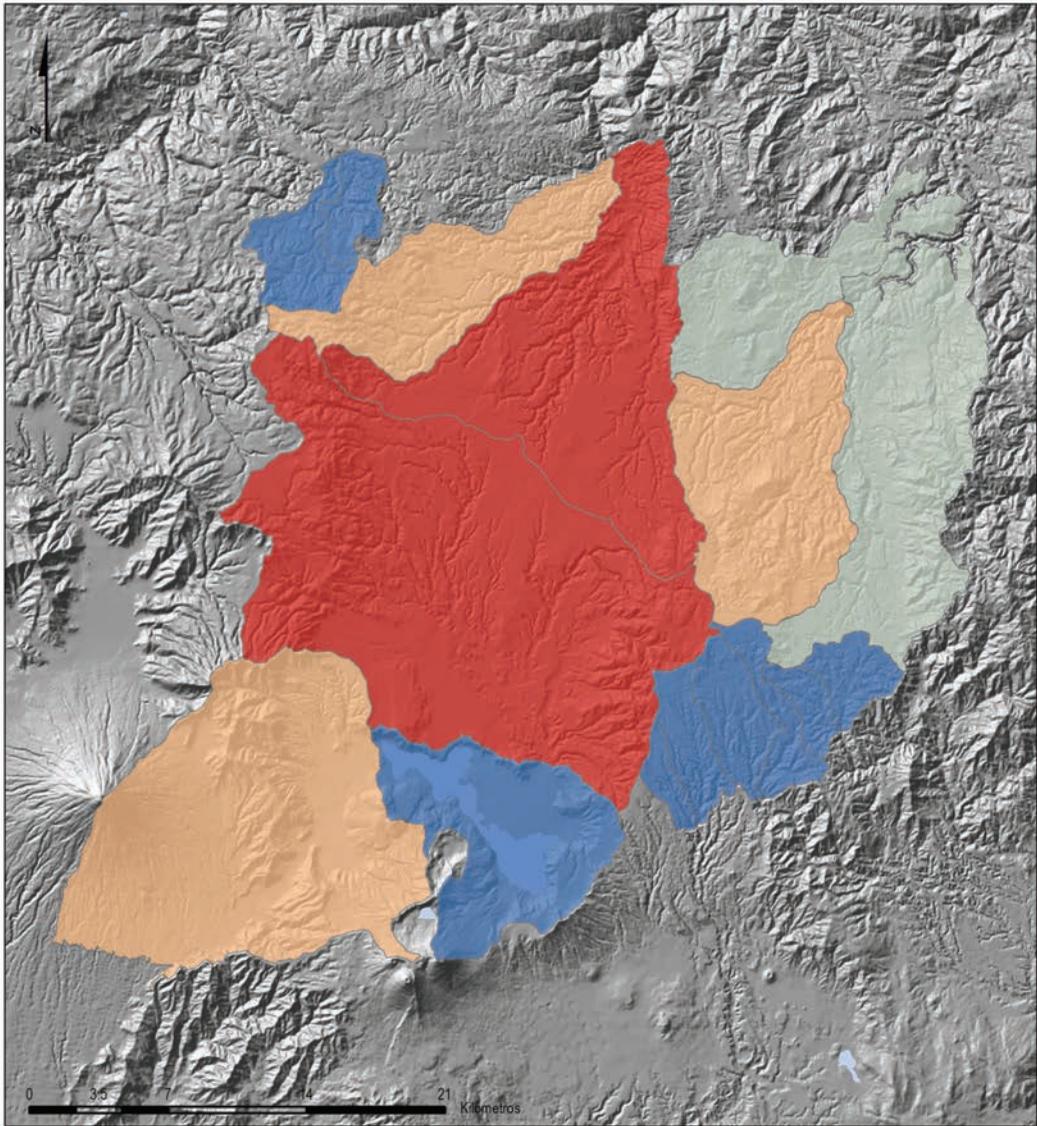
A continuación se realizó un consolidado de información, con datos sobre precipitación por cuenca y recarga estimada por cuenca, para poder realizar la relación extracción/recarga total (Cuadro 22).

Como una indicación de la variación del nivel del agua subterránea a través del tiempo, se analizó información proveniente de algunos pozos trabajados por EMPAGUA en la zona norte del valle de la ciudad de Guatemala.

