



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

**CAMPUS MONTECILLO
POSTGRADO FORESTAL**

**ESTUDIO DE MERCADO DEL SERVICIO AMBIENTAL
HIDROLÓGICO EN LA CUENCA DE TAPALPA, JALISCO**

CRISTOPHER LÓPEZ PANIAGUA

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2007

La presente tesis titulada “**Estudio de mercado del servicio ambiental hidrológico en la cuenca de Tapalpa, Jalisco**” realizada por el alumno **Cristopher López Paniagua**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
FORESTAL

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO: _____
DR. MANUEL DE J. GONZÁLEZ GUILLÉN

ASESOR: _____
DR. J. RENÉ VALDEZ LAZALDE

ASESOR: _____
DR. JUAN DE D. BENAVIDES SOLORIO

Montecillo, Texcoco, México, noviembre de 2007.

ESTUDIO DE MERCADO DEL SERVICIO AMBIENTAL HIDROLÓGICO EN LA CUENCA DE TAPALPA, JALISCO

Cristopher López Paniagua, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2007

Se realizó un estudio de mercado de los servicios ambientales hidrológicos (SAH) en la cuenca de Tapalpa, Jalisco, México, cuya superficie es de 21,000 ha, donde el 44% es de uso forestal. Para determinar la oferta hidrológica se utilizó el modelo hidrológico SWAT (soil and water assesment tool, herramienta de valoración de suelo y agua) que presentó un buen ajuste ($R^2 = 0.85$) al ser calibrado con la producción de agua en una de las cinco subcuencas que integran el área de estudio. El análisis de demanda indica que existe un superávit del recurso hídrico (19,792,015 m³/año), ya que solamente se aprovecha el 54% (23,171,885 m³/ha) de la oferta total (42,963,900 m³/ha). De ésta, el 93% se utiliza en el sector agrícola, principalmente en la producción de hortalizas (50%) y cultivos básicos (23%). En cuanto a la disponibilidad a pagar (DAP) por el SAH, se encontró que ésta es mayor en el sector servicios (76.7% respondieron afirmativamente). Sin embargo, la mayor participación monetaria en la DAP total estuvo dada por el sector doméstico, (46.5% del total), que asciende a \$3,064,301.88/año. El valor de la DAP total fue menor que el costo de oportunidad para conservar la superficie boscosa de la cuenca, con un déficit anual de \$27,201,313.4. La DAP sólo cubrió el 10% de dicho costo de oportunidad. Al agregar el costo asociado a la recuperación de la superficie en conflicto, el déficit anual aumentó a \$45,130,987.7 y la DAP se reduce a sólo el 6% del costo de oportunidad total. Al proyectar la demanda y oferta, suponiendo un incremento acumulado de la demanda del 40% y un decremento acumulado del 37% para la oferta en los próximos 20 años, se observó que la cantidad ofertada será incapaz de satisfacer la cantidad demandada en el año 2021, existiendo un déficit del recurso hídrico del orden de 735,280 m³/año, representando el 2.4% de la cantidad demandada para ese año (30,440,928 m³/año).

Palabras clave: Disponibilidad a pagar, servicios ambientales, costo de oportunidad, uso del suelo, oferta de agua.

MARKET STUDY OF THE HYDROLOGIC ENVIRONMENTAL SERVICE IN THE TAPALPA WATERSHED, JALISCO

Cristopher López Paniagua, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2007

A market study of the hydrologic environmental services (HES) was carried out in the Tapalpa watershed at Jalisco, Mexico, and has 21,000 ha, where 44% is forest land. To determine the hydrologic supply SWAT (soil and water assessment tool) was used, and displayed a good fit ($R^2 = 0.85$) when it was calibrated, using water yield, in one of the five sub-watersheds that define the study area.

The demand analysis indicated that exist a superávit of the hydric resource (19,792,015 m³/year); only 54% (23,171,885 m³/ha) of total supply (42,963,900 m³/ha) is used. 93% of the water demanded is used by the agriculture sector, mainly in vegetables production (50%) and basic crops (23%). Regarding the willingness to paid (WTP) for the HES, it was found higher in the services sector (76.7% of the cases showed WTP). However, the biggest monetary participation in total WTP was given by the domestic sector, with 46.5% of the total, which ascends to \$3,064,301.88/year. Total WTP was less (only 10%) than the estimated opportunity cost to conserve forestry cover in the watershed, resulting in an annual deficit of \$27,201,313.40. When the cost associated to reconvert (change agriculture or another land use to forest use) the existing area under conflictive use was added, the annual deficit increased to \$45,130,987.7 and WTP is reduced to only 6% of total opportunity cost. When demand and supply were projected—increasing demand in 40% and decreasing supply in 37% in the next 20 years- it was found that the supply will not be enough to cover the water consumption in 2021. A deficit of 735.28 thousand of m³/year was found. This figure represents 2.4% of the estimated demand for 2021 (30,440,928 m³/year).

Key words: *Willingness to paid, environmental services, opportunity cost, land use, supply of water*

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue posible gracias al apoyo de varias personas e instituciones:

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por financiar mis estudios de maestría (a través de todos los mexicanos que pagamos impuestos).

Al Colegio de Postgraduados, Postgrado Forestal, Campus Montecillo, que me aceptó entre sus integrantes para realizar mis estudios de maestría.

A la Comisión Nacional Forestal por financiar la investigación a través de su programa de pago de servicios ambientales hidrológicos (PSAH).

Al Dr. Manuel de Jesús González Guillén que con su paciencia, apoyo y consejo (y uno que otro regaño), guió esta investigación y me enseñó mucho más de lo que yo esperaba.

A los Drs. J. René Valdez L., Juan de Dios Benavides, Patricia Hernández de la Rosa, Héctor M. de los Santos P., Arnulfo Aldrete y a todo el personal del Postgrado Forestal del Campus Montecillo, a cada uno en mayor o menor medida por el apoyo brindado. He aprendido invaluable lecciones de ellos.

GRACIAS A TODOS

Cristopher

DEDICATORIA

A Dios por ayudarme cuando más necesitaba de Él. Gracias Papá.

A mi familia, esto y todo lo que haga lleva una parte de ellos. Jorge, Dolores y Javier, de todo corazón gracias.

A menchame, Papá puso en mi camino a una excelente mujer, el resto fue trabajo nuestro. Gracias Yadira por todo tu amor, apoyo y comprensión, y agárrate que esto apenas comienza.

A mi nueva familia, sin ellos esta etapa que hoy culmina, hubiera sido mucho más difícil. Gracias, Sra. Rosalía, Bibiana y Nico.

A todos aquellos que me apoyaron en este camino, papel me faltaría para nombrarlos. Gracias amigos.

Cristopher

CONTENIDO

	Página
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN: LA CUENCA TAPALPA Y LOS SERVICIOS	
SERVICIOS	1
1.1 Definición del problema.....	1
1.2 Características generales del área de estudio.....	4
Ubicación de la cuenca Tapalpa.....	4
Descripción geográfica.....	4
Perfil sociodemográfico.....	5
Actividad económica.....	7
1.3 La producción de agua y los factores que la afectan.....	8
El bosque y la producción de agua.....	8
Factores que afectan la producción de agua.....	9
1.4 Valoración económica de bienes y servicios ambientales.....	10
Fundamentos teóricos.....	12
Valoración económica total.....	14
Métodos de valoración económica.....	14
1.5 El pago de servicios ambientales.....	20
El pago de servicios ambientales en México.....	22
1.6 El mercado de servicios ambientales hidrológicos.....	23
El presupuesto de aguas.....	24
La oferta del SAH.....	24
La demanda del SAH.....	27
1.7 Propósito general del estudio y objetivos de la investigación.....	29
1.8 Literatura citada.....	31
CAPÍTULO II. OFERTA HÍDRICA DE LA CUENCA FORESTAL TAPALPA, JALISCO, ORIENTADA HACIA LOS SERVICIOS	
TAPALPA, JALISCO, ORIENTADA HACIA LOS SERVICIOS	37
2.1 Introducción.....	38
2.2 Materiales y métodos.....	42
2.3 Resultados y discusión.....	56
2.4 Conclusiones.....	66
2.5 Agradecimientos.....	66
2.6 Literatura citada.....	67

CAPÍTULO III. DEMANDA, DISPONIBILIDAD DE PAGO Y COSTO DE OPORTUNIDAD HÍDRICA EN LA CUENCA TAPALPA, JALISCO	71
3.1 Introducción.....	73
3.2 Objetivos.....	75
3.3 Metodología.....	75
3.4 Resultados.....	83
3.5 Discusión y conclusiones.....	92
3.6 Reconocimientos.....	97
3.7 Literatura citada.....	97
3.8 Anexo.....	99
CAPÍTULO IV. PROYECCIONES DE OFERTA Y DEMANDA DEL RECURSO HÍDRICO EN LA CUENCA TAPALPA, JALISCO	102
4.1 Introducción.....	104
4.2 Materiales y métodos.....	107
4.3 Resultados.....	112
4.4 Discusión y conclusiones.....	116
4.5 Literatura citada.....	118
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES GENERALES	120
5.1 Limitaciones y recomendaciones.....	125

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1.1 Tasa media anual de crecimiento poblacional en Tapalpa.....	5
1.2 Distribución de la población de Tapalpa en el año 2000.....	6
2.1 Caracterización de las subcuencas de la cuenca Tapalpa.....	56
2.2 Componentes del balance hídrico por subcuenca.....	59
2.3 Distribución del ciclo hidrológico anual en la cuenca Tapalpa.....	63
3.1 Confiabilidad, precisión y tamaño de muestra obtenido por grupo social encuestado en Tapalpa, Jalisco.....	78
3.2 Estimaciones puntuales y de intervalo en la cuenca de Tapalpa	79
3.3 Clases de edad en décadas.....	81
3.4 Demanda del recurso hídrico por sector y total en Tapalpa.....	84
3.5 Valor económico del SAH por sector en Tapalpa, Jalisco.....	84
3.6 Parámetros estimados para el modelo DAP vs Escolaridad.....	85
3.7 Parámetros estimados para el modelo <i>DAP vs Edad</i>	86
3.8 Parámetros estimados para el modelo <i>DAP vs Edad y sector</i> en Tapalpa, Jalisco.....	86
3.9 Parámetros estimados para el modelo <i>DAP vs Edad y Sector</i> en Tapalpa, Jalisco.....	87
3.10 Uso actual del suelo y participación porcentual.....	88
3.11 Participación porcentual del uso potencial del suelo en la cuenca Tapalpa.....	89
3.12 Costo de oportunidad por sector (Escenario 1: Reconversión)...	91
4.1 Estimación de la demanda promedio ponderada de agua por persona en Tapalpa, Jalisco.....	110
4.2 Proyección de la demanda y oferta de agua en el municipio de Tapalpa del 2005-2030.....	113
4.3 Proyección de la demanda y oferta de agua en el municipio de Tapalpa del 2005-2030, incremento en la demanda (40%).....	114
4.4 Proyección de la demanda y oferta de agua en el municipio de Tapalpa del 2005-2030, incremento en la demanda (40%) y un	115

decremento en la oferta (37%).....

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1.1	Localización de la cuenca Tapalpa en el estado de Jalisco.....	4
1.2	Población del municipio de Tapalpa en el año 1995 y 2000.....	5
1.3	Población de la Cabecera Municipal en Tapalpa.....	6
1.4	Componentes del valor económico del Servicio Ambiental Hidrológico.....	15
1.5	La lógica del pago de servicios ambientales (PSA).....	21
2.1	Localización de la cuenca Tapalpa en el estado de Jalisco.....	43
2.2	Porcentaje de población urbana y rural del municipio de Tapalpa en 1990, 1995 y 2000.....	45
2.3	Intervalo altitudinal y red hidrológica de la cuenca Tapalpa.....	46
2.4	Precipitación y temperatura media mensual (1961-2000) de la Estación Tapalpa.....	49
2.5	Pluviómetros automáticos sigma instalados en la cuenca El Carrizal.....	50
2.6	Micrologger y vertedor instalados en la parte media de la subcuenca El Carrizal.....	54
2.7	Uso del suelo en la cuenca Tapalpa.....	57
2.8	Unidades de suelo de la cuenca Tapalpa.....	58
2.9	Red hidrológica obtenida de INEGI y usada en el modelo SWAT.....	60
3.1	Cuenca Tapalpa, Jalisco.....	76
3.2	Uso conflictivo del suelo de la cuenca de Tapalpa, Jalisco.....	90
4.1	Localización de la cuenca Tapalpa en el estado de Jalisco.....	108
4.2	Demanda y oferta de agua en Tapalpa, Jalisco del 2005-2030...	113
4.3	Demanda y oferta de agua en Tapalpa, Jalisco del 2005-2030, con un incremento en la demanda, acumulado del 40% en los primeros 20 años.....	114
4.4	Demanda y oferta de agua en Tapalpa, Jalisco del 2005-2030, con un incremento en la demanda del 40% y un decremento en la oferta del 37%, ambos acumulados en los primeros 20 años...	115

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN: LA CUENCA TAPALPA Y LOS SERVICIOS AMBIENTALES HIDROLÓGICOS

1.1 Definición del problema

A lo largo de la historia, el agua ha sido factor determinante en la creación de naciones pero también en la destrucción de otras. En casi todas las civilizaciones existe alguna deidad relacionada con el recurso hídrico y es que indudablemente este es un elemento indispensable para los seres vivos, quienes al igual que la tierra la presentan en una gran proporción. Lamentablemente, en la actualidad es común que el agua disponible en la naturaleza solo pueda ser utilizada para consumo doméstico usos mediante un tratamiento previo. Algunas proyecciones (FNUAP, 2001) indican que en el año 2050 más de cuatro mil millones de personas de todo el mundo (45% de toda la población de ese año) no tendrán suficiente agua para beber, bañarse o cocinar sus alimentos. En regiones como los desiertos Africanos y la mayoría del Oriente Medio, los habitantes no alcanzarán a recibir los 50 litros por persona por día que constituyen el consumo mínimo de agua diario de cada uno de los más de 6,400 millones de habitantes del planeta (FNUAP, 2001).

La lluvia en México presenta un patrón de distribución espacial y temporal irregular. En el país llueve aproximadamente $1,511 \text{ km}^3$ de agua cada año, lo que equivale a una alberca de un kilómetro de profundidad del tamaño del Distrito Federal. De estas lluvias, alrededor de 67% caen entre junio y septiembre. Si se promedia toda la lluvia, el país recibe cerca de 711 mm por año (1 mm de lluvia = 1 litro por m^2), lo cual no es mucho comparado con otros países. En la clasificación mundial, México está considerado como un país con disponibilidad baja de agua. Los países más ricos en disponibilidad de agua son Canadá y Brasil (FEA, 2006).

Por otra parte, es un hecho que la distribución geográfica del agua en el país representa retos importantes para algunas regiones. En su mayor parte, México es un país árido o semiárido (56%); es decir, en los estados norteros, que abarcan 50% de la superficie, llueve sólo 25% del total, esto implica que en un área donde se capta 20% de la precipitación del agua del país se encuentra 76% de la población, 90% de la irrigación, 70% de la industria, y se genera 77% del producto interno bruto (FEA, 2006). Lo anterior ha contribuido a que el 15% de los 650 acuíferos que existen en el país—que suministran aproximadamente la tercera parte de la extracción nacional para todos los usos—se encuentren seriamente sobreexplotados y la mayoría estén contaminados (Diario Oficial de la Federación, 2001).

Es importante señalar que en México el recurso hídrico se caracteriza por una fuerte subvaluación económica lo cual se refleja en las bajas tarifas monetarias pagadas por el consumo de agua, mismas que sólo consideran el costo financiero de brindar el servicio de abastecimiento, sin incluir los costos ambientales incurridos en su captación. Las bajas tarifas también han contribuido al desperdicio del agua o bien, a su asignación en usos de bajo valor agregado y por consiguiente a una escasa rentabilidad económica, como la producción de granos en la cuenca del río Lerma (Valentín *et al.*, 2000).

A nivel regional, la cuenca Tapalpa, localizada en el estado de Jalisco, ha sufrido un deterioro gradual del recurso hídrico en las últimas décadas. Esta situación se explica por el aumento poblacional, la creciente actividad turística en la región ha propiciado, cambios de uso del suelo, el uso inadecuado y desmedido del recurso hídrico, aunado a una fuerte subvaluación económica, los cuales han contribuido a acentuar el problema. Por ello, es importante la aplicación de políticas e instrumentos que permitan la conservación del mismo.

En respuesta al problema del agua, a nivel internacional están surgiendo varios esfuerzos orientados al mejor aprovechamiento y cuidado de este valioso recurso. En México se pretende la implementación de un mercado de servicios ambientales

hidrológicos (SAH), el cual consiste en la retribución o compensación monetaria por parte de los usuarios del servicio hídrico a los dueños o poseionarios de los ecosistemas que proporcionan los SAH. Esto es de suma importancia, ya que los bosques, por ejemplo, además de otras funciones, brindan servicios hidrológicos como la filtración de aguas y la regulación de flujos hídricos. Sin embargo, estos servicios hidrológicos son raramente valorados, hasta que los efectos de la deforestación se hacen palpables en forma de inundaciones y pérdida de la calidad del agua, entre otros. Estos efectos conllevan a un incremento en la vulnerabilidad de las poblaciones asentadas en las partes bajas de las cuencas, ya sea en forma de riesgos en sus medios de vida o su salud (Pagiola y Platáis, 2002).

En 2003 el Gobierno Federal implementó en México, por primera vez, el Programa de Pago de Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH), con la finalidad de estimular la creación de mercados, incrementar las posibilidades de conservación de los recursos forestales y fomentar el uso racional del agua. El PSAH retribuye monetariamente a los dueños de los ecosistemas que proporcionan los SAH. Aunque este programa no funciona realmente como un mercado, debido a que el pago se realiza a través de los fondos que la Comisión Nacional Forestal obtiene de parte de la Comisión Nacional del Agua (CNA), lo que implica que los que están pagando el SAH no son solamente los beneficiarios directos.

Por otra parte, para la implementación exitosa de un mercado de SAH se requiere cuantificar el cálculo hídrico de la cuenca bajo estudio, lo que implica la estimación de la cantidad ofertada y demandada de agua, así como las relaciones existentes entre los usuarios (actuales y potenciales en sus diferentes usos).

El propósito del presente trabajo es realizar un estudio de factibilidad de la creación e implementación de un mercado de servicios ambientales hidrológicos en la cuenca Tapalpa, Jalisco con la finalidad de generar información sobre la demanda y oferta del agua, así como sus relaciones actuales y futuras y de esta manera conservar adecuadamente los recursos hídricos en la región.

1.2 Características generales del área de estudio

Ubicación de la cuenca Tapalpa

La cuenca de Tapalpa se localiza al sur-oeste en el estado de Jalisco. Su superficie comprende 21,000 ha de las cuales el 44% es de uso forestal. Sus coordenadas geográficas son: 20° 18' y 19° 42' L. N. y 103° 50' y 103° 36 L. O. La mayor porción de la cuenca se localiza en el municipio de Tapalpa. Las principales poblaciones ubicadas dentro de la cuenca son Tapalpa, Attaco y La Frontera, siendo la población de Tapalpa (cabecera municipal del municipio del mismo nombre) la mayor de todas, con 5,566 habitantes que representan el 36% de la población total del municipio (SNIM-INEGI, 2000) (Figura 1.1).

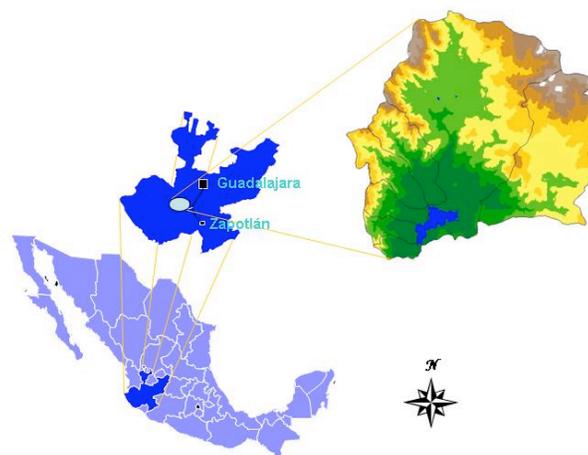


Figura 1.1. Localización de la cuenca Tapalpa en el Estado de Jalisco.