Estos pozos captan el agua subterránea del acuífero en rocas sedimentarias del cretácico. Se tiene un análisis de diez años en seis pozos y uno de cinco años en otro pozo del área.

La Figura 39 muestra la variación del nivel del agua medido en los pozos. La tendencia es al descenso, lo cual indica que se está extrayendo más de lo que el acuífero se está recargando.

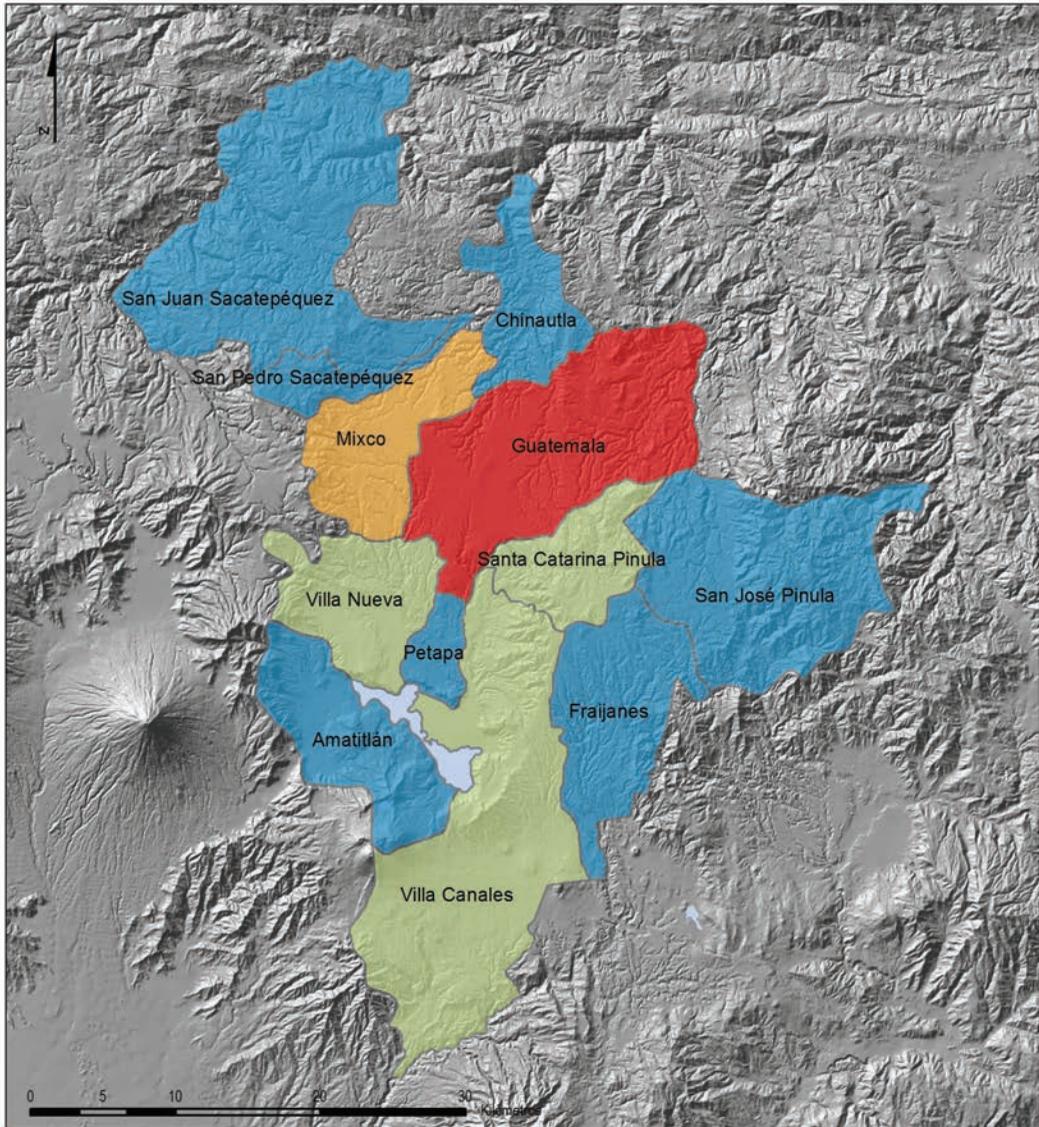
Figura 35
Número de pozos por cuenca en la zona metropolitana