Descripción geográfica

El municipio de Tapalpa Limita al norte con los municipios de Atemajac de Brizuela y Chiquilistlán, al sur con el municipio de San Gabriel, al oriente con los municipios de Sayula, Amacueca y Techaluta de Montenegro, y al poniente con los municipios de Chiquilistlán y Tonaya. Tiene una extensión territorial de 44215 ha. El terreno es montañoso debido a que lo atraviesa la Sierra de Tapalpa (Enciclopedia de los Municipios de México, 2000).

Perfil sociodemográfico

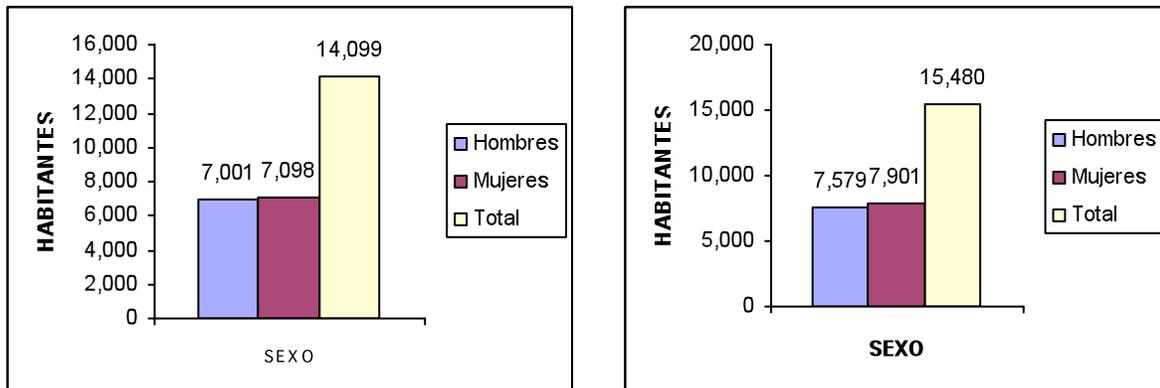
La tasa media anual de crecimiento de la población en el municipio, ha seguido la misma tendencia que la del país, creciendode 1.76% en la década de los 70 a 2.5% en los 90 (Cuadro 1.1).

Cuadro 1.1. Tasa media anual de crecimiento poblacional
Del municipio de Tapalpa, Jalisco.

Período	Porcentaje
1970–1980	1.76
1980–1990	0.56
1990-1995	2.90
1990-2000	2.50

Fuente: (INEGI, 1984, 1991, 1996 y 2001).

Incremento de la población. El incremento en la población ha seguido igualmente la tendencia del país. La pirámide poblacional se inclina hacia el sexo femenino. En total, el número de habitantes creció en un 9.8% de 1995 al 2000 (Figura 1.2).



Fuente: Adaptado de INEGI (1996, 2001).

Figura 1.2. Población del municipio de Tapalpa en el año 1995 (izquierda) y 2000 (derecha).

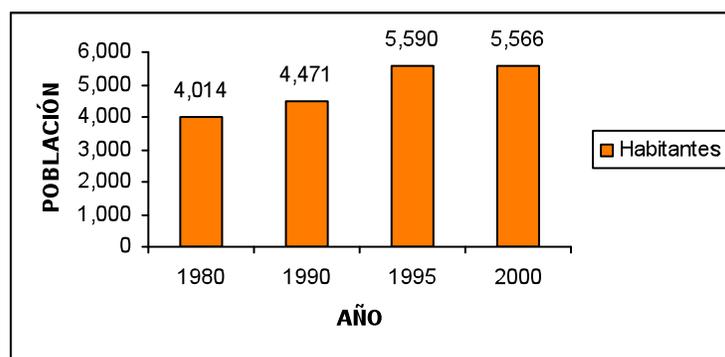
Distribución de la población en el año 2000. En el municipio de Tapalpa, el 76% de las localidades (79 de 104) tiene menos de 100 habitantes; es decir, 20 hogares en promedio (Cuadro 1.2).

Cuadro 1.2. Distribución de la población en el año 2000.

Localidades de (Rango de habitantes)	Número		Porcentaje respecto al total de la población
	Localidades	Habitantes	
1 a 99	79	1,147	7.4
100 a 499	20	4,422	28.6
500 a 999	3	2,102	13.6
1,000 a 1,999			
2,000 a 2,499	1	2,243	14.5
2,500 a 4,999			
5,000 a 9,999	1	5,566	36.0
10,000 a 14,999			
15,000 a 19,999			
20,000 y más			

Fuente: INEGI (2001).

Población de la cabecera municipal. El incremento poblacional de la cabecera municipal se ha dado principalmente por el aumento de la actividad turística y con ello una creciente posibilidad de inversión. Entre 1980 y el 2000 el incremento ha sido de 38.7% (Figura 1.3).



Fuente: Adaptado de INEGI (1984, 1991, 1996 y 2001).

Figura 1.3. Población de la cabecera municipal en Tapalpa.

Actividad Económica

Los principales sectores, productos y servicios en el municipio son (Enciclopedia de los Municipios de México, 2000):

- *Forestal.* Se aprovechan los bosques de la región con fines de producción de madera de pino y encino principalmente. Se cuenta con varios aserraderos que le otorgan un valor agregado a la madera. También la madera en rollo puede ser transportada a otras ciudades fuera del municipio.
- *Agricultura.* De los cultivos locales, destacan el maíz, avena, cebada, trigo, papa y frutales como manzana, durazno, capulín y ciruela.
- *Ganadería.* Se cría ganado bovino de carne y leche, porcino, ovino y aves de carne y postura.
- *Turismo.* El municipio ofrece como atractivos turísticos a los visitantes la parroquia de San Antonio de Tapalpa, construida por monjes franciscanos y notable por su bóveda de cañón; el templo de la Merced construido en el siglo pasado; la ex- hacienda de Buenavista; la fabrica de papel una de las primeras en Latinoamérica; salto del Nogal, caída de agua cercana a los 100 m; presa El Nogal, para quienes gustan de los deportes acuáticos y pesca; llano de la piedras, piedras de enorme magnitud presentan formas caprichosas y el origen de las mismas todavía es confuso; entre otras muchos atractivos.
- *Comercio.* Predominan los giros dedicados a la venta de productos de primera necesidad y los comercios mixtos que venden en pequeña escala artículos diversos.
- *Servicios.* Se prestan servicios profesionales, técnicos, comunales, sociales, personales, turísticos y de mantenimiento.
- *Pesca.* Las especies que se capturan son carpa, bagre, trucha arco iris, lobina y mojarra.

1.3 La producción de agua y los factores que la afectan

El bosque y la producción de agua

Los bosques no solamente producen bienes (e.g., madera, resina, frutos, productos medicinales, otros) sino también servicios ambientales los cuales son funciones naturales que producen un beneficio a la sociedad (Hueting *et al.*, 1998). Por ejemplo, los bosques representan un papel importante en el proceso hidrológico llevado a cabo en una cuenca. Ellos capturan agua a través de la vegetación, la almacenan en el suelo (infiltración) y la descargan en los cuerpos de agua a través del escurrimiento superficial y sub superficial (ANR Communication Services, 2002).

Los bosques proporcionan importantes servicios hidrológicos, entre los que destacan: la regulación de la calidad y cantidad de agua, minimizan los ciclos de inundación y sequía, protegen y mantienen los suelos y sus nutrientes, regulan el clima a escalas locales y regionales, y estabilizan el paisaje evitando deslaves y azolve de los ríos (Manson *et al.*, 2004). Estos servicios dependen de las condiciones originadas por las relaciones biofísicas que se dan entre los bosques y el agua (Johnson *et al.*, 2000); sin embargo, estas relaciones son muy variables y dependen de muchos factores incluyendo la escala, suelo, clima y tipos de vegetación.

Los efectos y funciones hidrológicas más importantes de los bosques naturales incluyen: la intercepción de cantidades significativas de precipitación bruta, provocando que el agua (precipitación neta) sea menor que en otras coberturas vegetales; muestran altas tasas de evapotranspiración significando una pérdida de agua; protegen eficientemente el suelo contra la erosión superficial, erosión en masa (deslizamientos poco profundos); y generalmente garantiza los más altos requerimientos de calidad de agua (Stadtmüller, 1994).

El estudio de los procesos hidrológicos es parte fundamental en el manejo de cuencas, por lo que la calidad y cantidad de agua es un indicador del grado de

deterioro de una cuenca (Guatemala-INAP, 2005). Consecuentemente, la producción de agua de una cuenca se entiende como la cantidad de ésta que entra en el sistema de arroyos a través del escurrimiento superficial o subsuperficial. Igualmente es la parte de la precipitación que no es utilizada por la vegetación, e incluye el flujo de arroyos y la recarga de agua en el suelo durante un periodo de un año (descarga observable) (CP-CONAFOR, 2005c).

Factores que afectan la producción de agua

La cantidad de agua “producida” por un bosque es un proceso variable con un fuerte componente estacional (O’Shaughnessy y Bren, 1998). Dicha variabilidad es causa de diversos factores como: la precipitación anual, especies forestales, características del sitio y disturbios, prácticas y tratamientos sobre la vegetación. A continuación se menciona como afectan estos factores (CP-CONAFOR, 2005c):

Precipitación anual. Según Baker (1988) “El potencial para aumentar la producción de agua es mayor donde la precipitación es más alta”. Igualmente, el autor establece que cuando el agua no es un recurso limitado, al reducir la cobertura forestal aumenta el flujo de arroyos. Lo anterior es apoyado por las aseveraciones de Keppeler y Ziemer (1990) y Calder (1998a) de que la magnitud de los incrementos en la producción de agua, provocada por cambios en la cobertura forestal, tiende a aumentar conforme la precipitación promedio anual es más alta y que los aumentos en la producción de agua serán observables sólo en aquellas zonas donde el régimen de lluvias satisfaga la evapotranspiración y además se presente un periodo de excedente hídrico durante el año, respectivamente.

Especies. Estudios de Bosch y Hewlett (1982) y Cornish (1989) en especies maderables, muestran diferentes niveles de producción de agua, siendo notablemente mayor en coníferas. Calder (1998b) explica esta variación en la producción de agua entre especies como una vinculación entre las distintas tasas de transpiración y proporción de lluvia interceptada.

Características del sitio. Aunque existen algunos estudios en cuencas arboladas con *Pinus ponderosa* en los que se comprobó que la producción de agua presenta cierta sensibilidad ante la profundidad y composición del suelo (Baker, 1988), no hay suficientes datos que permitan hacer generalizaciones en este aspecto.

Manejo de la vegetación. Un aumento en la producción de agua ha sido relacionado con la cosecha de madera principalmente porque esta acción afecta al escurrimiento ya sea al retirar cobertura forestal o por la creación de caminos propios de la actividad. Con respecto a lo anterior, aunque existen algunos estudios, estos carecen de consistencia y presentan una alta variabilidad en los resultados, ya que la cantidad de agua extra que es producida depende de diferentes factores, como la cantidad y tipo de la vegetación del bosque, la cantidad de remoción, el método de cosecha y el clima del área de captación, lo que explica el por qué de la dificultad al tratar de extrapolar resultados en este tipo de investigaciones.

Otro aspecto a considerar en áreas bajo aprovechamiento es la realización de prácticas silvícolas durante el periodo de rotación, como aclareos y quemas controladas, entre otras. Los incendios forestales pueden tener efectos importantes en la producción y calidad de agua. Es probable que éstas tengan diferentes efectos en el uso de agua del bosque y por lo tanto, en la producción de agua (Knight, 2000); sin embargo, son escasos los trabajos que cuantifican estos efectos por lo que es muy importante generar información al respecto.

1.4 Valoración económica de bienes y servicios ambientales

La creación de un mercado de bienes y servicios ambientales no es una tarea fácil. Se requiere asignar y cuantificar el valor de los servicios ambientales, por ejemplo, Azqueta (1994a) establece que existen dos tendencias:

- (a) Valor intrínseco de la naturaleza: Se considera que la naturaleza posee un valor *per se*; es decir, no requiere que nada o nadie se lo otorgue; y
- (b) Valor dado por el ser humano: Lo que valoriza el ambiente es la relación que el ser humano guarda con éste. De acuerdo a esta tendencia, el valor depende de la asignación de las personas.

Por su parte, Rideout y Hesseln (1998) también distinguen estas dos posiciones en la asignación de valor al ambiente (y por tanto a los servicios ambientales), llamándolas:

Antropocéntrica: El ambiente es valioso en tanto sea útil al ser humano;

Egocéntrica: El valor es ajeno a la percepción que tengan los seres humanos.

Los servicios ambientales no fueron considerados como recursos susceptibles de valorarse económicamente hasta que éstos escasearon. Aquí es necesario aclarar, que el concepto de escasez tiene que ver, no sólo con la cantidad del recurso, sino también con la calidad y el costo de extracción del mismo (CP-CONAFOR, 2004). Por ejemplo, en el caso de la contaminación del agua, en la medida que la calidad del recurso hídrico disminuya, será incapaz --sin un tratamiento previo-- de satisfacer ciertas necesidades de consumo.

Para efectos del presente estudio, se entenderá como valoración económica a la asignación de valores monetarios a los bienes y servicios proporcionados por el ambiente, independientemente de que éstos cuenten o no, con un precio de mercado.

Por su parte, Azqueta (1994b) establece que "...valorar económicamente los recursos naturales significa poder contar con un indicador de su importancia en el bienestar de la sociedad que permita compararlos con otras posibles alternativas, utilizando para ello un denominador común, el cual puede ser el dinero...". Al respecto, Romero (1997) la define formalmente como el conjunto de técnicas y

métodos que permiten medir las expectativas de beneficios y costos derivados de algunas de las siguientes acciones:

- a) Uso de un activo ambiental;
- b) Realización de una mejora ambiental; y
- c) Generación de un daño ambiental.

Fundamentos teóricos

Debido a que la valoración económica tiene sus bases en la escuela neoclásica, en este trabajo se retoman principios de la economía del bienestar y la teoría subjetiva del valor, donde una premisa básica es que un bien o servicio tiene valor en la medida que genera una utilidad que contribuye al bienestar individual. Otra premisa es que los agentes económicos, llámese empresas, consumidores, familias o individuos, tienen total autonomía para elegir los bienes o servicios que generen el nivel de bienestar deseado. Sin embargo, uno de los principales inconvenientes en esta teoría es la medición del nivel de utilidad (Ferguson *et al.*, 1994).

En este sentido, el economista italiano Wilfrido Pareto realizó una importante aportación -partiendo de sus investigaciones se sentaron las bases de lo que hoy se conoce como el método de valoración contingente, el cual es ampliamente utilizado en el presente estudio. Él estableció que diferentes combinaciones de bienes pueden generar el mismo nivel de utilidad. Dicho supuesto de sustitución generó el concepto de Tasa Marginal de Sustitución, el cual establece que dos bienes (X y Y) pueden ser consumidos en cantidades diferentes en una misma curva de indiferencia, es decir, generando el mismo nivel de utilidad (Ferguson *et al.*, 1994).

Este concepto de utilidad se complica cuando es usado como medición del bienestar social, lo cual compete a la rama de la economía, conocida como economía del bienestar, cuyo objetivo es el de generar herramientas capaces de ayudar a la sociedad en la toma de decisiones buscando la maximización del bienestar colectivo (Richard, 2004). Es importante destacar el principio conocido como el óptimo de

Pareto el cual es uno de los principales pilares de la economía del bienestar. El criterio u óptimo, establece que una política o cambio es socialmente aceptable siempre y cuando en ésta se busque mejorar a una persona sin empeorar a otra. Así, el óptimo de Pareto es alcanzado cuando la situación de algún individuo no puede ser mejorada sin empeorar la de otro (Richard, 2004).

Por otra parte, la economía ambiental ha hecho uso de conceptos desarrollados por la microeconomía y la economía del bienestar, con el fin de cuantificar monetariamente los cambios que una persona o un sector de la población sufren a partir de la variación en el inventario, calidad o el precio de un recurso o servicio ambiental. Para lograr lo anterior, existen cuatro formas:

- a) El Excedente del Consumidor (EC): Desarrollado por el economista británico Alfred Marshall, tiene como objetivo el obtener una medida del cambio en el bienestar, expresado monetariamente, cuando se da un cambio en el flujo del servicio o bien mediante el estudio de la curva de demanda (Larqué, 2003).
- b) Variación Compensatoria (VC) y Variación Equivalente (VE): Éstas son medidas de bienestar originalmente propuestas por John R. Hicks (Hicks, 1943) citado por Richard (2004). En ellas se busca medir la preferencia de un individuo para cambiar de una situación de bienestar a otra tomando como referencia la cantidad de dinero que tal individuo está dispuesto a pagar o aceptar para moverse entre dichas situaciones.
- c) Excedente Compensatorio (EC): En esta medida se parte de ciertos supuestos, el precio del bien o servicio es cero y su cantidad consumida no puede ser modificada. De esta forma el EC es la cantidad de dinero que restada de la renta o ingreso de la persona, bajo la nueva situación en la cual se ha incrementado el flujo del bien o servicio, la devuelve a su situación original de bienestar (Larqué, 2003).
- d) Excedente Equivalente (EE): Aquí se parte del supuesto de que el consumo del bien o servicio es fijo y no ajustable, así el EE es la cantidad de dinero que

se tendría que pagar al consumidor para que su bienestar se viera aumentado en la misma medida en que se ha incrementado el flujo del bien o servicio (Larqué, 2003).

Valoración Económica Total

La valoración económica total es un enfoque mediante el cual un elemento susceptible de valorar es descompuesto en categorías de valor. Se parte del supuesto que un bien o servicio está formado por varios atributos, algunos concretos y fáciles de cuantificar mientras que otros, dadas sus características, requieren más trabajo para ser medidos. El valor económico total (VET) es la suma de todos los componentes (CP-CONAFOR, 2004). Como se señala en CP-CONAFOR (2004), los límites y la terminología para los componentes del VET varían levemente de un autor a otro. Aunque generalmente coinciden en reconocer: (i) valor de uso y (ii) valor de no uso, los cuales a su vez suelen ser subdivididos en categorías.

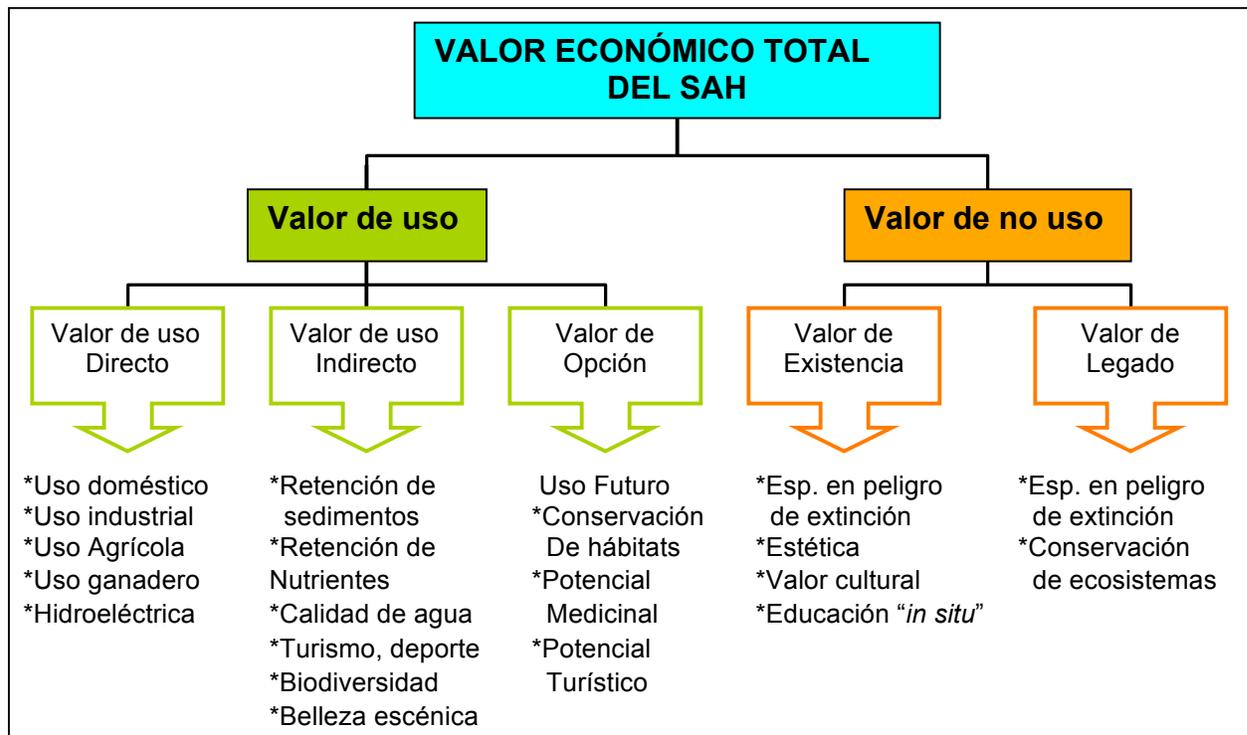
En el caso del SAH, Pérez *et al.* (2000) separan teóricamente los componentes del valor económico total de este servicio (Figura 1.4).