<p>ESTIMACIÓN DEL CONSUMO DE AGUA EN LA ZONA METROPOLITANA DE GUATEMALA</p> <p>Universidad Rafael Landívar (URL) Vicerrectoría de Investigación y Proyección Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (IARNA)</p>		<p>Número de pozos por cuenca</p> <p>Leyenda</p> <p> < 50 100 - 500</p> <p> 50 - 100 > 500</p> <p> Cuerpo de agua</p>	
<p>Proyección del mapa digital: UTM, zona 15, DATUM WGS 84. Proyección del mapa impreso: Coordenadas geográficas, Esferoide de Clarke 1866.</p>	<p>Fuente: Elaboración propia MAGA, 2006 Elaborado por: Laboratorio SIG IARNA Guatemala, 2012</p>	<p> Universidad Rafael Landívar</p> <p> iarna INSTITUTO DE AGRICULTURA, RECURSOS NATURALES Y AMBIENTE UNIVERSIDAD RAFAEL LANDIVAR</p>	<p> Instituto de los Príncipes Bajos</p>

Fuente: Elaboración propia.

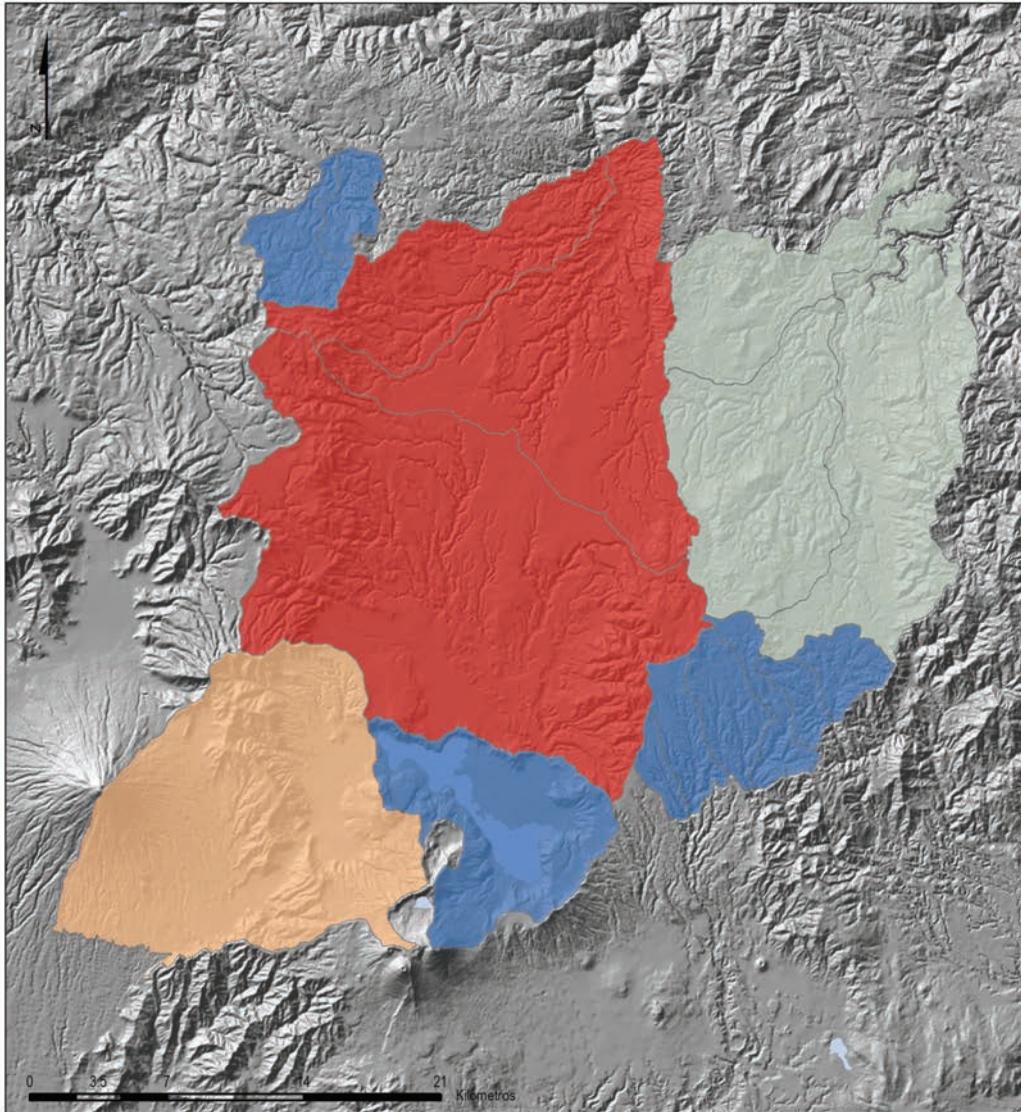
Figura 36
Número de pozos por municipio en la zona metropolitana