Métodos de valoración

Herruzo (2002) define los métodos económicos de valoración ambiental como el conjunto de procedimientos apropiados para identificar, en situaciones reales, las medidas monetarias teóricas de los cambios en el bienestar originados por las transformaciones ambientales.

Cuando se pretende valorar un bien o servicio ambiental comúnmente se pueden diferenciar dos enfoques muy relacionados entre sí: (i) se refiere a valorar el bien o servicio que proporciona cierto recurso ambiental; y (ii) puede interesar conocer el daño (o beneficio) ocasionado al ambiente por actividades económicas.

Cuando el servicio ambiental a valorar carece de precios de mercado existen dos opciones: (a) Métodos indirectos y (b) Métodos directos (Herruzo 2002). A continuación se describen cada uno:



Fuente: Modificado a partir de Pérez *et al.* (2000).

Figura 1.4. Componentes del valor económico del servicio ambiental hidrológico.

(a) Métodos indirectos (o de preferencias reveladas): Consisten en inferir el valor que las personas otorgan al servicio ambiental mediante el análisis del comportamiento de mercados bien establecidos con los que el servicio en cuestión esté relacionado. Hay una gran variedad de métodos o técnicas de valoración basados en este enfoque pero quizás los más utilizados son los métodos de *costo de viaje* y los *precios hedónicos*. Por otra parte, cuando se desea indagar sobre la contribución de ciertos activos ambientales en la

producción de bienes con mercados bien delimitados, usualmente se utiliza el enfoque de la *función de producción*. A continuación se describen brevemente cada uno.

Método del costo de viaje. La creciente demanda por espacios naturales con fines de esparcimiento ha generado la necesidad de valorar económicamente dichas actividades, lo cual es particularmente difícil, ya que su consumo se encuentra regulado sólo en parte por mecanismos de mercado. En respuesta a esto, el método de costo de viaje, ha sido de gran ayuda; éste básicamente supone la utilización de los costos incurridos en el viaje al espacio natural como medida de su valor. Esta información junto con la originada a partir del número de visitas al lugar en un determinado periodo, permiten estimar la demanda de los servicios recreativos. Así, por medio de la curva de demanda estimada es posible cuantificar el excedente del consumidor derivado del uso del servicio ambiental. Igualmente, lo anterior permite la cuantificación del valor económico derivado de mejoras (presentes o futuras) en la calidad ambiental.

Método de los precios hedónicos. Este método está basado en la teoría de las características de los bienes desarrollada por Lancaster (1966), Griliches (1971) y Rosen (1974) citados por Herruzo (2002). El supuesto principal es, si un bien se encuentra formado por diversos atributos, entonces su precio de mercado igualmente será un agregado de los precios de dichos componentes. Utilizando este método en la valoración de servicios ambientales se busca identificar aquellos atributos que conforman su precio de mercado. Posteriormente, haciendo uso de técnicas estadísticas es posible medir la contribución de cada atributo en el contexto global del valor de mercado.

Dado que este método requiere observaciones de los precios de los bienes y de los atributos de estos bienes, lo cual en la mayoría de los casos representa una relación bastante compleja, CP-CONAFOR (2004) establece que en su aplicación

generalmente son necesarias grandes series de datos y esto ha contribuido a una limitada (pero a menudo exitosa) aplicación en países en desarrollo.

Método de la función de producción. El bien o servicio ambiental en estudio es considerado como un factor adicional en la función de producción de algún bien, cuyo mercado se encuentre relacionado con el objeto de estudio. Un ejemplo es la valoración económica del recurso hídrico, tomando como base su aportación en la producción de cierto cultivo.

Un procedimiento alternativo es el método de *costos de reposición*, el cual consiste en valorar económicamente un deterioro ambiental en función de las acciones necesarias para volver a la situación ambiental inicial.

(b) Métodos directos (o de las preferencias establecidas): Estos métodos son utilizados cuando no es posible relacionar el bien o servicio ambiental con un mercado. Por lo que es necesario inferir valores económicos a partir de mercados simulados. En este caso, el método de *valoración contingente* es el más utilizado.

Método de valoración contingente. A diferencia de los anteriores, éste es un método directo de valoración; es decir que ante la ausencia de mercados propios o relacionados al objeto de estudio se simulan dichos mercados.

Con el método de valoración contingente se intenta averiguar mediante preguntas directas, la valoración que las personas otorgan a un bien o servicio ambiental. El método consiste en la aplicación de encuestas a los consumidores -actuales o potenciales- planteándoles un mercado hipotético en el cual se les invita a participar, ofreciendo varios precios, determinando así su disposición a pagar (DAP) por el servicio ambiental. LA DAP permite conocer la estructura de la demanda y la cantidad a pagar -en un periodo determinado- por el servicio ambiental, facilitando su incorporación a un estudio de beneficio-costos.

El método de valoración contingente (VC) se ha usado ampliamente en la valoración de servicios ambientales (Hidano *et al.*, 2005; Bandara y Tisdell, 2004; León y Vázquez-Polo, 2000; Pouta *et al.*, 2000; Melo y Donoso, 1995). Debido a que no está limitado a deducir preferencias de datos disponibles, es posible dirigir directamente las preguntas para indagar sobre los cambios específicos en los beneficios resultantes de cierto proyecto. Mediante las preguntas apropiadas, la VC puede proveer una estimación bastante confiable de la totalidad de los costos o beneficios derivados de cambios en el medio ambiente, en contraste, con algunos otros métodos detallados anteriormente, los cuales solo proveen información parcial de dichos costos o beneficios.

Por su parte, Azqueta (1994a) establece que la alta aceptación del método se ha consolidado desde que en 1979, el *Water Resource Council* de los Estados Unidos lo incluyera entre los tres métodos recomendados para valorar determinados beneficios de las inversiones públicas, y que en 1986, se le reconociera como apropiado para medir beneficios (y perjuicios) en el marco de la *Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act*.

Ventajas y desventajas de la VC

En una aplicación de este método y basándose en Flores (1996); Kelly (2001) opina que a pesar de existir un gran número de técnicas de valoración, la VC ha sido ampliamente utilizada en gran parte, por ser el único método que permite estimar disponibilidades de pago para características de usos pasivos o de “no uso” (i.e. existencia, opción).

Por su parte, Rojas-Padilla (2001) opina que una de las bondades más claras en la aplicación de la VC, tanto en la teoría como en la práctica, es la sostenibilidad de las inversiones, que se lograría como resultado de contar con información sobre las regiones hacia las cuales éstas debieran dirigirse (donde la DAP expresada fuera mayor). Otro punto importante es la selección de tecnologías que además de brindar servicio de buena calidad, estuviera dentro de las opciones que la comunidad

beneficiaria puede y está dispuesta a pagar; así como establecer tarifas acorde a las condiciones de oferta (costos) y demanda (capacidad y disponibilidad a pagar).

Azqueta (1994a) reconoce las siguientes ventajas relacionadas con este método:

- 1) Es un método exclusivo que cuantifica valores de no-uso;
- 2) No requiere de ningún supuesto previo, ni de ninguna estimación de la función de demanda de una persona; y
- 3) Es el único método que logra descubrir la *compensación exigida* para permitir el cambio que deteriora el ambiente o renunciar a uno que lo mejora.

Para Loomis (1989), el método de VC tiene la ventaja de suministrar información más precisa sobre la DAP de los individuos, lo cual se debe a que las preguntas que se emplean permiten asemejar mucho una acción de mercado viable y realista, de forma que los resultados obtenidos pueden ser comprobados en mercados simulados, además de que fácilmente pueden incorporarse a los análisis de beneficio-costos.

En cuanto a las desventajas del método, Romero (1997) coincide con Loomis (1989), expresando que básicamente éstas son las debilidades y sesgos que posee cualquier procedimiento de encuesta directa, derivados de una estimación de servicios (por lo tanto intangibles) y planteamientos hipotéticos, lo cual relaciona estrechamente la calidad de los resultados con la objetividad en que éstos son presentados.

En apoyo a lo anterior, Smith (1993) establece que un gran número de economistas se mantienen escépticos ante los resultados derivados de las respuestas a preguntas hipotéticas, lo cual ha redundado en objeciones a la VC, principalmente en dos sentidos: ¿Es la VC segura? o ¿Es la VC precisa? Lo anterior ha puesto de manifiesto la necesidad de integrar aspectos relacionados a la psicología en los cuestionarios utilizados en la VC, tanto en su diseño, aplicación y análisis.

Finalmente, Azqueta (1994a) considera que los sesgos potenciales en la elaboración de cuestionarios o encuestas para la aplicación de la VC pueden ser diversos y los clasifica en sesgos instrumentales y sesgos no instrumentales. Los primeros se asocian a la estructuración misma de la encuesta, mientras que los segundos están asociados a la posición personal del entrevistado ante el objeto de la investigación.

1.5 El pago de servicios ambientales

De acuerdo a Pagiola y Platais (2002), en la mayoría de los casos, los usuarios o poseedores de la tierra reciben poco beneficio de la conservación de los bosques, siendo éste en ocasiones inferior a lo que obtendrían ante un uso alternativo (v.g. ganadería, cultivos agrícolas, servicios recreativos).

La deforestación redonda en costos a las poblaciones aguas abajo, dado que dejarán de percibir beneficios ambientales, ya sea en cantidad, calidad o ambos. Ejemplos de estos beneficios son: calidad y cantidad del agua, control de avenidas, filtración, tolvaneras, disminución de áreas recreativas, pérdida de biodiversidad, entre otros. Los pagos por parte de los beneficiarios aguas abajo (actuales o potenciales) pueden contribuir a la conservación de los espacios naturales generadores de servicios ambientales, siendo una opción atractiva para los dueños o poseedores de dichos espacios. Lo anterior implica que los pagos tendrán que ser forzosamente iguales o mayores a los obtenidos por el uso anterior a la implementación del pago por servicios ambientales (PSA) (Figura 1.5).

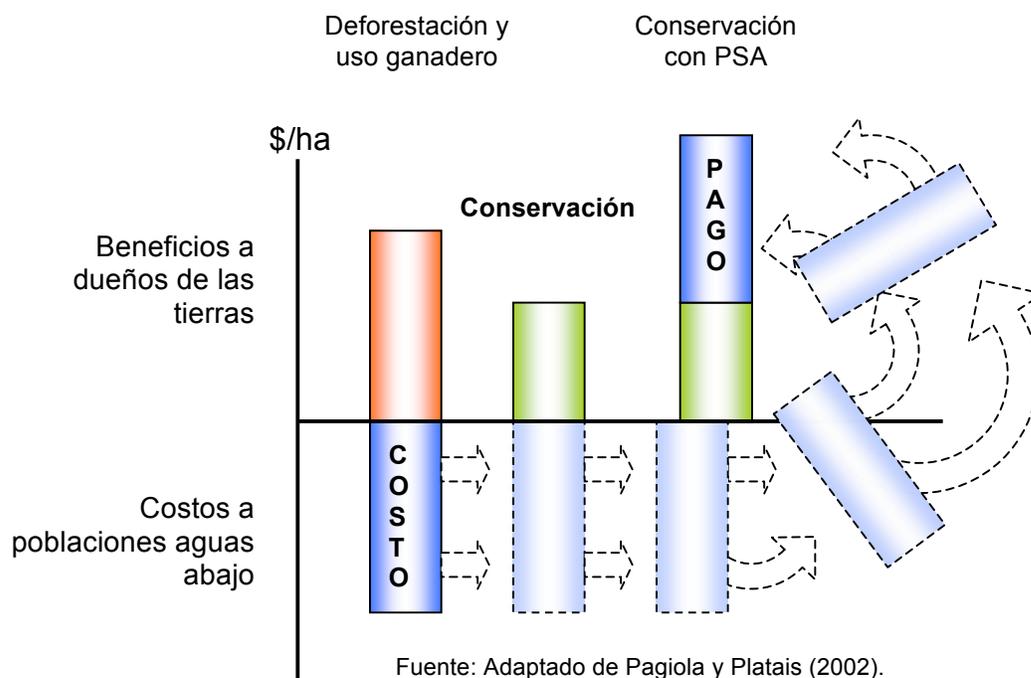


Figura 1.5. La lógica del pago de servicios ambientales (PSA).

De acuerdo a Stürzinger y Bustamante (1999) los efectos positivos esperados de la implementación de los PSA del tipo hidrológico son:

- El incremento de la calidad y cantidad de agua para uso doméstico;
- La disminución del caudal y régimen de agua para consumo humano;
- La regulación del caudal y régimen de agua para riego;
- La recarga de acuíferos subterráneos; y
- La disminución de riesgos y daños por fenómenos naturales (inundaciones, derrumbes, etc.).

Si existe la demanda de un recurso y la oferta capaz de satisfacerla adecuadamente, el mecanismo de PSA consistirá en coordinar los flujos financieros que se originen de las tarifas e impuestos derivados. Logrando así cubrir las necesidades de los demandantes con un precio asequible pero garantizando a la vez un flujo continuo de los SA mediante la satisfacción de los oferentes, a la vez que se maneja y conserva el recurso hídrico de manera sostenible (PASOLAC, 2000).

Es importante aclarar que los sistemas de PSA compensan el incremento en la calidad y cantidad de los servicios ambientales, y no es un pago por los recursos ambientales en sí mismos (FAO-REDLACH, 2004).

El pago de servicios ambientales en México

En la década de 1990, pequeños proyectos de SA fueron concebidos en varias partes del país, como: venta de carbono de los bosques de Chiapas, certificación de proyectos forestales en Oaxaca por servicios hídricos, proyectos de reforestación alrededor de la Ciudad de México. Adicionalmente a estos esfuerzos, se realizaron varios intentos para relacionar los servicios hídricos de bosques con ciudades cercanas, incluyendo propuestas en Durango y Puebla (Torres, 2005). Aunque estas nunca alcanzaron el éxito esperado, demostraron una creciente tendencia por los esquemas de PSA.

Con relación a lo anterior, Madrid (2005) reporta que en los últimos años se han venido multiplicando estas negociaciones creando así diversos esquemas y arreglos, lo que ha permitido entender que el PSA es sin duda una herramienta capaz de impulsar cambios importantes en el sector rural en términos de prácticas de uso del territorio, en el fortalecimiento de los mecanismos de control interno (locales-regionales), así como cambios en las relaciones entre actores regionales generando flujos importantes de apoyos económicos a zonas pobres tradicionalmente marginadas y con acceso limitado a este tipo de apoyos.

Por su parte, CP-CONAFOR (2005a) consideran que en años recientes se ha dado un notable impulso a los esquemas de pago de servicios ambientales en México, especialmente a partir de la puesta en marcha de importantes instrumentos de política forestal y ambiental de corto, mediano y largo plazos. Dentro de éstos se encuentran el Plan Nacional de Desarrollo 2001-2006, el Programa Nacional de

Medio Ambiente y Recursos Naturales 2001-2006, el Programa Nacional Forestal 2001-2006 y el Programa Estratégico Forestal para México 2025. Además, se ha incluido a los servicios ambientales dentro del marco legal establecido en la reciente Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable.

A finales del 2003, la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) dio inicio al *Programa de Pago de Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH)*, el cual consiste en otorgar una compensación económica a los dueños y poseedores de bosques y selvas del país que decidan manejar sus áreas forestales arboladas con fines de proveer servicios hidrológicos¹. El municipio de Coatepec en el estado de Veracruz fue el primero que recibió apoyo del PSAH para llevar a cabo proyectos de conservación y desarrollo en áreas boscosas y así garantizar el abasto de agua en las zonas urbanas de ese municipio (CP-CONAFOR, 2005a).

1.6 El mercado de servicios ambientales hidrológicos

Se entiende por mercado al lugar físico o virtual en que confluyen las fuerzas de la oferta y la demanda para realizar la transacción de bienes y servicios a un determinado precio. El mercado comprende todas las personas, hogares, empresas e instituciones que tiene necesidades a ser satisfechas con los productos o servicios de los oferentes. Son mercados reales los que consumen estos productos y servicios, y mercados potenciales los que no consumiéndolos aún, podrían hacerlo en el presente inmediato o en el futuro (CP-CONAFOR, 2005b).

Se pueden identificar y definir los mercados en función de los segmentos que los conforman; éstos incluyen los grupos específicos compuestos por entes con características homogéneas. Específicamente, el mercado de los servicios ambientales hidrológicos (SAH) se encuentra formado por los dueños o

¹ Aquellos que opten por no aprovechar los recursos maderables del área y sí conservarla para fomentar la captación de agua y regulación del ciclo hidrológico en beneficio de las comunidades aledañas mayores de 5,000 habitantes.

poseionarios de las tierras que brindan el servicio ambiental (oferentes) y por los beneficiarios del servicio (agua) en sus diferentes segmentos (doméstico, agrícola, pecuario, etc.) de acuerdo al uso que se le da al recurso (CP-CONAFOR, 2005b).

El presupuesto de aguas

De acuerdo a Barrantes y Vega (2002b), el presupuesto de aguas se refiere a la cuantificación física de la cantidad de agua ofertada y demandada en una región, con la finalidad de generar información relacionada con el mercado de los SAH. Para la construcción del presupuesto de aguas se requiere de la comprensión del ciclo hidrológico -relación atmósfera-tierra- y del proceso hidrosocial -administración social del recurso- como dos grandes componentes que determinan la disponibilidad y aprovechamiento del recurso hídrico. El ciclo hidrológico explica, fundamentalmente, el proceso natural que mantiene una oferta de agua y el proceso hidrosocial explica la forma en cómo se administra la demanda de agua en el ámbito económico. A continuación se describe cada uno de estos aspectos.

La oferta del SAH

El cálculo de la cantidad hídrica ofertada exige conocer el balance hídrico de las cuencas hidrológicas estudiadas. Para cada una de las cuencas se necesita información cuantitativa referente a los componentes del ciclo hidrológico, con el fin de conocer la cantidad ofertada total en el área de estudio (Barrantes y Vega, 2002a).

El balance hídrico (CP-CONAFOR, 2005c) representa un concepto básico en los estudios relacionados con la producción de agua, el cual proporciona un campo de estudio sobre la conducta hidrológica en un área de captación y puede usarse para identificar los efectos del manejo de la cobertura.

La estimación de la producción de agua se basa en el concepto de balance hídrico para un área de captación, el cual se escribe como:

$$P = ET + R + D + \Delta S \quad (1.1)$$

Donde:

P = Precipitación;

ET = Evapotranspiración;

R = Escurrimiento superficial medido como flujo de arroyos;

D = Recarga subterránea; y

ΔS = Cambio del almacenamiento de agua en el suelo.

Los modelos hidrológicos y su clasificación

Para la estimación del balance hídrico se utilizan modelos hidrológicos, los cuales representan algunas ventajas ante los métodos de medición directa o de campo, tales como: la posibilidad de utilizar variables no cuantificables. Además, de permitir ajustar variables y realizar proyecciones. Por otra parte, los costos y el tiempo requerido son moderados en relación con la calidad de los resultados (CP-CONAFOR, 2005c).

De acuerdo a Woolhiser y Brakensiek (1982), los modelos hidrológicos se clasifican en: *Materiales* y *Matemáticos*. Los primeros se dividen a su vez en físicos y análogos y son utilizados principalmente para analizar la estructura de cauces en la ingeniería de la construcción. Son de aplicación muy específica. Los modelos matemáticos pueden ser teóricos o empíricos y pueden a su vez clasificarse como determinísticos o estocásticos. Los modelos matemáticos-teóricos son basados en leyes físicas y principios teóricos, mientras que los modelos matemáticos-empíricos se basan en observaciones de las relaciones dadas entre las entradas-salidas del sistema (Brooks *et al.*, 2003).

El modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool)

El modelo SWAT fue desarrollado por Jeff Arnold y colaboradores para el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, Agricultural Research Service

(ARS); este modelo se desarrolló para predecir el impacto de prácticas de manejo sobre la producción de agua, de sedimentos y de químicos agrícolas en cuencas grandes y complejas con variación de suelo, uso y condiciones de manejo por largos periodos (Neitsch *et al.*, 2002). Es considerado un modelo físico que integra variables del clima, suelo, topografía, vegetación y prácticas de manejo del suelo para predecir los cambios que pueden ocurrir en una cuenca. El modelo utiliza grandes cantidades de datos y es posible estudiar posibles cambios en el futuro. También se considera como un modelo continuo, pero no está diseñado para predecir efectos por tormentas individuales (Benavides-Solorio, 1998).

El modelo SWAT incorpora características de varios modelos desarrollados por el ARS y es consecuencia directa del desarrollo del modelo SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins) (Williams *et al.*, 1985; Arnold *et al.*, 1990).

El modelo SWAT tiene las siguientes características (Neitsch *et al.*, 2002):

- *Se basa en variables físicas.* En lugar de incorporar ecuaciones de regresión para describir la relación entre las variables de entrada y salida, requiere información específica acerca del clima, propiedades de suelo, topografía, vegetación y las prácticas de manejo que se están llevando a cabo. Los procesos físicos asociados con el movimiento de agua, movimiento de sedimentos, crecimiento de los cultivos, ciclo de nutrimentos, etc. se modelan directamente usando la información específica como entrada.
- *Es un modelo de simulación continua;* es decir, se trata de un modelo de producción de largo plazo; no está diseñado para simular fenómenos eventuales como inundaciones.

Experiencias con el modelo SWAT

El modelo SWAT por su versatilidad y eficiencia de uso ha sido ampliamente utilizado a nivel mundial; se han realizado balances hidrológicos en Italia, Alemania, Australia, Estados Unidos, Sudamérica y México. En la mayoría de los casos el

modelo se ha ajustado bien a los datos, por lo que es una buena alternativa para predecir la cantidad de agua sobre la superficie y los sedimentos que se pueden esperar en una cuenca (Benavides-Solorio *et al.*, 2003).

Versiones anteriores al modelo SWAT, como por ejemplo el modelo SWRRB, se aplicaron en México por Fernández (1996) y Benavides-Solorio, (1998) en la cuenca agrícola *El Tejocote* en el Estado de México y en la cuenca forestal *El Carrizal* en Jalisco, respectivamente. Ambos autores encontraron una buena eficiencia del modelo para predecir la producción de agua con coeficientes de determinación (R^2) de 0.79, 0.87 y 0.60 en los tres años de medición para la primera cuenca. En la cuenca *El Carrizal*, Benavides-Solorio (1998) obtuvo un valor de R^2 de 0.91. La predicción de la producción de sedimentos en ambas cuencas tuvo un valor de R^2 cercano a 0.65 en promedio en la cuenca *El Tejocote* y 0.78 en la cuenca el Carrizal. Con el uso del modelo SWAT también se han obtenido buenas experiencias recientes, como la mostrada por Torres-Benítez *et al.* (2004) en la cuenca *El Tejocote*, con valores de R^2 de 0.94 y 0.84 para la producción anual de agua en dos años consecutivos.

A pesar de su buena eficiencia, los modelos hidrológicos como el SWAT deben usarse sólo como apoyo para la toma de decisiones, ya que cuando se modelan escenarios futuros en el campo pueden ocurrir modificaciones que no necesariamente consideraron los modelos. Por lo anterior, es necesario promover el establecimiento de cuencas experimentales en áreas forestales para obtener información confiable durante varios años.

La demanda del SAH

La demanda del SAH se refiere a la cantidad de agua que es usada en las diversas actividades económicas (Barrantes y Vega, 2002b). La utilización del agua y la forma en que se obtiene depende del subsector económico, región o país.

Consecuentemente, la demanda es afectada por el proceso hidrosocial ², especialmente en el uso doméstico.

En el proceso de cuantificar la demanda de los SAH se deben de considerar algunos aspectos principales, tales como (FAO-REDLACH, 2004):

- i. Los tipos de usos de los servicios:
Usos consuntivos (agua potable, agricultura y algunos usos industriales);
Usos no consuntivos (generación de energía eléctrica); y
Servicios culturales (recreación, turismo).
- ii. La valoración económica de los recursos ambientales debe realizarse con la inclusión de los diversos actores involucrados en la cuenca (oferentes y demandantes).
- iii. Se debe evaluar el costo de oportunidad teniendo en cuenta aspectos ambientales, económicos y sociales. Esto implica que posiblemente el pago no va a ser el mismo para todos los actores en la cuenca debido a las asimetrías socioeconómicas y biofísicas dentro de la misma. Es decir, un productor por ejemplo en la parte alta no percibe los mismos ingresos que aquel de la parte baja, ni afecta la externalidad en la misma magnitud. Una vez hecha esta evaluación ex ante, se tendrá como resultado el costo de oportunidad que se debe pagar por un cambio en el uso de la tierra en los lugares priorizados lo cual será la base para negociar con los beneficiarios del servicio ambiental.
- iv. Es importante hacer un análisis global de costo/beneficio a través de una valoración que considere los costos y beneficios económicos, sociales y ambientales, incluyendo los costos de transacción. En algunos casos, como a nivel de pequeñas comunidades donde los costos de transacción por estudios económicos sean demasiado altos para proyectos y donde los

² El *proceso hidrosocial* se da en el uso del agua desde que se capta para las actividades humanas hasta que se deposita en el océano (Barrantes y Vega, 2002b).

oferentes y demandantes pueden llegar a establecer acuerdos basados en la confianza, no sería necesario valorar la disponibilidad de pago de la demanda ni la compensación exigida por parte de los proveedores. Simplemente se podría establecer una tarifa dependiendo de una categorización del uso del suelo, y que estos valores sean un incentivo suficiente para preservar la zona alta de la cuenca.

1.7 Propósito general del estudio y objetivos de la investigación

La presente investigación pretende establecer las bases para la creación de un mercado de SAH en la cuenca de Tapalpa, Jalisco. Para lo cual fue necesario la determinación del balance hidrológico, la cuantificación de la cantidad demandada del servicio hídrico por parte de los pobladores de la cuenca y su disponibilidad a pagar (DAP) por dicho servicio, así como el costo de oportunidad de la superficie boscosa en la cuenca. Dicha información permitió comparar la DAP del SAH con el costo de oportunidad total de conservar y recuperar la superficie forestal dentro de la cuenca.

Adicionalmente, se proyectó la cantidad demandada y ofertada del recurso hídrico dentro de la cuenca, creando escenarios que simulan decrementos en la oferta e incrementos en la demanda de agua, con el propósito de determinar si en el largo plazo la oferta del recurso hídrico captado en la cuenca bajo estudio será capaz de satisfacer la demanda de agua de la población de Tapalpa.

Los objetivos específicos de la investigación son:

- (1) Cuantificar la cantidad ofertada del SAH;
- (2) Determinar la cantidad demandada y la disponibilidad a pagar del recurso hídrico de acuerdo a su uso y estimar el costo de oportunidad total de la superficie forestal en la cuenca;
- (3) Realizar un análisis comparativo entre las cantidades ofertadas y demandadas del SAH;
- (4) Determinar la factibilidad técnica de implementar un mercado de pago de SAH en el área de estudio, y aportar elementos útiles en la operación del Programa de PSAH; y
- (5) Analizar el comportamiento de la relación cantidad ofertada-demandada del agua en el largo plazo en la cuenca Tapalpa.

1.8 LITERATURA CITADA

- ANR Communication Services. 2002. Watershed function. Division of Agriculture and Natural Resources. University of California. Oakland, CA. Publicación 8064.
- Azqueta, O.D. 1994a. Valoración económica de la calidad ambiental. McGraw-Hill. Madrid, España. 299 p.
- Azqueta, O.D. 1994b. La problemática de la gestión óptima de los recursos naturales: Aspectos institucionales. *In* Análisis económico y gestión de recursos naturales. Azqueta, D. y Ferreiro Eds. Alianza Editorial, S.A. Madrid, ES. pp. 51-98.
- Baker, M.B. 1988. Selection of silvicultural systems for water. *in*: Baumgartner, D.M. and J.E. Lotan (eds.), Ponderosa pine - the species and its management. Pullman, WA. University of Washington Cooperative Extension. 201-211 pp.
- Bandara, R. y C. Tisdell. 2004. The net benefit of saving the Asian elephant: A policy and contingent valuation study. *Ecological Economics* 48(2004): 93-107.
- Barrantes, G. y M. Vega. 2002a. Valoración económica del servicio ambiental hídrico: caso de aplicación, Cuenca del Río Tempisque, Instituto de Políticas para la Sostenibilidad (IPS). Costa Rica. 15 p. E-mail: gerardo@ips.or.cr. www.ips.or.cr
- Barrantes, G. y M. Vega. 2002b. El servicio ambiental hídrico: Aspectos biofísicos y económicos. Instituto de Políticas para la Sostenibilidad (IPS). Heredia, Costa Rica. 56 p.
- Benavides-Solorio, J. de D. 1998. Calibración y validación del modelo hidrológico SWRRB en la cuenca forestal El Carrizal, Tapalpa, Jalisco. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Instituto de Recursos Naturales, Especialidad Forestal, Montecillo, México. 261 p.
- Benavides-Solorio, J. de D., J. G. Flores-Garnica, M. B. Baker, A. Medina y E. Talavera-Zuñiga. 2003. Origen del escurrimiento y su calidad en la cuenca de montaña El Carrizal, Tapalpa, Jalisco, México. *In*: Memorias del Tercer Congreso Latinoamericano de Manejo de Cuencas Hidrográficas, FAO, Arequipa, Perú, pp: 1-10.
- Benavides-Solorio, J. de D., J. G. Flores-Garnica, M. de J. González-Guillén, D. A. Moreno-González, J. R. Valdez-Lazalde y J. A. Ruiz-Corral. 2005a. Modelaje hidrológico aplicando el modelo SWAT en la cuenca forestal Tapalpa, Jalisco. *In*: Memorias del VII Congreso Mexicano de Recursos Forestales, Almanza et.

al. (eds.) 26-28 de octubre de 2005, Chihuahua, Chih. Universidad Autónoma Chihuahua, Delicias, Chihuahua, pp. 280-292.

Benavides-Solorio, J. de D., J. G. Flores-Garnica, M. Baker Jr., A. Medina y E. Talavera-Zuñiga. 2005b. Producción de agua en la cuenca forestal El Carrizal, Tapalpa, Jalisco, un análisis para los servicios ambientales. *In*: Contribución al estudio de los servicios ambientales. Benavides-Solorio, J. de D. *et al.* (eds). Libro Técnico No. 1. SAGARPA-INIFAP-CIRPAC. Guadalajara, Jalisco. pp. 93-111.

Bosch, J. M. y J. D. Hewlett. 1982. A review of catchment experiments to determine the effects of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 55 (1/4):2-23.

Brooks, K.N., P.F. Folliott, H.M. Gregersen y L.F. DeBano. 2003. Hydrology and the management of watersheds. Iowa State University Press/ Ames. Third Edition. United States of America. Chapters 17,18.

Calder, I.R. 1998a. Water resource and land-use issues. SWIM paper no.3. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute.

Calder, I. R. 1998b. Water use by forests, limits and controls. *Tree Physiology* 18:625-631.

Cornish, P.M. 1989. The effects of radiata pine plantation establishment and management on water yields and water quality - a review. Technical Paper Forestry Commission of NSW: 49-53.

CP-CONAFOR (Colegio de Postgraduados-Comisión Nacional Forestal). 2004. Evaluación del programa de pago de servicios ambientales hidrológicos (PSAH 2003). Anexo 19: Revisión de literatura sobre valoración económica. Montecillo, México. 28 p.

CP-CONAFOR (Colegio de Postgraduados-Comisión Nacional Forestal). 2005a. Evaluación del programa de pago de servicios ambientales hidrológicos (PSAH 2004). Informe Final. Montecillo, México. 98 p. + Anexos.

CP-CONAFOR (Colegio de Postgraduados-Comisión Nacional Forestal). 2005b. Estudio de mercado del servicio ambiental hidrológico en la cuenca de Tapalpa, Jalisco. Estudio de caso. Evaluación del programa de pago de servicios ambientales hidrológicos (PSAH 2004) Montecillo, México. 84 p. + Anexos.

CP-CONAFOR (Colegio de Postgraduados-Comisión Nacional Forestal). 2005c. Cobertura y Producción de Agua en Cuencas Arboladas. Estudio de caso.

Evaluación del programa de pago de servicios ambientales hidrológicos (PSAH 2004) Montecillo, México. 86 p. + Anexos.

Diario Oficial de la Federación. 2001. Plan Nacional de Desarrollo 2001-2006. Presidencia de la República, México. 30 de mayo de 2001.

Enciclopedia de los Municipios de México, 2000. Centro Nacional de Desarrollo Municipal, Gobierno del estado de Jalisco. Consultado en línea. Disponible en: <http://fortalecimientomunicipal.jalisco.gob.mx/Monografias/Tapalpa.htm>.

FAO-REDLACH, 2004. Foro electrónico sobre sistemas de pago por servicios ambientales en cuencas hidrográficas. Informe final. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Red Latinoamericana de Cooperación Técnica en Manejo de Cuencas Hidrográficas (REDLACH). Santiago, Agosto 2004

FEA (Fondo Educación Ambiental). 2006. El agua en México: Lo que todas y todos debemos saber. Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A.C.. Centro Mexicano de Derecho Ambiental, A.C. Presencia Mexicana Ciudadana Mexicana, A.C. México. 93 p.

Ferguson, C.E. y J.P. Gould. 1994. Teoría microeconómica. Fondo de Cultura Económica, 3ª Edición, México. 344 p.

Fernández R.D. 1996. Aplicación del modelo de simulación SWRRB para determinar el balance hidrológico de la cuenca el Tejocote, Atlacomulco, estado de México. Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados, Instituto de Recursos Naturales, Programa de Edafología, Montecillo, México. 243 p.

FNUAP (Fondo de Población de las Naciones Unidas). 2001. The state of world population. FNUAP. NY, USA. Consultado en línea. Disponible en: <http://www.unfpa.org/swp/2001/english/ch01.html>.

Griliches, Z. 1971. Price indexes and quality change. Harvard University Press, Cambridge, M.A.

Guatemala-INAP (Instituto Nacional de Administración Pública). 2005. Programa de investigación de hidrología forestal. Instituto Nacional de Bosques. Guatemala. 38 p.

Herruzo, A. 2002. Fundamentos y métodos para la valoración de bienes ambientales. Departamento de Economía y Gestión Forestal. Universidad Politécnica de Madrid. 13p.

Hicks, J. R. 1943. The four consumer's surpluses. Review of economics studies. Vol. XI, No. 1, pp31-41.

- Hidano, N., T. Kato y M. Aritomi. 2005. Benefits of participating in contingent valuation mail surveys and their effect on respondent behavior: A panel analysis. *Ecological Economics* 52(2005): 63-80.
- Hueting, R, L.B. De Boer, L. Jan y J. Huib. 1998. The concept of environmental function and its valuation ecological economics. Pp. 31-35.
- INEGI. 1984. Jalisco. Censo de Población y Vivienda, 1995. Resultados Definitivos. Tabulados Básicos. México. Disponible en: www.inegi.gob.mx. (Consulta: octubre de 2005).
- INEGI. 1991. Jalisco. Censo de Población y Vivienda, 1995. Resultados Definitivos. Tabulados Básicos. México. Disponible en: www.inegi.gob.mx. (Consulta: octubre de 2005).
- INEGI. 1996. Jalisco. Censo de Población y Vivienda, 1995. Resultados Definitivos. Tabulados Básicos. México. Disponible en: www.inegi.gob.mx. (Consulta: octubre de 2005).
- INEGI. 2001. XII Censo General de Población y Vivienda, 2000. Resultados Definitivos. Tabulados Básicos. Jalisco, México. Disponible en: www.inegi.gob.mx. (Consulta: octubre de 2005).
- Johnson, N., A. White y D. Perrot-Maître. 2000. Developing markets for water services from forests: Issues and lessons for innovators. *Forest Trends*. World Resources Institute and The Katoomba Group report. 19 p.
- Keppeler, E. T. y R. R. Ziemer. 1990. Logging Effects on Streamflow: Water Yield and Summer Low Flows at Caspar Creek in Northwestern California. *Water Resources Research* 26(7):1669-1679.
- Knight M. S. 2000. Impact of logging practice on water yield and quality in the Otway forest. A report for Department of Natural Resource & Environment. Pty Ltd. Australia. 59 p.
- Lancaster, K. 1966. A new approach to consumer theory. *Journal of Political Economics* (74). Pp. 132-157.
- Larqué S., B. S. 2003. Valoración de los servicios ambientales del bosque. Estudio de caso: Ixtapaluca, Chicoloapan, Chimalhuacan y La Paz, municipios del Estado de México. Tesis de Doctorado en Ciencias. División de Ciencias Económico-Administrativas. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Edo. de México. 141 p. + Anexos.
- León, C.J. y F.J. Vázquez-Polo. 2000. Modelización del aprendizaje en valoración contingente. *Investigaciones Económicas*. 24(1): 117-138.

- Loomis, J.B. 1989. Test-Retest reliability of the contingent valuation method: a comparison of general population and visitor responses. *American Agricultural Economic Association*. 79(1).
- Madrid, S. 2005. Identificación de experiencias relativas al desarrollo de mercados de servicios ambientales del bosque en México (estudio de caso). Informe final del inventario de experiencias exitosas. Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y World Bank.
- Manson, R. H. 2004. Los servicios hidrológicos y la conservación de los bosques en México. *Artículo de Forum. Madera y Bosques* 10(1):3-20.
- Melo, C. O., y G. Donoso H. 1995. Uso de encuestas de valoración contingente para valorar beneficios recreativos de parques urbanos, el caso del parque Bustamante. Departamento. de Economía Agraria, Facultad de Agronomía, Pontificia Universidad Católica de Chile. *Series de Investigación No. 68*: 1-68.
- Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, J.R. Williams y K.W. King. 2002. Soil and water assesment tool. Documentación teórica. Instituto de recursos Hídricos de Texas, College Station, Texas. TWRI Reporte TR-191
- O'Shaughnessy, P. y L. Bren. 1998. Hydrology and catchment Issues in the Victorian North East CRA / RFA Region. Bureau of Resource Sciences, Canberra, Australia. 83 p.
- Pagiola, S. y G. Platais, 2002. Pagos por servicios ambientales. *Environment strategy notes*. no. 3. The World Bank. USA. 4 p.
- PASOLAC (Programa para la Agricultura Sostenible en Laderas de América Central) 2000. Pago por servicios ambientales: Conceptos y principios. Editado por Carlos J. Pérez, Radoslav Barzev, Patrick Herlant. 1ª Ed. Managua, Nicaragua. 36 p.
- Pérez, C., Barzev, R. y Herlant, P. 2000. Algunos elementos para la concepción de acciones de pagos por servicios ambientales. Programa para la Agricultura Sostenible en Laderas de América Central (PASOLAC). Managua, NI, 20 p.
- Pouta, E., M. Rekola, J. Kuuluvainen, O. Tahvonen y C. Z. Li. 2000. Contingent valuation of NATURA 2000 nature conservation programme in Finland. *Forestry* 73(2): 119-128.
- Richard E., L. Darrell y A. Schmitz. 2004. *Applied welfare economics and public policy*. Englewood Cliffs, NJ. Prentice-Hall. 491 p.
- Rideout, D. y Hessel H. 1998. *Principles of forest environmental economics resources*. CO. EUA. Library of Congress. 96 p.