<p>ESTIMACIÓN DEL CONSUMO DE AGUA EN LA ZONA METROPOLITANA DE GUATEMALA</p> <p>Universidad Rafael Landívar (URL) Vicerrectoría de Investigación y Proyección Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (IARNA)</p>		<p>Número de pozos por municipio</p>					
<p>Proyección del mapa digital: UTM, zona 15, DATUM WGS 84. Proyección del mapa impreso: Coordenadas geográficas, Esferoide de Clarke 1866.</p>		<p>Legenda</p> <table border="0"> <tr> <td> < 100</td> <td> 300 - 500</td> </tr> <tr> <td> 100 - 300</td> <td> > 500</td> </tr> </table> <p> Cuerpo de agua</p>		 < 100	 300 - 500	 100 - 300	 > 500
 < 100	 300 - 500						
 100 - 300	 > 500						
<p>Fuente: Elaboración propia MAGA, 2006</p> <p>Elaborado por: Laboratorio SIG IARNA Guatemala, 2012</p>							

Fuente: Elaboración propia.

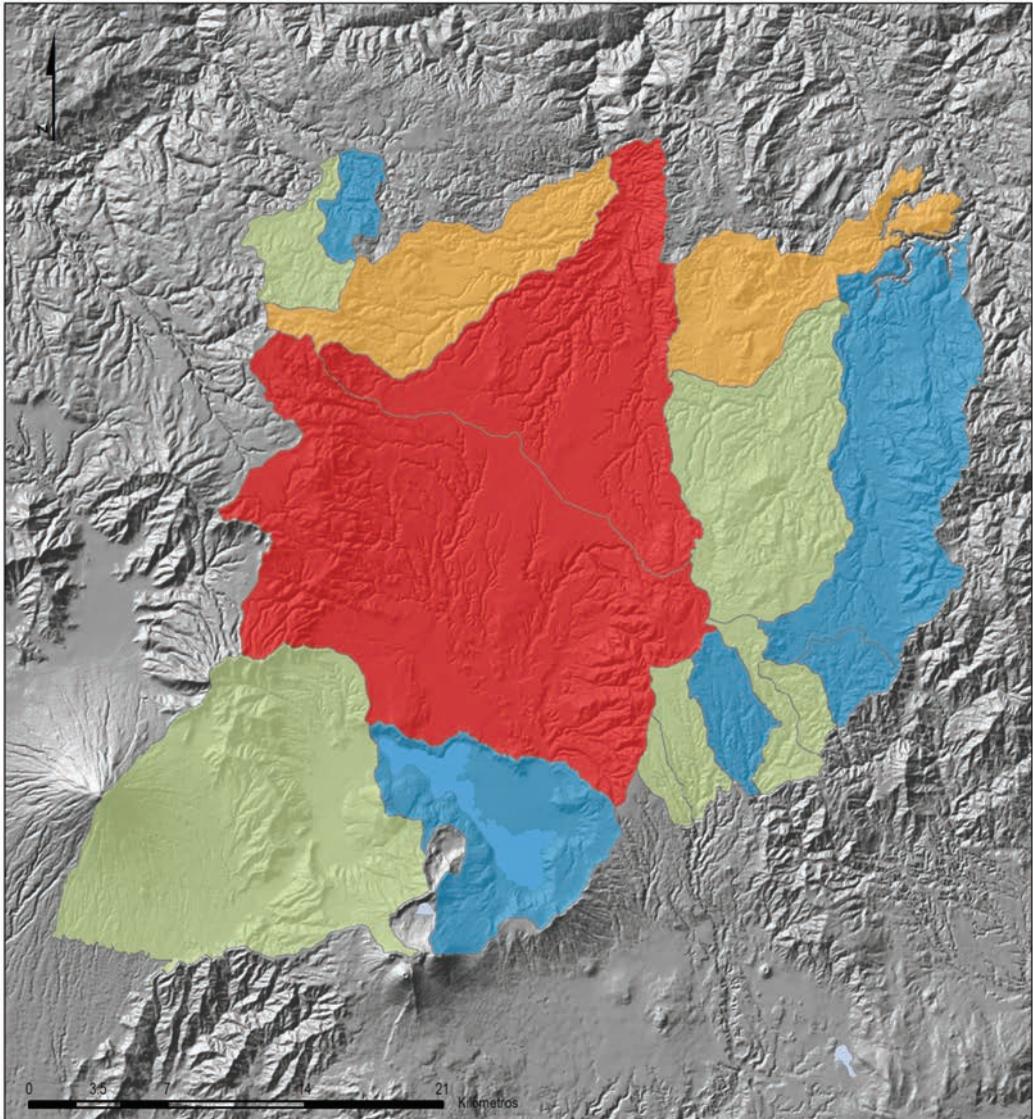
Figura 37
Extracción de agua subterránea en la zona metropolitana