- Rojas-Padilla, J., Perez-Rincón M., Peña-Varón M. 2001. La valoración contingente: Una alternativa para determinar la viabilidad financiera de proyectos de tratamiento de aguas residuales en zonas rurales de países tropicales. Universidad del Valle. Instituto Cinara. Cali, Colombia. 14 p.
- Romero, C. 1997. Economía de los recursos ambientales y naturales. Alianza editorial, S.A. Madrid, España. 195 p.
- Rosen, S. 1974. Hedonic prices and implicit markets: Product differentiation in pure competition. *Journal of Political Economics*. 82(1): 21-38.
- Smith, V. 1993. Nonmarket valuation of environmental resources: An interpretative appraisal. *Land Economics*. 69(1):1-26.
- SNIM-INEGI, 2000. Estadísticas demográficas por población. Sistema Nacional de información municipal. Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (INAFED). Disponible en: http://www.inafed.gob.mx/wb2/INAFED/INAF_Sistema_Nacional_de_Informacion_Municipal (Consulta: octubre de 2005).
- Stadmüller, T. 1994. Impacto hidrológico del manejo forestal de bosques naturales tropicales, medidas para mitigarlo. Turrialba, Costa Rica. CATIE. Informe técnico No.10. 62 p.
- Stürzinger, U. y Bustamante, B. 1999. Pago por servicios ambientales. Participación equitativa a favor del medio ambiente. *Revista Centroamericana Laderas*. 2(5): 24-27.
- Torres-Benites, E., D.S. Fernández-Reynoso, J.L. Oropeza-Mota, y E. Mejía-Sáenz. 2004. Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca "El Tejocote", Atlacomulco, Estado de México. *Terra Latinoamericana* 22:437-444.
- Torres, J.M., Alix-García J., De Janvry A. y Sadoulet E. 2005. An assessment of Mexico's payment for environmental services program. CIDE (Centro de Investigación y Docencia Económicas) y Universidad de California. Berkeley. 79 p.
- Valentin, F.C., Valdivia, R.C., Scott, A. 2000. Productividad del agua en el distrito de riego 011, Alto Río Lerma. *Agrociencia* 36(4): 483-493
- Woolhiser, D.A. y D.L. Brakensiek. 1982. Hydrologic system synthesis. In *Hydrologic modeling of small watersheds*. American Society of Agricultural Engineer's. Monograph 5.

CAPÍTULO II

OFERTA HÍDRICA DE LA CUENCA FORESTAL TAPALPA, JALISCO, ORIENTADA HACIA LOS SERVICIOS AMBIENTALES³

WATER SUPPLY OF THE TAPALPA FORESTRY WATERSHED IN JALISCO, FOCUSED TO ENVIRONMENTAL SERVICES

RESUMEN

Con la finalidad de aportar elementos para determinar la factibilidad de crear un mercado de servicios ambientales hidrológicos, se estimó el balance hidrológico en la cuenca forestal de Tapalpa, Jalisco, México, aplicando el modelo hidrológico SWAT, el cual presentó un buen ajuste ($R^2 = 0.85$) con la producción de agua, al ser calibrado en una de las cinco subcuencas que integran el área de estudio. Las subcuencas forestales presentan un buen estado hidrológico al permitir la infiltración del agua al suelo a través del escurrimiento subsuperficial para luego emerger como escurrimiento superficial, con poca producción de sedimentos. Las subcuencas con mayor superficie agrícola o pecuaria presentan mayor escurrimiento superficial y mayor producción de sedimentos; la evapotranspiración en las subcuencas forestales es también más elevada. La oferta total del recurso hídrico, para un año promedio, asciende a 42,963,900 m³ año⁻¹.

***Palabras clave:* Servicios ambientales hidrológicos, balance hidrológico, modelo SWAT, cuenca forestal.**

³ Manuscrito sometido a publicación en la Revista Madera y Bosques.

SUMMARY

In order to assess the feasibility of creating a water market in the Tapalpa, Jalisco, Mexico watershed, the SWAT model was fitted to obtain the watershed water balance. The model was calibrated in one of the five subwatersheds included in the Tapalpa watershed with a good fit ($R^2 = 0.85$). All five forestry subwatersheds had good hydrologic behavior, allowing high infiltration water rates, which later on emerges as surface runoff with low sediment yields. The subwatersheds with high percentage of agriculture and grasslands produce more surface runoff as well as more sediment yields. The evapotranspiration from the forestry subwatersheds were higher than agricultural subwatersheds. The water supply from the Tapalpa watershed is 42'963,900 m³ per an average year.

Key words: Hydrologic environmental services, water balance, SWAT model, forestry watershed

2.1 Introducción

La distribución irregular de la cantidad y calidad de agua dulce, aunado a problemas de contaminación de la misma representan un problema que se ha acentuado en los últimos años en varias regiones de México. En este sentido, existen evidencias alarmantes de sobreexplotación de acuíferos y contaminación de cuerpos de agua y escurrimientos superficiales; informes de la Comisión Nacional del Agua (CNA) indican que dos tercios de los 188 acuíferos de mayor importancia del país están siendo sobreexplotados (DOF, 2003), debido a que el promedio de extracción anual de agua supera aproximadamente en dos veces el nivel de recarga natural.

Un ejemplo de problemas de calidad de agua superficial lo constituye la cuenca hidrológica Tapalpa, localizada en el estado de Jalisco. Este deterioro puede ser debido al aumento poblacional en la región y a un cambio de uso del suelo distinto al forestal, propiciando más áreas desprovistas de vegetación. Además, las

características propias de la región han permitido un desarrollo en la actividad turística a tal grado que empiezan a vislumbrarse problemas en la población de Tapalpa, principalmente relacionados con la provisión de servicios básicos –entre ellos el recurso hídrico– en el cual se exhibe una falta de planeación del manejo del agua.

Lo anterior deja de manifiesto la necesidad de implementar estrategias tendientes a mejorar el aprovechamiento y conservación del recurso hídrico mediante la conservación de la cubierta forestal en su estado natural; cumpliendo la función de regulador hídrico (Chang, 2003) al permitir altas tasas de infiltración, y en consecuencia la recarga de mantos freáticos con agua de alta calidad. Una de estas estrategias en México, desarrollada por el Gobierno Federal a través de la CONAFOR, lo constituye la creación de mercados de servicios ambientales hídricos (SAH), a través de los cuales se busca la retribución o compensación monetaria por parte de los usuarios de los SAH a los dueños de los ecosistemas que los proporcionan. A nivel mundial, los mercados de SAH son un mecanismo creciente para conservar y rehabilitar los recursos naturales proveedores de beneficios públicos (Torres *et al.*, 2005). Un programa pionero de este tipo se desarrolló en Costa Rica en 1997 (Pagiola, 2003); otros programas pilotos se han implementado en Latinoamérica y Asia (Echavarría, 2003; Kerr, 2003). En años recientes, estos programas se han introducido en países en desarrollo con resultados exitosos (World Bank, 2005).

En México desde hace varias décadas se ha venido desarrollando una serie de iniciativas sobre negociaciones e intercambios entre usuarios y proveedores de servicios ambientales con el objetivo de garantizar o mejorar la provisión de tales servicios. Estos intercambios no eran conceptualizados como “mecanismos de pago de SAH” o como un mercado formal, sino como simples arreglos entre partes interesadas (Madrid, 2005).

El éxito de un mercado de SAH se basa en la creación de un sistema en el cual interactúan armoniosamente las fuerzas de oferta y demanda, lo cual se logra al contar con información que permita su correcta determinación y caracterización. Por el lado de la oferta hídrica, el estudio de los aspectos físicos en la zona de estudio, incluyendo el conocimiento de las salidas de la misma (*i.e.* el balance hídrico y sus componentes) es una parte que coadyuvará al éxito en la implementación de un mercado de SAH (Pagiola *et al.*, 2003).

Con la finalidad de aportar elementos para determinar la factibilidad de crear un mercado de SAH, el presente estudio tuvo como objetivo cuantificar y caracterizar el balance hídrico total y el agua disponible para uso (oferta, en la cuenca Tapalpa, Jalisco). En un artículo complementario a este trabajo se reporta información referente a la demanda hidrológica en la cuenca (López-Paniagua *et al.*, 2006); información igualmente importante para la definición de un estudio de mercado hidrológico.

Un estudio de la oferta de SAH debe considerar el balance hídrico de las cuencas; conocimiento que se obtiene mediante la toma de datos de campo y el uso de modelos hidrológicos. Estos últimos permiten conocer algunas variables que no hayan sido tomadas en el campo y que son fundamentales para realizar un balance hidrológico completo y confiable. Los modelos hidrológicos tienen varias ventajas con respecto a los métodos de medición directos o de campo, tales como: realizar proyecciones futuras con base en los cambios de uso del suelo minimizando el impacto sobre los ecosistemas, ajustar variables de medición de campo, además de la ventaja de la economía ya que permiten tomar datos para calibrar modelos y obtener resultados sin esperar largos periodos de tiempo en la toma de datos de campo (Brooks *et al.*, 2003).

Los modelos empleados para la simulación de cuencas son representaciones simplificadas de los sistemas hidrológicos reales que permiten estudiar el funcionamiento de los mismos y sus respuestas a los diferentes factores que se

incorporan al modelo. Además predicen la respuesta hidrológica ante modificaciones de sus componentes, cuando el modelo esta bien sustentado. La mayoría de estos modelos se basan en aproximaciones de sistemas y difieren en la forma de cómo se considera cada componente del ciclo hidrológico (Brooks *et al.*, 2003). En general, los modelos hidrológicos de cuencas tienen cinco componentes básicos: (1) los procesos y características hidrológicas de las cuencas; (2) los datos de entrada; (3) las ecuaciones gobernantes; (4) los límites y condiciones iniciales, y (5) las salidas (Singh, 1995).

El modelo SWAT, utilizado en este estudio, es un modelo matemático, físicamente basado y con propiedades determinísticas; se considera un modelo continuo, no diseñado para predecir efectos por tormentas individuales. Tuvo sus inicios en el Agricultural Research Service (ARS) que forma parte del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) cuyo principal promotor fue Jeff Arnold en la década de 1990. El modelo antecesor al SWAT fue el modelo hidrológico SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins) desarrollado por Jim Williams y colaboradores (Williams *et al.*, 1985; Arnold *et al.*, 1990). El SWAT fue diseñado para predecir el impacto de algunas prácticas de manejo aplicadas al suelo en la producción de agua y de sedimentos en cuencas grandes y complejas. Integra variables del clima, suelo, topografía, vegetación y prácticas de manejo del suelo para predecir los cambios que pueden ocurrir en una cuenca.

Debido a su versatilidad y eficiencia, el modelo SWAT ha sido ampliamente utilizado en varios lugares del mundo como apoyo en la toma de decisiones sobre el manejo del agua (Maldonado-de-León *et al.*, 2001; Hernández, 2003; Benavides-Solorio *et al.*, 2005a).

Se han realizado balances hidrológicos en Italia, Alemania, Australia, Estados Unidos, Sudamérica y México. En la mayoría de los casos el modelo se ha ajustado bien a los datos, por lo que es una buena alternativa para representar ciclos

hidrológicos y predecir la cantidad de agua superficial y el arrastre de sedimentos que se puede esperar en una cuenca (Benavides-Solorio *et al.*, 2003).

En México, versiones anteriores al modelo SWAT (*v. gr.*, el modelo SWRRB), se han aplicado por Fernández *et al.* (1996) y Benavides-Solorio (1998) en la cuenca agrícola “El Tejocote” en el Estado de México y en la cuenca forestal “El Carrizal” en Jalisco, respectivamente. El primer autor obtuvo coeficientes de correlación de 0.80, 0.88 y 0.61 para tres años consecutivos en producción de agua y coeficientes de 0.79, 0.74 y 0.41 para la producción de sedimentos en los mismos tres años consecutivos (Fernández, 1996; Fernández *et al.*, 1999). Benavides-Solorio (1998) obtuvo coeficientes de correlación de 0.91 para la producción de agua y coeficientes de 0.78 para la producción de sedimentos en dos años consecutivos. Recientemente, con el uso del modelo SWAT se han obtenido buenas experiencias como la mostrada por Torres-Benites *et al.* (2004) en la cuenca “El Tejocote” con coeficientes de correlación de 0.94 y 0.84 para la producción de agua.

2.2 Materiales y métodos

Descripción del área de estudio

La cuenca Tapalpa está ubicada en el estado de Jalisco en la región centro-suroeste en el municipio del mismo nombre, a 130 km de la ciudad de Guadalajara (Figura 2.1). Sus coordenadas extremas son: 21°19'50" N y 101°21'50" O. La cuenca se encuentra en el sistema montañoso conocido como “Sierra de Tapalpa”, dentro del Eje Neovolcánico. Cubre un área de alrededor de 21000 ha; el principal uso del suelo es el forestal con un 44% de su superficie, seguido por el agrícola y urbano con 28% y el pecuario con 27%.

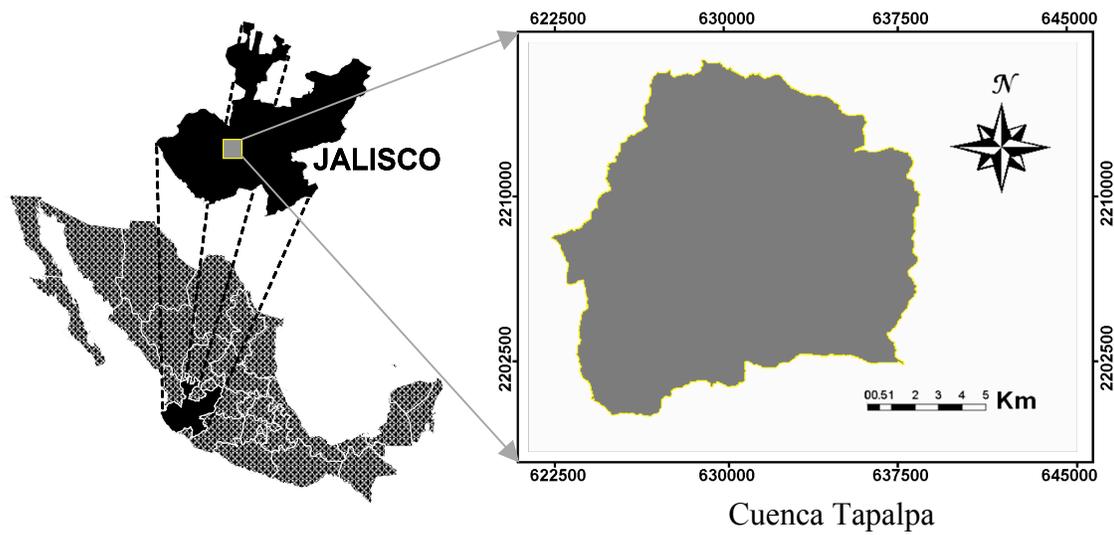


Figura 2.1. Localización de la cuenca Tapalpa en el estado de Jalisco.

Perfil sociodemográfico

De un total de 15,480 habitantes del municipio de Tapalpa, 7,901 (51%) son mujeres y 7,579 (49%) son hombres (INEGI, 2001). La tasa media anual de crecimiento de la población pasó de 1.76% en la década de los 70 a 2.5% en los 90. El número de habitantes creció en un 9.8% de 1995 al 2000 (EMM, 2000).

El porcentaje de la población urbana y rural del municipio no se ha modificado sustancialmente; en la década de 1990, el 63% de la población era rural y el 37% urbana, para el censo de 1995 la población rural descendió a un 60% y la urbana aumentó a un 40%. Para el año 2000 la población rural volvió a los valores de 1990 con un 64% de población rural y un 36% de población urbana. Esto último puede tener su origen en la inmigración de turistas que tienen sus casas de campo en los bosques de la región.

Referente al alcance que tiene la población a los servicios básicos, 80% de los habitantes disponen de agua potable; 68% de alcantarillado y 86% de energía eléctrica (EMM, 2000).

Planificación del proceso y recorridos de campo

Se realizaron recorridos de campo en la zona de estudio con el fin de tener un panorama general de la problemática de SAH, así como de las características socioeconómicas de los diversos sectores de la región. En las visitas se contactó a personal de las instituciones ligadas al manejo del recurso hídrico, así como a las autoridades municipales, la asociación ganadera local, la Unidad de riego “El Nogal”, y a los expertos que conformarían el equipo de trabajo, definiendo así el proceso a seguir en la realización del presente trabajo.

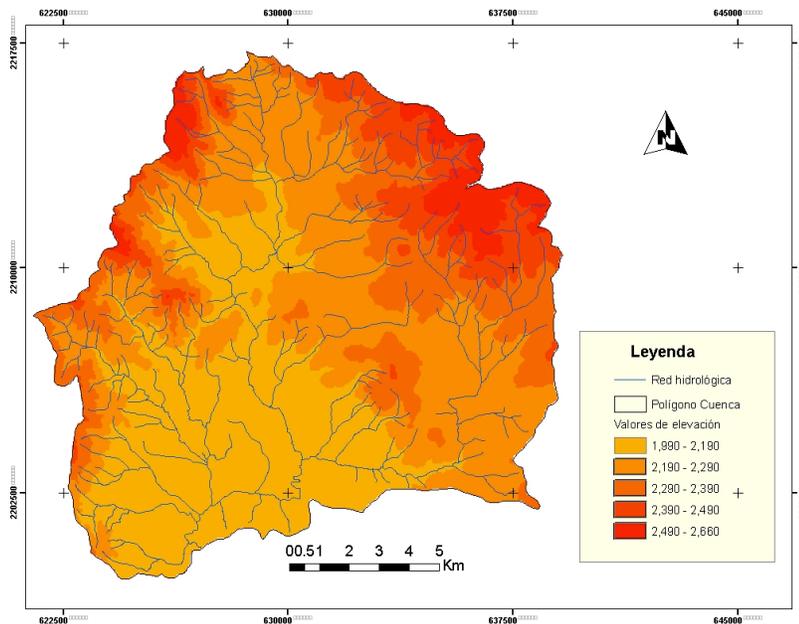
Determinación del balance hidrológico (oferta de agua)

La cuenca Tapalpa se tomó como base para estimar la oferta hídrica ya que cuenta con varios aspectos interesantes como son: contiene una subcuenca forestal donde se recolectaron datos de precipitación y escurrimiento que fueron utilizados para calibrar el modelo hidrológico; su sistema hidrológico incluye a la población de Tapalpa, la cual se abastece con el agua producida en la cuenca Tapalpa y se tienen varios manantiales que permiten entender el movimiento del agua en la cuenca.

Modelos de elevación digital y fisiografía de la cuenca Tapalpa

El modelo de elevación digital se generó a partir de datos vectoriales disponibles del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) de las cartas digitales números E13B14 y F13D84 (INEGI, 2000).

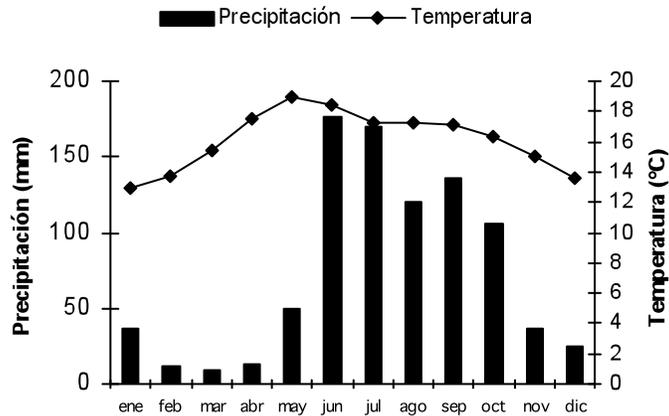
La información de campo y de cartas topográficas permite apreciar que en la Sierra de Tapalpa se distinguen varias topoformas. En las partes altas se localizan elevaciones escarpadas que alcanzan altitudes de hasta 2,660 m (Figura 2.2); entre ellos destacan los cerros El Estepeme, El Mescalillo, El Divisadero y El Fraile. En los lomeríos, la pendiente disminuye y sobre ellos se realizan actividades agropecuarias destacándose el cultivo de maíz, los cereales y el cultivo de la papa.



Fuente: Elaboración propia con datos del INEGI (INEGI, 2000) y campo.

Figura 2.2. Intervalo altitudinal y red hidrológica de la cuenca Tapalpa.

Clima. El clima de Tapalpa corresponde a un clima semi-templado, que tiene una precipitación invernal promedio de 84 mm, y representa entre el 5% y 10% de la precipitación total. La precipitación anual promedio es de 890 mm, tomada del año 1961 al año 2000 (Figura 2.3). La época de lluvias generalmente se presenta de junio a octubre y el número de días al año con lluvia es de 96. La evaporación anual es de 1,577 mm (Ruiz *et al.*, 2003). Los extremos de temperaturas están en 36 °C y -6 °C. Los datos del clima se obtuvieron de dos fuentes principalmente: (i) la estación meteorológica administrada por la CNA; y (ii) de datos de estaciones meteorológicas portátiles instaladas en la cuenca El Carrizal (Benavides-Solorio, 1998).



Fuente: Elaboración propia con datos de la estación meteorológica Tapalpa de la CNA.

Figura 2.3. Precipitación y temperatura media mensual (1961-2000) de la Estación Tapalpa.

Toma de datos en la cuenca Tapalpa

Estaciones meteorológicas portátiles de El Carrizal. Se instalaron en la subcuenca El Carrizal cuatro pluviómetros automáticos a inicios del año 1994 y estuvieron en operación durante 1994 y 1995. Se instaló un pluviómetro en la parte alta, dos en la parte media y uno en la baja de la subcuenca El Carrizal (Benavides-Solorio, 1998). Los pluviómetros son del tipo de cono basculante, almacenan la información a intervalos de 1 hasta 30 minutos, son de la marca SIGMA y tienen una precisión de hasta 0.01" (0.25 mm). Fueron construidos con los estándares del Servicio Nacional del Clima de los Estados Unidos. Se programaron para registrar datos cada 10 minutos, por lo que fue posible conocer la intensidad de la lluvia de todas las tormentas que fueron registradas. La información de lluvia se procesó por tormenta y por lluvia diaria. En la parte baja se instaló una minicomputadora para almacenar información sobre temperatura, humedad relativa, precipitación y altura del tirante de agua. Los datos registrados durante los dos años fueron utilizados para realizar la calibración del modelo SWAT a la cuenca El Carrizal.

Generación de estadísticos climáticos

Se utilizaron los modelos WXPARM y WXGEN de EPIC (Williams, 1995) para obtener probabilidades de lluvia y estadísticos de temperatura y precipitación. Se

utilizaron los datos de 1961 al 2003 de la estación meteorológica Tapalpa para generar los promedios y probabilidades estadísticas. Se utilizó también el modelo CLIMGEN para generar valores mensuales de radiación solar mensual, humedad relativa y velocidad del viento, utilizando los datos anteriormente mencionados. El generador climático del modelo SWAT se utilizó con fines comparativos y únicamente para estimar la probabilidad de lluvia.

Hidrología. La Sierra de Tapalpa se ubica en la región hidrológica 16 (RH-16), que corresponde a los ríos Armería-Coahuayana (INEGI, 2001b). El río Armería lo constituyen los ríos Ayuquila y Tuxcacuesco. El principal afluente del río Tuxcacuesco es el río Jiquilpán cuyo principal aportador es el río Tapalpa. El río Tapalpa es el abastecedor de la presa El Nogal. La cuenca que abastece la presa El Nogal, además del río Tapalpa tiene a los arroyos El Carrizal, Las Ánimas, El Zopilote y otros más pequeños. Dentro de éstos, existe una gran cantidad de manantiales los cuales determinan que la mayoría de los arroyos tengan corrientes perennes; cuando la sequía es extrema y el año anterior seco se presentan como corrientes efímeras. Los arroyos aquí mencionados fueron utilizados como base para realizar la división de la cuenca por subcuencas principales.

Medición de escurrimiento en la subcuenca El Carrizal. Se construyó una obra de aforo en la parte media de la subcuenca El Carrizal, aproximadamente en el límite entre el área forestal y el área agropecuaria, con la finalidad de medir los escurrimientos de la parte alta y forestal de la cuenca. La obra es del tipo precalibrada y de forma triangular. El ángulo de descarga es de 120° y tiene una altura máxima del tirante de 1 m, mismo que permite medir descargas máximas de hasta 2.3 m³·s⁻¹. La característica del vertedor triangular es que permite medir con alta precisión descargas pequeñas y grandes. Se utilizó la siguiente ecuación para estimar el volumen de descarga (Hertzler, 1938):

$$Q = 4.43H^{2.449} \quad (2.1)$$

Donde:

Q = descarga medida en pies cúbicos por segundo; y

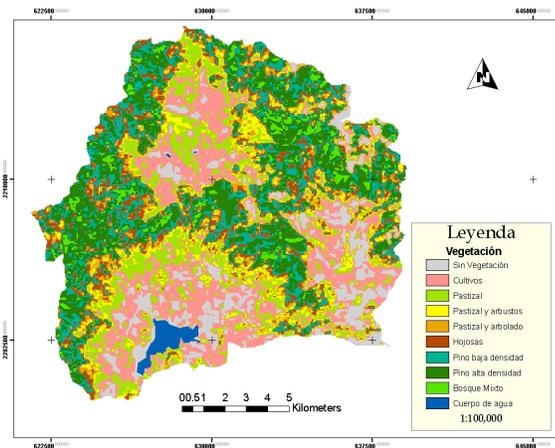
H = altura del tirante del agua en pies.

La altura del tirante de agua se midió de manera automática con un sensor de presión de fluidos (pressure transducer). El sensor se calibró en laboratorio hasta obtener valores de altura del agua comparables a los observados con una alta correlación ($r=0.98$). Se utilizó la computadora Micrologger 21X, Campbell Scientific Inc., para registrar y almacenar los niveles de agua a intervalos de 15 minutos. Esta computadora también registra información de precipitación y temperatura. La información se almacenó en módulos de memoria y se retiró del equipo en intervalos de 15 días a un mes. La información de escurrimientos corresponde a los años 1994 y 1995 y se utilizó para efectos de calibración.

Uso del suelo

Se utilizó una imagen de satélite Landsat 7 ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) del año 2002 para generar información actualizada de los usos del suelo de la cuenca Tapalpa. Este trabajo incluyó etapas de campo y de gabinete. En una primera etapa se recorrió la cuenca para identificar los usos del suelo y establecer geográficamente puntos de control. Posteriormente la imagen fue corregida geométricamente en ER-MAPPER 6.1 utilizando el modelo de elevación de INEGI (INEGI, 2000). Posteriormente se realizó una clasificación no supervisada, utilizando la técnica denominada ISODATA (Iterative Self-Organized Analysis Technique) (Jensen, 1996).

La información resultante se agrupó en 10 categorías (Figura 2.4) (i) Bosque Mixto (Pino y latifoliadas –hojosas-); (ii) Pino baja densidad; (iii) Pino alta densidad; (iv) Latifoliadas; (v) Pastizal con arbolado; (vi) Pastizal con arbustos; (vii) Pastizal; (viii) Áreas de cultivo; (ix) Área urbana o sin vegetación y (x) Cuerpos de agua (Flores *et al.*, 2005).

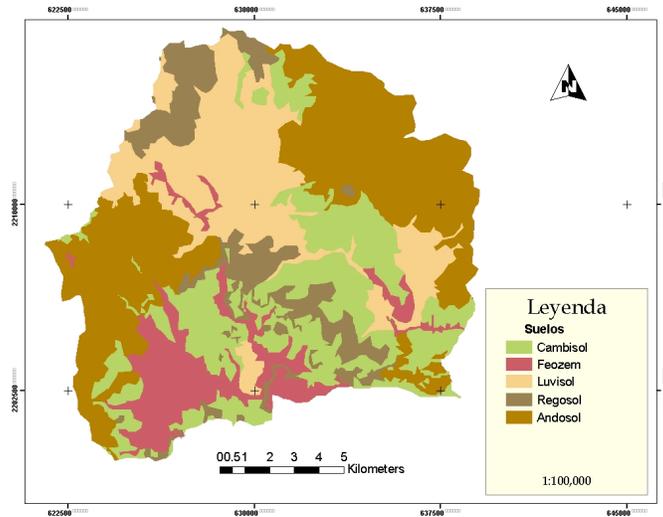


Fuente: Flores et al. (2005).

Figura 2.4. Uso del suelo en la cuenca Tapalpa.

De las 21,000 ha que tiene la cuenca, el principal uso del suelo es forestal ya que un 44% está cubierto de bosque; en su mayor parte con bosque de pino puro (*Pinus michoacana*, *P. oocarpa*, *P. lumholtzii*, *P. leiophylla* y *P. douglasiana*), con algunas mezclas de encino (*Quercus crassipes*, *Q. obtusata*, *Q. candicans*, *Q. castanea* y *Q. scytophylla*) u otras latifoliadas (*Arbutus xalepensis*, *Alnus* sp, *Persea* sp y *Crataegus* sp) en un pequeño porcentaje (5%). Los otros usos del suelo son el pastizal y el agrícola-urbano con un 27% y 28% respectivamente, y los cuerpos de agua ocupan un poco más del 1% de la superficie de la cuenca.

Suelos de la cuenca Tapalpa. De acuerdo con la clasificación de FAO (1988), los suelos se han ordenado en cinco unidades (Gómez-Tagle y Chavez, 1987; CETENAL, 1976): Andosol húmico, cambisol crómico, luvisol crómico, feozem háplico y regosol eutrítico (Figura 2.5).



Fuente: Elaboración propia con datos de CETENAL 1976 y Gomez-Tagle y Chavez-Huerta (1987).

Figura 2.5. Unidades de suelo de la cuenca Tapalpa.

Bases teóricas del modelo SWAT

Balance hidrológico. El modelo SWAT permite simular diferentes procesos físicos de una cuenca, los cuales pueden ser divididos por subcuencas. El principal componente que simula el modelo es el balance hidrológico, a través del cual posteriormente se puede predecir el movimiento de nutrientes, sedimentos y pesticidas.

El balance hidrológico se conoce mediante la ecuación del balance de agua, definida como:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{dia} - Q_{sup} - E_a - w_{subt} - Q_{subs}) \quad (2.2)$$

Donde: SW_t = contenido final de agua (mm); SW_0 = contenido inicial de agua en el día i (mm); t = tiempo (días); R_{dia} = precipitación en el día i ; Q_{sup} = escurrimiento superficial en el día i ; E_a = evapotranspiración en el día i ; w_{subt} = percolación en el día i ; Q_{subs} = escurrimiento subsuperficial que regresa al cauce en el día i .

Clima. Las variables del clima dentro del modelo son importantes porque proveen las entradas de humedad y energía necesarias para controlar el balance hidrológico. Las variables más importantes son la precipitación, la temperatura y la radiación solar.

Hidrología. El escurrimiento superficial se obtiene cuando la cantidad de agua que llega al suelo sobrepasa las tasas de infiltración. En suelos secos la infiltración es alta, pero en suelos húmedos la infiltración empieza a decrecer muy rápido con el tiempo. Cuando el suelo está completamente saturado es cuando el escurrimiento superficial se presenta. El escurrimiento superficial se calcula por dos métodos: la curva numérica (SCS, 1972) y el método de infiltración (Green y Ampt, 1911). El primer método utiliza la ecuación de la curva numérica y tablas que proporcionan un valor de escurrimiento para diferentes tipos de vegetación y de suelo. La humedad del suelo es importante en el empleo de este método. El segundo método se basa en una ecuación de las tasas de infiltración que dependen de la conductividad hidráulica. Cuando la intensidad de la lluvia es menor que la tasa de infiltración toda el agua se infiltra. La porosidad de los suelos es importante en el empleo de este método.

La evapotranspiración (ET) es un término que incluye varios procesos en los cuales el agua de lluvia se convierte en vapor. Este término incluye la evaporación del follaje de las plantas, la transpiración, la sublimación y la evaporación del suelo. La ET es el primer mecanismo por el cual el agua se regresa a la atmósfera. Estimaciones bastante gruesas indican que aproximadamente el 62% de la precipitación que llega a la tierra es evapotranspirada.

Existen tres métodos que utiliza el modelo para conocer la ET potencial: (1) el método Penman-Monteith que requiere datos de radiación solar, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento; (2) el método Priestley-Taylor que requiere de datos de radiación solar, temperatura y humedad relativa; y (3) el método Hargreaves, el cual requiere sólo de temperatura.

La percolación se calcula para cada capa de suelo; el agua se mueve cuando la cantidad de agua sobrepasa la capacidad de campo de cada capa. Se utilizan varias ecuaciones que mueven el agua de acuerdo a la textura del suelo y a la conductividad hidráulica.

El flujo subsuperficial es aquel flujo que regresa a la superficie como flujo superficial pero primero se introduce en el suelo. El modelo también utiliza varias ecuaciones para obtener este tipo de escurrimiento.

Erosión. El sedimento que predice el modelo se basa en la ecuación universal de suelo modificada (Williams, 1995), la cual se ajustó para utilizarla en cuencas; se basa en el escurrimiento superficial y el escurrimiento pico, además de las variables de cobertura, suelo y pendiente. La ecuación utilizada fue la siguiente:

$$sed = 11.8 (Q_{sup} * Q_{pico} * area_{hrw})^{0.56} * K_{usle} * C_{usle} * P_{usle} * LS_{usle} \quad (2.3)$$

Donde:

sed = es la producción de sedimento en un día (toneladas); Q_{sup} = escurrimiento superficial (mm); Q_{pico} = escurrimiento pico ($m^3 s^{-1}$); $area_{hrw}$ = área de las unidades homogéneas de respuesta hidrológica (ha); K_{usle} = factor de erosionabilidad del suelo; C_{usle} = factor de cobertura de la ecuación universal de pérdida de suelo; P_{usle} = factor de prácticas de manejo de la ecuación universal de pérdida de suelo; y LS_{usle} = factor topográfico de la ecuación universal de pérdida de suelo.

El sedimento también se calcula por el flujo lateral y por el escurrimiento subsuperficial. El modelo SWAT, entre otras cosas, también predice los rendimientos de los cultivos y el movimiento de los nutrientes, pesticidas y la calidad del agua; sin embargo, estas variables no fueron consideradas en el modelo para este trabajo.

Procedimiento del uso del modelo SWAT (interfase Arc-View)

Inicialmente se crearon todas las bases de datos que utiliza el modelo, siendo éstas las siguientes:

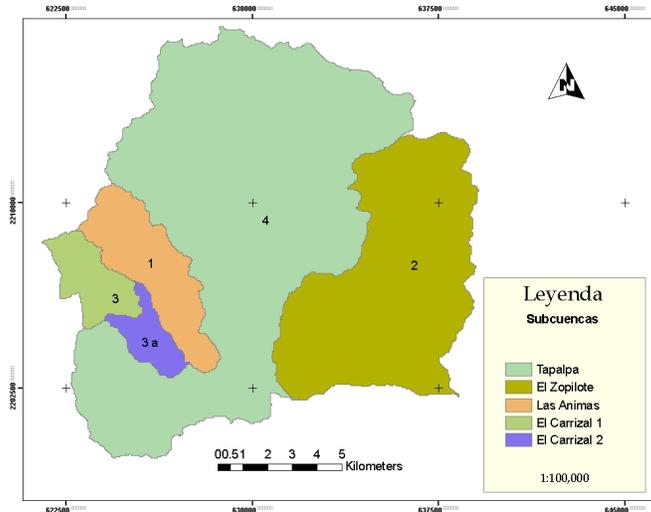
Mapas: Modelo de elevación digital, mapa de suelos, mapa de uso del suelo, máscara con la delimitación de la cuenca, mapa de hidrología con la delimitación de los arroyos;

Bases de datos para la calibración: Características físicas y químicas de los suelos, precipitación diaria, temperatura máxima y mínima diaria; y

Bases de datos para generación de información climática: Estadísticas climáticas de precipitación, temperatura, radiación solar y humedad relativa.

Delimitación de cuenca y subcuencas. El modelo SWAT inicia con una delimitación automática de la cuenca, para lo cual se requieren el modelo de elevación digital, la máscara de la cuenca y un mapa hidrológico digitalizado. Éste último es opcional pero se recomienda su utilización ya que realiza una mejor digitalización de los arroyos y de la cuenca completa (Figura 2.2).

Con esta información inicial se generaron los parámetros generales para la totalidad de la cuenca y por cada subcuenca: Tapalpa, El Zopilote, El Carrizal (parte alta utilizada para calibración), El Carrizal (parte baja) y Las Ánimas. La cuenca El Carrizal se dividió en dos debido a que la instrumentación para su calibración se encuentra en la parte alta y el vertedor en la parte media (Figura 2.6).



Fuente: Elaboración propia con el modelo de elevación digital de INEGI.

Figura 2.6. División de subcuencas generadas por el modelo SWAT

Uso del suelo. Se selecciona el comando del SWAT que involucra los tipos y usos de suelo y se solicita el mapa con el uso del suelo previamente realizado. De ahí, se obtienen en cuadros los usos del suelo contenidos en el mapa. El modelo SWAT los coloca en una pantalla y solicita que se les otorgue un nombre de cobertura que utiliza en su base de datos. Aquí es donde se reclasificaron algunos tipos de vegetación que fueron identificados en campo en el apartado de uso del suelo. Los usos definidos con el modelo fueron las coberturas de: agricultura, pastizales, praderas con gramíneas, praderas con arbustos, encino, pino y bosque mezclado y cuerpos de agua.

Integración del uso del suelo con el tipo de suelo. Este procedimiento se utiliza para realizar una reclasificación de los suelos con sus usos, y con ello se obtienen las hectáreas de cada agrupación.

Unidades de respuesta hidrológica (HRU). Después de la integración de usos del suelo y tipos de suelo se realiza una distribución de las unidades hidrológicas que incluyan uno o más suelos por cada unidad hidrológica. Este paso permite unificar

criterios por uso del suelo y cobertura. El escurrimiento y la evapotranspiración se calculan por separado para cada unidad. Lo anterior permite predecir con más certeza los valores del balance hídrico. Aquí el usuario puede definir si una unidad hidrológica se asigna a una subcuenca, o por el contrario varias unidades se asignan a una subcuenca. Para la cuenca Tapalpa se eligió la segunda opción.

Elección de datos climáticos. El siguiente menú permite elegir si se obtienen datos climáticos de campo o si los genera el modelo SWAT. Si se incluyen datos medidos en campo se deben presentar los archivos de precipitación, temperatura, radiación solar, velocidad de viento y humedad relativa. Para la cuenca Tapalpa se introdujeron los datos diarios de precipitación y temperatura. Con los estadísticos del generador climático mensual se obtuvieron los datos de radiación solar y humedad relativa.

Integración de bases de datos. Este comando permite revisar y editar las bases de datos necesarias para correr el modelo SWAT. El modelo analiza la correcta inclusión de los datos y verifica si existen inconsistencias en ellos; cuando los datos son ilógicos o están fuera de rango, el procedimiento se detiene, indicando donde se encuentra el error. También define espacialmente donde se encuentran las estaciones meteorológicas con entradas de precipitación, temperatura y los generadores climáticos. El modelo examina que todas las bases de datos estén consideradas y que se tenga un orden lógico de las variables ingresadas.

Corrida del modelo. Cuando se ejecuta el modelo, se deben incluir variables como el periodo de la simulación, indicando el inicio y el término del mismo. Para el caso de la cuenca Tapalpa y para realizar la calibración del modelo, se eligió el 1 de enero de 1994 al 31 de diciembre de 1995, periodo que corresponde a la toma de datos. El método utilizado para conocer la evapotranspiración fue el "Priestley-Taylor" ya que los otros métodos utilizados por el modelo SWAT como Penman-Monteith y Hargreaves presentaron menor ajuste a los datos. Se eligió la salida de datos mensual.

Calibración. Al correr el modelo se pueden observar los resultados desde una serie de ventanas en pantalla de reportes. Los datos se comparan con los medidos en el campo, se observa cual es la diferencia y se plantean posibles soluciones. Se cuenta también con un comando de calibración en el cual algunos valores de alta sensibilidad pueden modificarse hacia arriba o abajo del valor inicial asignado. Al hacer las modificaciones necesarias se vuelve a correr el modelo las veces que sea necesario hasta llegar a un punto de calibración en que los resultados del modelo sean similares a los medidos en el campo y se obtengan resultados satisfactorios para el usuario. Se debe tener especial cuidado en que los parámetros modificados continúen cumpliendo con las características físicas.

2.3 Resultados y discusión

Estimación de la oferta hídrica

Características generales de la cuenca y subcuencas

Las subcuencas fueron delimitadas por el modelo SWAT considerando los arroyos más importantes. La información correspondiente a las subcuencas se muestra en el Cuadro 2.1.

Cuadro 2.1. Caracterización de las subcuencas de la cuenca Tapalpa.

Subcuenca	Altitud (m)			Superficie (ha)	Uso del suelo (%)			
	Mínima	Máxima	media		Bosque	Ganadero	Agrícola	Cuerpos de agua
Tapalpa	2,000	2,660	2,224	12194	44	28	26	2
El Zopilote	2,040	2,620	2,288	5760	36	28	36	-
Las Ánimas	2,020	2,567	2,182	1652	59	22	18	1
El Carrizal¹	2,020	2,420	2,251	769	85.1	14.8	0.1	-
El Carrizal² (parte baja)	2,020	2,270	2,070	514	15	36	49	-

¹ Esta subcuenca fue utilizada para calibrar el modelo, ya que en esta área se encuentran los instrumentos de medición.