<p>ESTIMACIÓN DEL CONSUMO DE AGUA EN LA ZONA METROPOLITANA DE GUATEMALA</p> <p>Universidad Rafael Landívar (URL) Vicerrectoría de Investigación y Proyección Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (IARNA)</p>		<p>Extracción de agua subterránea (m³/año)</p>	
		<p>Leyenda</p>	
		< a 10 millones	De 20 a 35 millones
		Cuerpo de agua	De 10 a 20 millones
		< a 35 millones	
<p>Proyección del mapa digital: UTM, zona 15, DATUM WGS 84. Proyección del mapa impreso: Coordenadas geográficas, Esferoide de Clarke 1866.</p>	<p>Fuente: Elaboración propia MAGA, 2006 Elaborado por: Laboratorio SIG IARNA Guatemala, 2012</p>		

Fuente: Elaboración propia.

Figura 38
Intensidad de la extracción de agua subterránea en la zona metropolitana



ESTIMACIÓN DEL CONSUMO DE AGUA EN LA ZONA METROPOLITANA DE GUATEMALA Universidad Rafael Landívar (URL) Vicerrectoría de Investigación y Proyección Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (IARNA)		Intensidad de la extracción de agua subterránea (m³/km²/año)	
Leyenda		■ < 125000	■ 300000 - 600000
■ Cuerpo de agua		■ 125000 - 300000	■ > 600000
Proyección del mapa digital: UTM, zona 15, DATUM WGS 84. Proyección del mapa impreso: Coordenadas geográficas, Esferoide de Clarke 1866.	Fuente: Elaboración propia MAGA, 2006 Elaborado por: Laboratorio SIG IARNA Guatemala, 2012		
			

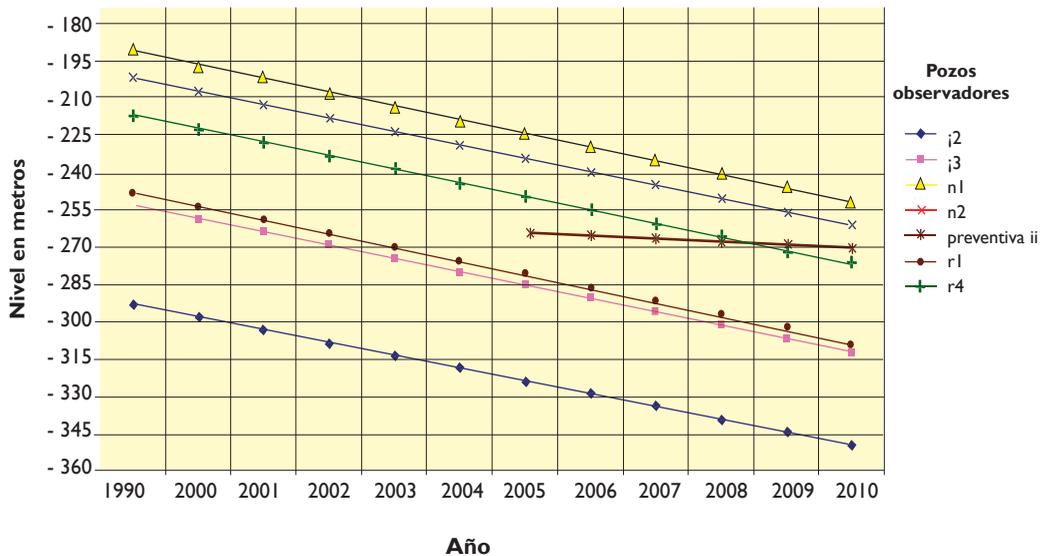
Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 22
Extracción de agua subterránea por cuencas en
la zona metropolitana de Guatemala