² Esta subcuenca fue utilizada sólo para fines comparativos ya que la parte alta fue separada por la obra aforadora.

Calibración del modelo

El resultado de la primera salida del modelo varió considerablemente respecto a la información medida en la cuenca *El Carrizal*; la producción de agua se sobreestimó en los dos años en que se evaluó el modelo. Se utilizaron solamente dos años porque son los años de duración del proyecto y en los cuales se tienen datos. Los picos máximos mensuales fueron sobreestimados en 40% para el primer año y en 500% para el segundo; obteniéndose un valor bajo de R^2 en el que el modelo sólo explica un 42% de la variación (Figura 2.7). Las sobreestimaciones que presenta el modelo, probablemente se deban a que los valores de los coeficientes de escurrimiento de los diferentes tipos de vegetación (curva numérica) no estaban del todo adecuadas a las condiciones de campo de la cuenca, así como al modelo de evapotranspiración utilizado (Penman-Monteith).

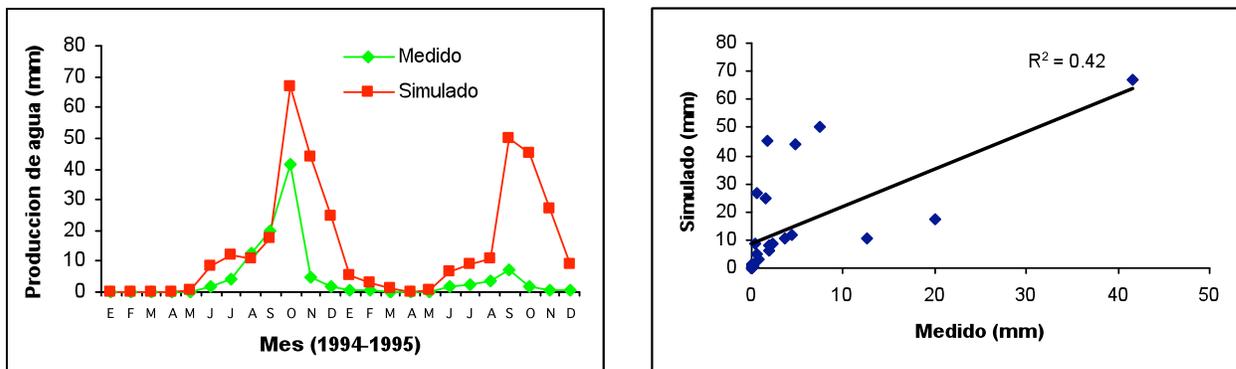


Figura 2.7. Salida y ajuste del modelo SWAT con las variables iniciales de la cuenca El Carrizal para los años 1994 y 1995.

Para realizar una calibración satisfactoria se reajustaron varios parámetros del modelo, en especial las variables que tienen efecto en la evapotranspiración, la curva numérica y la capacidad de agua disponible en el suelo. Después de varios cambios y corridas del modelo, se llegó a una salida de datos que se ajustó mejor a la información de campo ($R^2 = 85\%$). El modelo se ajusta razonablemente a los datos en el primer año, sobre todo porque predice bien los picos máximos en los meses de mayor producción de agua. En el segundo año se observa una ligera sobre

estimación pero la tendencia general de los meses de producción de agua se correlaciona satisfactoriamente (Figura 2.8).

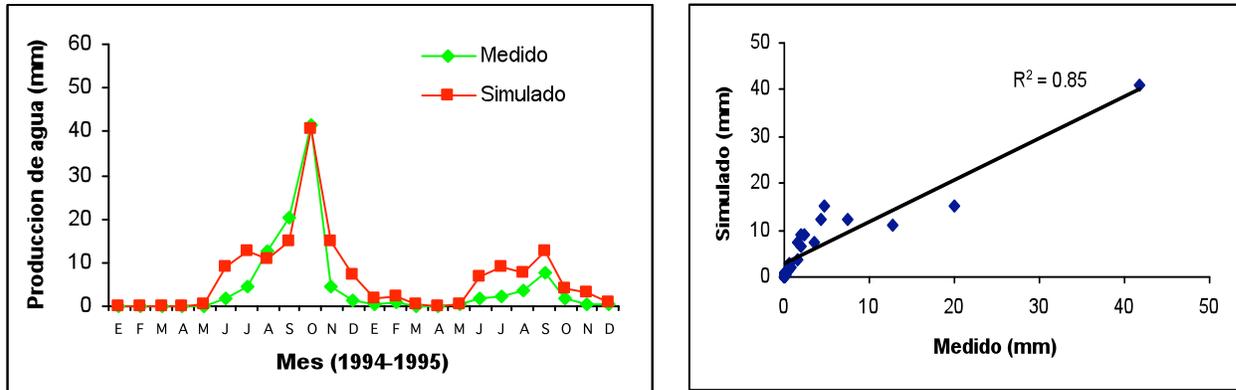


Figura 2.8. Salida del modelo SWAT con el modelo calibrado para la cuenca El Carrizal con datos de los años 1994 y 1995.

Fernández (1999) encontró en la cuenca agrícola El Tejocote en el estado de México una buena eficiencia del modelo SWAT para predecir la producción de agua mensualmente con coeficientes de determinación (R^2) de 0.80, 0.88 y 0.61 en los tres años de medición. Por su parte, Benavides-Solorio (1998) obtuvo un valor de R^2 de 0.91 en la cuenca El Carrizal en Jalisco. En relación a la predicción de la producción de sedimentos se encontró un valor de R^2 cercano a 0.65 en promedio en la cuenca El Tejocote y 0.78 en la cuenca el Carrizal. Adicionalmente, Torres-Benites y colaboradores (2004) encontraron valores de R^2 de 0.94 y 0.84 para la producción anual de agua en dos años consecutivos en la cuenca El Tejocote.

Producción de agua

El Cuadro 2.2 muestra los resultados por subcuenca derivados del modelo calibrado. La producción de agua que genera el modelo se obtiene como una sumatoria de los escurrimientos superficiales, escurrimientos subsuperficiales y escurrimientos laterales, a los cuales se le restan las pérdidas por transmisión.

Cuadro 2.2. Componentes del balance hídrico por subcuenca de la cuenca Tapalpa.

Subcuenca	Precipitación (mm)		EV ¹ (%)		Producción de agua (%)	ES ² (%)	Infiltración ³ (%)
	1994	1995	1994	1995			
Tapalpa	1,017	812	52	78	25	12	12
El Zopilote	1,017	812	54	79	22	14	8
Las Ánimas	1,017	812	60	92	9	2	3
El Carrizal (Cal) ⁴	1,017	812	61	95	9	2	2
El Carrizal (II) parte baja ⁵	1,017	812	52	73	35	30	6

¹ Evapotranspiración;

² Se refiere al escurrimiento superficial y su aporte en la producción de agua;

³ El agua que se infiltra del total del agua de lluvia;

⁴ Ésta subcuenca fue utilizada para calibrar el modelo, ya que en ésta área se encuentran los instrumentos de medición;

⁵ Esta subcuenca fue utilizada solo para fines comparativos, ya que la parte alta fue separada por la obra aforadora.

Producción de sedimentos

La producción de sedimentos, como muestra el modelo, en las subcuencas se presentó durante la época de lluvias, principalmente en el período de junio a octubre en ambos años (Figura 2.9), comportamiento similar al que presentaron los datos originales para la subcuenca El Carrizal (Benavides-Solorio, 1998). Los sedimentos son producto principalmente de la erosión causada por el impacto de las gotas de lluvia que ocasiona una disgregación de los agregados del suelo y aumentada por el esfuerzo cortante del escurrimiento superficial. Las subcuencas que tuvieron la mayor producción de sedimentos fueron la parte baja de El Carrizal (II), Tapalpa y El Zopilote debido a que son aquellas que tienen mayor proporción de superficie agrícola. En contraste, la producción de sedimentos en las subcuencas Las Ánimas y El Carrizal (utilizada para calibración) fue bastante baja, debido a la presencia de una alta cobertura boscosa. La mayor producción de sedimentos se observó en el mes de octubre de 1994, periodo en el cual también se presentó la mayor producción de agua. En 1994, la mayor producción fue en octubre y en 1995 en septiembre. Los valores máximos fluctúan entre 10 y 17 ton·ha⁻¹·mes⁻¹ para las tres subcuencas antes descritas, mientras que para Las Ánimas y El Carrizal los valores máximos

mensuales son muy bajos y del orden de $0.1 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mes}^{-1}$, valores que se encuentran dentro de los límites de una cuenca forestal.

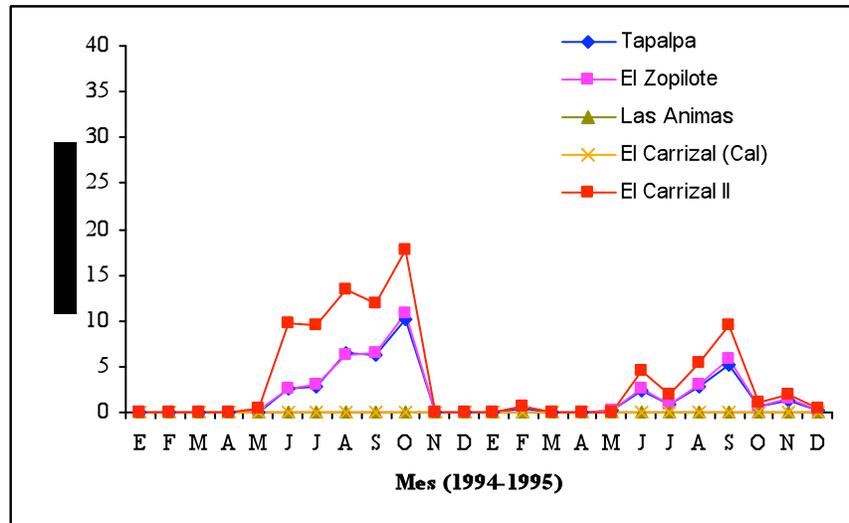


Figura 2.9. Producción de sedimentos por mes y subcuenca en la cuenca Tapalpa.

En la Figura 2.9 se observa que la subcuenca baja de El Carrizal produce más sedimentos que las subcuencas Tapalpa o Zopilote, lo cual no necesariamente ocurre en la realidad por varias razones: (i) la subcuenca se delimitó artificialmente; la parte baja no está separada de la parte alta; esto se hizo con el propósito de separar la parte instrumentada de la no instrumentada; (ii) un volumen considerable de agua proviene de la parte alta forestal (subcuenca Carrizal), por lo que los sedimentos se diluyen a mayor volumen de agua; (iii) debido a la proporción similar que guarda la cuenca completa El Carrizal con la subcuenca Las Ánimas, se estimaría que los valores de sedimento deberían tener valores similares en ambas subcuencas. Por lo tanto, los valores de sedimento de esta subcuenca deben manejarse con las debidas restricciones y como un antecedente de lo que sucedería si se hicieran cambios en el uso del suelo, de uso forestal a uso agrícola o ganadero.

Análisis de la condición hidrológica de la cuenca Tapalpa

Para evaluar el aspecto hídrico y la funcionalidad de una cuenca, ésta debe estudiarse desde una perspectiva integral. Para ello se toman en cuenta las características físicas de la cuenca, como es el suelo, la pendiente y la geología; las características de la vegetación (nativa e inducida), y áreas desnudas; los escurrimientos superficiales y subsuperficiales, la evapotranspiración, el estado de las áreas ribereñas, y las fuentes y niveles de contaminación, entre otras. La cuenca Tapalpa tiene en sus partes altas un buen grado de conservación, debido al gran porcentaje de superficie cubierto por vegetación nativa. Los resultados del estudio permiten observar que las subcuencas con menores índices de producción de sedimentos son aquellas que tienen altos porcentajes de vegetación forestal, como es el caso de las subcuencas El Carrizal y Las Ánimas.

La precipitación de 914 mm en promedio de los dos años estudiados es una cantidad adecuada para la producción de cultivos de clima templado frío con buenos rendimientos. La producción anual de agua de 205 mm (22.5% del total de la precipitación) está balanceada por mitad en escurrimiento superficial y escurrimiento subsuperficial (Cuadro 2.3), lo cual indica que 108 mm del total de la lluvia anual no se infiltran en el suelo (11.9% del total de la precipitación). Este escurrimiento superficial tiene la capacidad de arrastrar sedimentos y contaminación a los arroyos y a la presa El Nogal; durante los periodos de tormentas, la producción de sedimentos se eleva en magnitud por arriba de otros días en la temporada de lluvias. La vegetación de bosque combinada con suelos profundos proporciona una gran capacidad de almacenamiento de agua en las subcuencas, ya que aún durante los periodos de grandes tormentas los sedimentos y la contaminación son reducidos. En contraste, las subcuencas que presentan grandes áreas de agricultura o pastizal responden más rápido a las tormentas, incluyendo valores altos de escurrimientos superficiales y grandes cantidades de sedimentos. Estas condiciones fueron detectadas por el modelo SWAT y siguen el mismo patrón con respecto a datos obtenidos en campo en las subcuencas Tapalpa y El Zopilote (Benavides-Solorio *et al.*, 2005a; 2005b).

En la cuenca Tapalpa se presentan lluvias erosivas con alto potencial para producir sedimentos, por lo cual se debe tener una cubierta protectora. La intensidad máxima que se obtuvo en dos años de toma de datos fue de 37 mm en 30 minutos, la cual es una lluvia con alta capacidad erosiva (Benavides-Solorio, 1998), pero se tienen antecedentes de que pueden presentarse lluvias superiores a ésta. La manera de amortiguar estas lluvias es a través de la cubierta vegetal sobre todo a nivel del suelo lo que protegerá al mismo del impacto de las gotas de lluvia. En la zona no se han presentado niveles altos de deforestación, ya que los bosques están regulados por planes de manejo estrictos, pero en la última década se han presentado cambios de uso del suelo con fines recreativos, por lo que sería conveniente realizar estudios sobre la dinámica del cambio de uso del suelo sobre la zona.

La cubierta que reduce el impacto de las gotas de lluvia también retarda el escurrimiento superficial y permite que el agua se mantenga más tiempo sobre la superficie creando más oportunidades para que ocurra la infiltración. Casi la mitad de la producción de agua en la cuenca Tapalpa se presenta como escurrimiento subsuperficial debido a que la precipitación primero se infiltra en el suelo. La cubierta vegetal permite una infiltración inicial en el suelo y una liberación posterior del agua; el tiempo de retardo puede ser de horas o días dependiendo del contenido de humedad del suelo (Benavides-Solorio *et al.*, 2005b). Si consideramos que la evapotranspiración en la cuenca es de 598 mm o un 65.4% de la precipitación, es claro que existe la posibilidad de incrementar la producción de agua en la cuenca mediante el manejo adecuado de la cobertura vegetal (corta de árboles). Desafortunadamente no se cuenta con una respuesta sobre cuál sería el método ni cuánto se debe cortar para incrementar la producción de agua, debido a que en México no se cuenta con antecedentes sobre el particular. Es necesario realizar trabajos de investigación sobre cortas a diferentes intensidades y observar el efecto en la producción de agua. Aunque debe tenerse extremo cuidado para no aumentar la producción de sedimentos en los caudales. Lo anterior, es materia prima para futuras investigaciones.

Finalmente, el volumen de agua disponible generada por la cuenca, se calculó mediante la lámina de riego de producción de agua, que es de 204.59 mm (Cuadro 2.3) y la superficie total de la cuenca (21,000 ha). De esta forma, el volumen de la oferta total asciende a 42'963,900.0 m³·año⁻¹. Es necesario aclarar que los valores obtenidos para este trabajo fueron para un año promedio de lluvias y el valor obtenido puede aumentar o disminuir anualmente de acuerdo con la cantidad de precipitación anual. Para futuros estudios, si se desea conocer el comportamiento hidrológico para diferentes escalas, es necesario establecer parcelas experimentales de diferentes tamaños.

Cuadro 2.3. Distribución del ciclo hidrológico anual en la cuenca Tapalpa.

Variable	Cantidad (lámina)	Unidades
Precipitación	914.30	mm
Escurrimiento superficial (Q) ¹	107.98	mm
Escurrimiento lateral ¹	18.37	mm
Escurrimiento subsuperficial ¹	78.98	mm
Evaporación	5.24	mm
Recarga de acuíferos	4.04	mm
Recarga total al suelo	87.39	mm
Producción de agua	204.59	mm
Percolación profunda	89.18	mm
Evapotranspiración	598.00	mm
Evapotranspiración potencial	1320.00	mm
Perdidas por transmisión	0.73	mm
Producción de sedimentos	19.60	ton/ha

¹ Representan en conjunto la producción de agua.

Implicaciones de uso del modelo SWAT

En términos generales, y a pesar de su buena eficiencia, los modelos hidrológicos como el SWAT deben usarse sólo como apoyo para la toma de decisiones ya que cuando se modelan escenarios futuros pueden ocurrir modificaciones en campo que no fueron necesariamente consideradas en el o los modelos.

Para tener mayor confiabilidad en la información que proporcionan los modelos, es necesario realizar calibraciones a los mismos con datos de campo, por lo cual se

requiere la instrumentación de cuencas forestales para apoyar adicionalmente las decisiones de pagos por servicios ambientales hidrológicos.

Por lo anterior, es necesario promover el establecimiento de cuencas experimentales en áreas forestales para obtener información confiable durante varios años. En este sentido, las cuencas pareadas han sido importantes como un método de campo eficiente para generar información con validez científica y en el corto plazo sobre la hidrología de una cuenca sometida a diferentes condiciones de manejo. Se trata de un método sencillo en su diseño pero que requiere mucho trabajo, en el cual se necesita medir principalmente el escurrimiento superficial en diferentes escalas de tiempo y espacio. Esta variable se mide durante dos etapas: calibración y post-tratamiento en las dos cuencas que se encuentran en condiciones ambientales similares, lo cual permite distinguir el efecto del tratamiento con respecto al efecto combinado de otros factores a lo largo del periodo de estudio, ya que una de las cuencas funciona como control del estudio. De esta manera, a través de las mediciones en ambas cuencas es posible identificar el cambio relativo en la producción de agua con respecto a los tratamientos aplicados a la masa forestal y/o al suelo de la cuenca.

Una de las primeras etapas en la implementación de un mercado de SAH es realizar un diagnóstico de las características socioeconómicas y biofísicas de la cuenca (Pagiola *et al.*, 2003). Dentro de estas últimas, un aspecto importante es la estimación del balance hídrico de la cuenca. En este contexto, esta investigación se puede utilizar para la aplicación de SAH con el uso del modelo SWAT, ya que permite conocer, además de la cantidad de agua superficial, la recarga de agua al subsuelo, la evapotranspiración y la producción de sedimentos, entre otros. Estos aspectos se consideran importantes para la toma de mejores decisiones para el pago de SAH diferenciado. Terrenos forestales donde se capta agua, producto de los escurrimientos subsuperficiales, podrían tener un pago más alto, que aquellos terrenos donde existe mayor escurrimiento superficial, menor infiltración en el suelo y mayor arrastre de sedimentos. Una cuenca con alta capacidad de retención de

agua muestra que la vegetación y los suelos se encuentran en condiciones estables y funcionales. La cobertura del suelo también es un indicador importante del comportamiento hidrológico que se puede esperar en una cuenca. Mientras más cubierto se encuentre el suelo se tendrá mayor protección, mayor infiltración y menor producción de sedimentos.

Una gran ventaja al utilizar el modelo SWAT es que permite integrar diferentes suelos de las subcuencas, usos del suelo y tipos de vegetación, los cuales tienen respuestas diferentes en los escurrimientos. Debido a que las cuencas de México pueden tener diferentes usos del suelo, el modelo se ajusta a las variaciones del terreno y lo refleja en las respuestas.

Una desventaja del modelo SWAT es que depende en gran medida de los valores de la curva numérica para el cálculo del escurrimiento superficial. A su vez, la curva numérica depende de la definición de la cobertura vegetal y el tipo de suelo, por lo tanto los límites deben estar definidos de manera precisa y actualizada en los mapas. Adicionalmente, el modelo SWAT no incluye en sus análisis a los caminos forestales, los cuales pueden ser productores de escurrimiento superficial y erosión en las zonas forestales.