Microcuenca	Extracción m ³ /año	Recarga m ³ /año	Relación extracción/ recarga	Precipitación total m ³ /año
Aguacapa	2,988,613.73	1,274,803.04	2.344372925	25,451,321.00
Amatitlán	7,787,756.95	5,503,459.15	1.415065822	88,238,442.00
El Cangrejal	1,459,761.54	442,217.09	3.301006602	8,723,550.00
El Zapote	35,312,778.90	3,756,865.15	9.399533252	85,599,032.00
La Cuya	1,039,548.63	1,343,194.10	0.773937757	23,262,400.00
Las Cañas	19,218,167.97	1,960,535.20	9.802511059	72,652,176.00
Las Flores	1,374,726.89	1,103,299.61	1.246014112	15,030,652.00
Las Vacas	175,917,346.89	4,386,413.74	40.10505101	192,871,826.00
Lo de Diéguez	3,676,331.49	1,367,052.24	2.689239939	24,993,953.00
Los Ocotes	15,993,937.39	6,034,307.37	2.650500944	143,260,354.00
Michatoya	26,006,431.30	67,520,172.98	0.385165354	277,540,497.00
Paxot	4,910,751.20	4,248,045.37	1.15600253	28,731,240.00
Rustrián	412,418.07	1,335,548.94	0.308800415	32,536,205.00
Sactzi	936,562.22	1,120,792.12	0.835625267	14,819,924.00
Teocinte	14,070,872.96	21,473,184.93	0.655276476	185,584,176.00
Villalobos	191,203,422.17	16,884,575.04	11.32414774	391,997,292.00

Fuente: Elaboración propia.

Figura 39
Descenso de niveles de agua subterránea en siete pozos monitoreados, Acuífero Calizas del Norte (1990-2010), zona metropolitana



Fuente: Elaboración propia.

3.9 Evaluación de las zonas de recarga

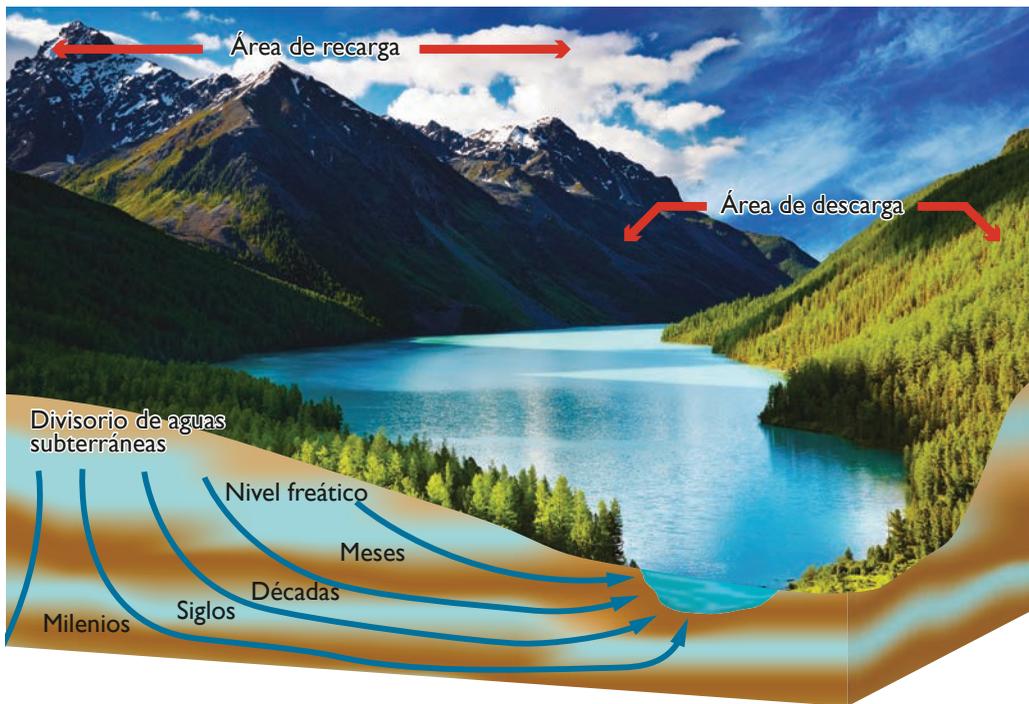
Se evaluaron las posibles zonas de recarga de los diferentes acuíferos, tomando en cuenta la morfología de las cuencas (zona alta-media-baja) (Figura 40), así como las formaciones geológicas con mejores características hidrogeológicas que propicien la infiltración. Se cotejaron los resultados de la evaluación de recarga y zonas de reforestación realizados a través del estudio técnico del IARNA-URL.

El proceso de infiltración inicia en las cabeceras de las cuencas hidrográficas, aunque con dificultad, dado lo pronunciado de su pendiente. Las zonas medias de las cuencas, donde las pendientes se hacen menores, son una buena zona para aumentar la infiltración, lo cual se puede lograr con cobertura vegetal o reforestación (Figura 9). A su vez, esto permite la estabilidad de los suelos en las partes bajas de las cuencas, que son terrenos con menores pendientes o zonas planas que naturalmente propician la infiltración. En estas áreas se desarrolla la mayoría de los proyectos urbanos y zonas de aprovechamiento.

Las zonas aluviales, seguidas por las zonas de relleno volcánico, los afloramientos de roca volcánica con fracturas y rocas sedimentarias con fractura y algún grado de karstificación; son las formaciones geológicas que presentan las mejores condiciones de infiltración en la zona metropolitana y sus áreas de influencia.

Las formaciones geológicas que presentan condiciones menos favorables para la infiltración son aquellas donde afloran las rocas intrusivas como el granito (I), aunque presentan un grado de alteración en su parte superior, que puede favorecer este proceso.

Figura 40
Esquema de recarga-descarga



Fuente: Elaboración propia, con base en USAC y Universidad Diego del Ávila (2012, agosto).

4. Conclusiones

- La zona metropolitana se abastece principalmente de agua subterránea para satisfacer las demandas de diferentes servicios (consumo humano, actividades de riego e industria). Existen zonas de aprovechamiento intenso en diferentes acuíferos, que en el tiempo han disminuido sus reservas, reflejándose en la variación del nivel de agua subterránea. Tal situación requiere, entre otros aspectos, implementar proyectos de reforestación y propiciar la recarga artificial, para favorecer la infiltración. Además, es necesario fomentar el buen uso del recurso y evitar el despilfarro.
- En la mayor parte de las microcuencas, la extracción de agua es superior a la recarga local estimada, sobre todo en la cuencas más urbanas. Es decir, el uso es eminentemente extractivo y tiende al agotamiento.
- Aunque los acuíferos locales pueden beneficiarse de una recarga adicional proveniente del exterior de las microcuencas estudiadas, se puede concluir que el uso de las aguas subterráneas tiene una tendencia insostenible en la zona metropolitana.

5. Recomendaciones

- Implementar acciones para aumentar la recarga de acuíferos, promoviendo la reforestación y proyectos que propicien la infiltración.
- Establecer una red de monitoreo de acuíferos en las diferentes cuencas y municipios, localizando pozos que se puedan utilizar como piezómetros de control del nivel del agua subterránea, con medición mensual.
- Establecer programas de manejo y conservación de cuencas.
- Crear programas de concientización sobre el uso racional del recurso en los diferentes niveles educativos, sembrando la cultura del buen uso del agua y su conservación.
- Realizar una caracterización de los acuíferos que se aprovechan en las diferentes cuencas y municipios.
- Implementar acciones con los usuarios del recurso, municipalidades, empresas de agua, industrias y actividades de uso agrícola para promover la recarga y delimitación de perímetros de protección y vulnerabilidad de los acuíferos.

6. Referencias bibliográficas

1. Baldizón y Álvarez (1999). *Estudio de aguas subterráneas del municipio de Mixco*. Guatemala.
2. Casanova, D. (2012, junio). *Curso: acuífero y vulnerabilidad a la contaminación*. Universidad Diego de Ávila, Facultad de Ingeniería, Centro de Estudios Hidrotécnicos. Guatemala.
3. Casanova, D. (2012, junio). *Diplomado: Estudio y manejo de las aguas subterráneas*. Universidad Diego de Ávila, Facultad de Ingeniería, Centro de Estudios Hidrotécnicos. Guatemala.
4. Empagua y Sogreah. (1990). *Estudio hidrogeológico en las calizas de la zona norte*. Guatemala.
5. Herrera, I. y Orozco, E. (2010). Hidrogeología de Ojo de Agua, cuenca sur de la ciudad de Guatemala. *Revista Geológica de America Central* 42, 85-98.
6. IARNA-URL (Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar). (2012). *Análisis de la disponibilidad de agua en la región metropolitana de Guatemala: Bases fundamentales para la gestión hídrica con visión a largo plazo*. Guatemala: Autor.

7. IGN (Instituto Geográfico Nacional). (1973). *Reconocimiento hidrogeológico del valle de Guatemala*. Guatemala: Ministerio de Comunicaciones y Obras Públicas e Instituto Geográfico Nacional.
8. INSIVUMEH, IGN y ONU (Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología; Instituto Geográfico Nacional y Organización de las Naciones Unidas). (1978). *Estudio de las aguas subterráneas en el valle de Guatemala*. Guatemala: Ministerio de Comunicaciones y Obras Públicas.
9. MAGA e IGN (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación e Instituto Geográfico Nacional). (1970). *Mapa geológico de la República de Guatemala 1970*. Guatemala: Autor.
10. Mendoza, R. (2009). *Evaluación de producción de agua potable en pozos municipales de Mixco*. Tesis para optar al título de ingeniero mecánico industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad Rafael Landívar, Guatemala.
11. Monroy, L. (2003). *Evaluación y complemento de estudio hidrogeológico de Mixco, a través de la perforación de pozos mecánicos profundos en sectores específicos del municipio*. Tesis para optar al título de ingeniero civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
12. Tahal Consulting Engineers Ltd. (1982). *Plan maestro de abastecimiento de agua a la ciudad de Guatemala*. Guatemala: EMPAGUA.
13. U.S. Geological Survey. (s.f.). *Water cycle*. U.S.A: U.S. Department of the Interior. Recuperado en abril de 2013, de: <http://ga.water.usgs.gov/edu/watercycle.html>
14. USAC (Universidad de San Carlos de Guatemala) y Universidad Diego del Ávila. (2012, agosto). *Hidrogeología-acuíferos*. En Diplomado estudio y manejo de las aguas subterráneas, Guatemala.
15. Van Tuylen, S. (2011). *Documento conceptual*. Guatemala: FONCAGUA.
16. Velásquez, E. (1995). *Estudio de los niveles freáticos en el valle de Guatemala*. Tesis para optar al título de ingeniero civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Serie

Textos para la educación y el cuidado de la vida

Esta serie de documentos, producida por el IARNA-URL, se inspira en el deseo de fomentar la curiosidad y el respeto por la naturaleza, sus componentes y sus interacciones con la sociedad. Se ha diseñado pensando en todas las personas que anhelan vivir bien y en paz, sobre todo para la población de jóvenes, quienes quizá, sin darse cuenta, se enfrentarán a un futuro más difícil en la medida que continúen nuestros inaceptables ritmos de agotamiento, degradación y contaminación ambiental.

Presentamos esta serie con las ideas del Rector de la Universidad Rafael Landívar, Rolando Alvarado, S.J.: "El camino del cuidado siempre es posible retomarlo. Habría que partir del reconocernos como fruto y parte de la naturaleza, conocer y aceptar su vida interna, su lógica, sus posibilidades y sus límites; aprovechar con racionalidad todo cuanto nos ofrece para acondicionar nuestra estancia en ella, e intervenir en sus entrañas y en su rostro de una forma cariñosa y responsable, y no con la voracidad de quien la explota o de la frialdad de quien solo pretende usarla".

El presente trabajo expone, con base científica, la realidad hidrológica de la región metropolitana del país. En términos inmediatos, se constituye en un insumo para conceptualizar, diseñar y poner en marcha el Fondo para la Conservación del Agua en el Área Metropolitana (FONCAGUA); pero en términos más amplios y visionarios, pretende motivar un replanteamiento de la visión acerca de la gestión del agua en la región y de la institucionalidad que debe hacerla operativa.

Impresión gracias al apoyo de:



Reino de los Países Bajos



[/iarna.url](https://www.facebook.com/iarna.url)



[@iarna_url](https://twitter.com/iarna_url)