Por otra parte, es importante impulsar el desarrollo, adecuación y calibración de modelos existentes que permitan predecir la producción de agua en una cuenca, subcuenca o microcuenca en función del manejo que se le da a la cobertura vegetal; SWAT es uno de los modelos utilizados para ello; sin embargo, existen otros modelos como el AGWA (Automated Geospatial Watershed Assessment) (Semmens *et al.*, 2004), el modelo HEC-HMS y varios otros que deben ser explorados a detalle para definir su utilidad para las cuencas forestales de país. Para el desarrollo de modelos propios es necesario contar con suficientes datos que provengan de cuencas y parcelas experimentales, los cuales permitirían tener mayor seguridad para su calibración así como mayor confianza en su uso para las condiciones de los bosques de México.

2.4 Conclusiones

El modelo SWAT permitió ajustar de manera satisfactoria los datos de la subcuenca El Carrizal, lo cual ayudó a conocer información no medida como la recarga de mantos freáticos y evapotranspiración. Las salidas del modelo SWAT en la producción de agua fueron similares a los datos obtenidos en campo, por lo cual puede utilizarse de manera confiable para conocer el ciclo hidrológico.

La extrapolación de la calibración del modelo en la subcuenca El Carrizal hacia la cuenca Tapalpa proporcionó información adecuada en las salidas de agua y sedimento con respecto a los usos del suelo de cada subcuenca y ayudó a comparar la información para cada una de las cuencas, así como a proporcionar valores totales de la cuenca Tapalpa.

Con base en lo anterior, las subcuencas que produjeron mayor cantidad de sedimentos fueron aquellas con mayor escurrimiento superficial y que también presentaban vegetación agrícola y de pastizales: Tapalpa y El Zopilote, además de la parte baja de El Carrizal. Estas mismas subcuencas presentaron deterioro en la calidad de agua en base a las observaciones de Benavides-Solorio (2007) realizadas en el campo. Finalmente, debido al potencial turístico que impera en la zona, sería conveniente preservar y aumentar la condición arbolada de la cuenca Tapalpa.

2.5 Agradecimientos

A la Comisión Nacional Forestal por el apoyo económico parcial otorgado en la realización de la investigación.

2.6 Literatura citada

- Arnold, J.G., J.R. Williams, A.D. Nicks, y N.B. Sammons. 1990. SWRRB: A basin scale simulation model for soil and water resources management. Texas A&M Univ. Press, College Station, TX.
- Benavides-Solorio, J. de D. 1998. Calibración y validación del modelo hidrológico SWRRB en la cuenca forestal El Carrizal, Tapalpa, Jalisco. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Instituto de Recursos Naturales, Especialidad Forestal, Montecillo, México. 261 p.
- Benavides-Solorio, J. de D., J. G. Flores-Garnica, M. de J. González-Guillén, D. A. Moreno-Gonzalez, J. R. Valdez-Lazalde y J. A. Ruiz-Corral. 2005a. Modelaje hidrológico aplicando el modelo SWAT en la cuenca forestal Tapalpa, Jalisco. In: Memorias del VII Congreso Mexicano de Recursos Forestales, Almanza *et al.* (eds.) 26-28 de octubre de 2005, Chihuahua, Chihuahua. Universidad Autónoma Chihuahua, Delicias, Chihuahua, pp. 280-292.
- Benavides-Solorio, J. de D., J. G. Flores-Garnica, M. Baker Jr., A. Medina y E. Talavera-Zuñiga. 2005b. Producción de agua en la cuenca forestal El Carrizal, Tapalpa, Jalisco, un análisis para los servicios ambientales. In: Contribución al estudio de los servicios ambientales. Benavides-Solorio, J. de D. *et al.* (eds). Libro Técnico No. 1. SAGARPA-INIFAP-CIRPAC. Guadalajara, Jalisco. pp. 93-111.
- Benavides-Solorio, J. de D., J. F. Flores-Garnica y D. A. Moreno-Gonzalez. 2007. Comparación de la calidad de agua en la cuenca Tapalpa en espacio y tiempo. Inédito. 20 p.
- Brooks, K.N., P.F. Folliott, H.M. Gregersen, y DeBano, L.F. 2003. Hydrology and the Management of Watersheds. Iowa State University Press/ Ames. Third Edition. United of States of America. Chapters 17,18.
- CETENAL. 1976. Carta edafológica de Tapalpa E13-B14. Escala 1: 50,000. Primera Edición.
- Chang, M. 2003. Forest hydrology, an introduction to water and forests. CRS Press. Boca Raton, Florida. 373 p.
- DOF. 2003a. Diario Oficial de la Federación, 31 de enero de 2003, Determinación de zonas críticas para la recarga de acuíferos. Comisión Nacional del Agua, México.
- Echavarría, M. 2003. El financiamiento de las cuencas hidrográficas: el fondo del agua (FONAG), de Quito, Ecuador. In: La venta de servicios ambientales

- forestales, Pagiola S. *et. al.* (eds.), SEMARNAT, Instituto Nacional de Ecología, Comisión Nacional Forestal, Mexico, D. F. pp. 159-174.
- EMM. 2000. Enciclopedia de los Municipios de México. Centro Nacional de Desarrollo Municipal, Gobierno del Estado de Jalisco. Consultado en línea. Disponible en: <http://fortalecimientomunicipal.jalisco.gob.mx/Monografias/Tapalpa.htm>.
- Fernandez-Reynoso, D. S., J. L. Oropeza-Mota, M. R. Martinez-Menes, B. Figueroa-Sandoval y O. Palacios-Velez. 1999. Aplicación del modelo hidrológico SWRRB en la cuenca "El Tejocote", Atlacomulco, Estado de México. *Agrociencia* 33: 1-9.
- Fernández R., D. S. 1996. Aplicación del modelo de simulación SWRRB para determinar el balance hidrológico de la cuenca el Tejocote, Atlacomulco, estado de México. Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados, Instituto de Recursos Naturales, Programa de Edafología, Montecillo, México. 243 p.
- Flores-Garnica, J. G., J. de D. Benavides-Solorio y D. A. Moreno-González. 2005. Clasificación espectral de coberturas de suelo como soporte en la evaluación de servicios ambientales. *In: Contribución al estudio de los servicios ambientales*. Benavides-Solorio, J. de D. *et al.* (eds). Libro Técnico No. 1. SAGARPA-INIFAP-CIRPAC. Guadalajara, Jalisco. pp. 55-74.
- Gómez-Tagle, R. y Chavez-Huerta Y. 1987. Aplicación de criterios de agrología forestal al estudio de los suelos de bosque de la zona oeste de Tapalpa, Jalisco. *Ciencia Forestal* 59(11): 65-89.
- Green, W.H. y G. A. Ampt. 1991. Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Sciences* 4:11-24.
- INEGI. 1991. Jalisco. Censo de Población y Vivienda, 1995. Resultados Definitivos. Tabulados Básicos. México. Disponible en: www.inegi.gob.mx.
- INEGI. 1996. Jalisco. Censo de Población y Vivienda, 1995. Resultados Definitivos. Tabulados Básicos. México. Disponible en: www.inegi.gob.mx.
- INEGI. 2000. Cartas digitales de Tapalpa y Atemajac de Brizuela, E13B14 y F13D84. Escala 1:50,000.
- INEGI. 2001a. XII Censo General de Población y Vivienda, 2000. Resultados Definitivos. Tabulados Básicos. Jalisco. México. Disponible en: www.inegi.gob.mx.

- INEGI. 2001b. Estudio hidrológico del Estado de Jalisco. INEGI, Gobierno del Estado de Jalisco. Aguascalientes, Ags. 176 p.
- INEGI. 2002. Carta topografica de Atemajac de Brizuela. F13D84. Escala 1:50,000.
- INEGI. 2005. Carta topográfica de Tapalpa. E13B14. Escala 1:50,000.
- Jensen, J. R. 1996. Introductory digital image processing. A remote sensing perspective. 2nd Ed. Prentice-Hall Series in Geographic Information Science. *Prentice-Hall, Inc.* New Jersey, 310 p.
- Johnson, M.S., F.C. William, K. M. Vishal, S.S.Tammo, S.B. Erin and Jan B. 2003. Application of two hydrologic models with different runoff mechanisms to a hill slope dominated watershed in the northeastern US: a comparison of HSPF and SMR. *Journal of Hydrology* 284:57-76
- Kerr, J. 2003. Los beneficios compartidos del manejo de la cuenca hidrológica del Sukhomajri, India. *In: La venta de servicios ambientales forestales, Pagiola S. et. al.* (eds.), SEMARNAT, Instituto Nacional de Ecología, Comisión Nacional Forestal, Mexico, D. F. pp. 117-136.
- López-Paniagua C., M. de J. González-Guillén, J. R. Valdez-Lazalde, y H. M. de los Santos-Posadas. 2007. Demanda, disponibilidad de pago y costo de oportunidad hídrica en la cuenca Tapalpa, Jalisco. *Madera y Bosques* 13(1):3-23.
- Madrid S. 2005. "Identificación de experiencias relativas al desarrollo de mercados de Servicios Ambientales del Bosque en México (estudio de Casos)". Informe final del inventario de experiencias exitosas. Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y World Bank. 152 p.
- Maldonado-de-Leon, O. A., O. L. Palacios-Velez, J. L. Oropeza-Mota, R. Springall-Galindo y D. S. Fernández-Reynoso. 2001. Empleo del modelo SWRRB para generar alternativas de manejo en la cuenca Itzapa, Guatemala. *Agrociencia* 35: 335-345.
- Neitsch, S. L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, J.R. Williams y K.W. King. 2002. Soil and water assesment tool. Teorical Documentation. Published by Texas Water Resources Institute, College Station, Texas. TWRI Report TR-191.
- Pagiola, S. 2003. Pago por servicios hidrológicos en Centroamérica: enseñanzas de Costa Rica. *In: La venta de servicios ambientales forestales, Pagiola S. et. al.* (eds.), SEMARNAT, Instituto Nacional de Ecología, Comisión Nacional Forestal, Mexico, D. F. pp. 77-116.

- Pagiola, S., N. Landell-Mills y J. Bishop. 2003. Mecanismos basados en el mercado para la conservación y el desarrollo. In: La venta de servicios ambientales forestales, Pagiola S. *et. al.* (eds.), SEMARNAT, Instituto Nacional de Ecología, Comisión Nacional Forestal, México, D. F. pp. 23-42.
- Ruiz C., González A., Anguiano C., Vizcaíno V., Ibarra C., Alcalá G., Espinoza V. y Flores L. 2003. Estadísticas climatológicas básicas para el estado de Jalisco (periodo 1961-2000). SAGARPA, INIFAP, CIRPAC, Campo Experimental Centro de Jalisco, Libro Técnico No. 1. Tlajomulco de Zuñiga, Jal. 281 p.
- Semmens, D.J., Miller S.N., Hernandez M. Burns I. S., Miller W. P., Goodrich D. C. y Kepner, W. G. 2004. Automated Geospatial Watershed Assessment (AGWA) - A GIS-Based Hydrologic Modeling Tool: Documentation and User Manual; U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-1446.
- Singh V.P. 1995. "*Watershed modeling*", Chapter One: Computer Models of Watershed Hydrology, Water Resources Publications. 1-22 pp.
- Soil Conservation Service. 1972. Hydrology, Section 4, *In* National Engineering Handbook. SCS.
- Torres J. M., Alix-García J., De Janvry A. y Sadoulet E. 2005. An assessment of Mexico's payment for environmental services program. CIDE (Centro de Investigación y Docencia Económicas) y University of California at Berkeley.
- Torres-Benites E., Fernández-Reynoso D. S., Oropeza-Mota J. L., y Mejía-Sáenz E. 2004. Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca "El Tejocote", Atlacomulco, Estado de México. *Terra Latinoamericana* 22:437-444.
- Williams, J. R., Nicks A.D., y Arnold J. G. 1985. Simulator for water resources in rural basins. *Journal of Hydraulic Engineering* 111(6): 970-986.
- Williams, J. R. 1995. The epic model, Chapter 25. *In*: Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications. Highlands Ranch, CO. pp. 909-1000.
- Woolhiser, D.A. y D.L. Brakensiek. 1982. Hydrologic system synthesis. In Hydrologic modeling of small watersheds, 3-16. American Society of Agricultural Engineers. Monograph 5.
- World Bank. 2005. Current World Bank Work on Payments for Ecological Services. <http://inweb18.worldbank.org/ESSD/envext.nsf/44ByDocName/PaymentsforEcologicalServicesCurrentProjects>

CAPÍTULO III

DEMANDA, DISPONIBILIDAD DE PAGO Y COSTO DE OPORTUNIDAD HÍDRICA EN LA CUENCA TAPALPA, JALISCO⁴

DEMAND, WILLINGNESS TO PAY AND HYDRIC OPORTUNITY COST IN THE TAPALPA, JALISCO WATERSHED

RESUMEN

Para conocer la factibilidad de la creación de un mercado de servicios ambientales hidrológicos, se requiere contar con información sobre la oferta y demanda hídrica del lugar. Este estudio pretende aportar información sobre el último aspecto, al estimar la demanda hídrica en la cuenca Tapalpa, Jalisco, México, en cuya superficie de 21,000 ha, la mitad es forestal. Adicionalmente se estimó la disponibilidad a pagar (DAP) por el recurso hídrico (RH), además de un análisis del costo de oportunidad del uso del suelo para “producción” de agua. El análisis indicó que el RH utilizado asciende a 23,171,885 m³/año. El 93% de éste se utiliza en el sector agrícola, principalmente en la producción de hortalizas y cultivos básicos.

La DAP calculada por el RH es mayor en el sector servicios (76.7% de los casos dijeron estar dispuestos), en comparación con los otros sectores encuestados. Sin embargo, la mayor participación monetaria en la DAP total estuvo dada por el sector doméstico (46.5% del total). Adicionalmente se determinó que la escolaridad tiene una relación directa con la DAP, mientras que la edad presentó una relación inversa. El valor estimado de la DAP total fue menor que el costo de oportunidad para conservar la superficie boscosa de la cuenca y sólo cubre el 10% de dicho costo de oportunidad. Al agregar el costo asociado a la recuperación de la superficie forestal actualmente en otro uso, la DAP se reduce a sólo 6% del costo de oportunidad total.

PALABRAS CLAVE: Disponibilidad a pagar, mercado de servicios ambientales, costo de oportunidad, uso del suelo, valor del uso del agua.

Artículo publicado como: López Paniagua, C., M.J. González Guillén, J.R. Valdez Lazalde y H.M. de los Santos Posadas. 2007. Demanda, disponibilidad de pago y costo de oportunidad hídrica en la Cuenca Tapalpa, Jalisco. Madera y Bosques 13(1):3-23.

SUMMARY

The creation of a hydrological environmental services market implies to have information about the hydric supply and demand in a watershed. With the purpose to contribute on the last topic, the hydric demand was studied at the Tapalpa watershed in Jalisco, México. Additionally, the water use value was estimated throughout the willingness to pay (WTP) technique and also an opportunity cost analysis on the forest land use for water “production” is presented. The watershed has an area of 21,000 ha and half of it is forested. The demand analysis indicated that the hydric resource (HR) used is about 23,171,885.1 m³/year. 93% of this total is used in the agricultural sector, mainly for vegetables production (50%) and basic crops (23%).

When compared to other sectors, the calculated willingness to pay (WTP) for the HR is higher in the services sector (76.7% of the interviewers said to be well-disposed). However, the biggest contribution to the total WTP was given by the domestic sector (46.5%) with \$3,064,301 mexican pesos/year. Additionally, a direct relationship between study level and WTP for HR was determined. Age showed an inverse relationship with WTP. The estimated total WTP value resulted to be smaller than the estimated opportunity cost to conserve forest in the watershed, giving an annual deficit of \$27,201,313 mexican pesos. The total WTP represents only 10% of the opportunity cost. In addition, if the associate costs for recovering forest areas currently in other use (areas in conflict) were added, the annual deficit would increase to \$45,130,988 Mexican pesos and the WTP would be reduced to 6% of the total opportunity cost.

KEY WORDS: *Willingness to pay, environmental services market, opportunity cost, land use, water use value.*

3.1 Introducción

El problema de escasez y calidad del agua en México varía regionalmente debido a las características peculiares que presenta la biogeografía del país y a la distribución espacial de los asentamientos humanos. En algunas regiones o localidades del país existen serios problemas de deterioro del recurso hídrico, así lo sugieren las evidencias alarmantes de contaminación de agua y el agotamiento de acuíferos, al grado de que en algunas zonas ya se empiezan a limitar los permisos para su aprovechamiento (FCEAAC *et al.*, 2006; Manson, 2004; Barrantes y Vega, 2002).

La cuenca Tapalpa, localizada en el estado de Jalisco, ha sufrido un deterioro gradual del recurso hídrico en las últimas décadas. Esta situación se explica por el aumento poblacional y la creciente actividad turística en la región, conjuntamente con cambios de uso del suelo de natural a otros usos (residencial, agrícola, pecuario). El uso irracional y desmedido del recurso hídrico, aunado a una fuerte subvaluación económica reflejada en las bajas tarifas monetarias pagadas por el consumo de agua, han contribuido a acentuar el problema. Por ello, es importante la aplicación de políticas e instrumentos que permitan la conservación del mismo.

Existen estrategias y acciones tendientes a mejorar la utilización del agua. Una de ellas incluye la implementación de un sistema de precios o pago del servicio ambiental hidrológico (SAH) como un mecanismo que promueve la racionalidad en el uso del agua de las cuencas. Además de lograr un mejor aprovechamiento, este mecanismo estimularía la reconversión tecnológica de los procesos productivos con menor rentabilidad económica o bien su canalización a usos alternativos. El pago también contribuiría a lograr una nueva cultura entre los usuarios y los proveedores del agua en relación a la conservación de los recursos hidrológicos.

Ante la problemática regional y nacional de la escasez del agua, a partir del 2003, el Gobierno Federal implementó el Programa de Pago de Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH) con el propósito de desarrollar los mercados de SAH,

incrementar las posibilidades de conservación de los recursos forestales y fomentar el uso racional del agua. El PSAH contempla la retribución monetaria⁵ a los dueños o poseedores de los ecosistemas que proporcionan el servicio ambiental hídrico, asumiendo que éstos incurren en un costo financiero y de oportunidad al conservar ecosistemas naturales que realizan la captación de agua y mejoran la calidad de los SAH.

La lógica de la alternativa anterior es simple, sin embargo, lo complicado es la creación de un sistema en el cual interactúen armoniosamente las fuerzas de mercado (i.e., oferta y demanda) para mantener la prestación de los SAH en calidad y cantidad adecuadas. Para ello es necesario cuantificar físicamente el presupuesto hídrico, -la oferta y demanda- del área sujeta a evaluación y determinar las relaciones existentes entre el recurso y los usuarios y lograr así una mejor administración del uso del agua.

El presente estudio se enfoca únicamente a estimar la demanda hídrica⁶ en la cuenca Tapalpa, localizada en el estado de Jalisco, México mediante el método de valoración contingente (MVC), y generar información útil en la creación de un mercado de SAH, así como conocer si la disponibilidad a pagar (DAP) de los usuarios o los montos pagados por el PSAH cubren el costo de oportunidad de uso de los suelos forestales en el área de estudio.

El MVC ha sido utilizado para estimar el valor de bienes o servicios que no cuentan con un precio *per se* en el mercado. Consiste en preguntar directamente a los consumidores, actuales o potenciales, su DAP por obtener el SAH o un cambio en la cantidad o calidad del mismo (Larqué, 2003; Dixon y Pagiola, 1998). Con preguntas apropiadamente enunciadas, el MVC puede proveer una estimación que incluya la totalidad de los costos y beneficios percibidos ante cambios ambientales, en

⁵ El monto pagado es de \$400 ha⁻¹ año⁻¹ para bosques mesófilos de montaña y de \$300 ha⁻¹ año⁻¹ para otros bosques y selvas (Diario Oficial de la Federación, 2003).

⁶ Un estudio complementario a éste --Oferta hídrica de la cuenca forestal Tapalpa, Jalisco, orientada hacia los servicios ambientales--, está en proceso de publicación y se encuentra en este trabajo.

contraste con otras técnicas (por ej., Costo de Viaje, Análisis Hedónico, Transferencia de Beneficios, otros), las cuales a menudo sólo proveen una estimación parcial de los costos y beneficios ambientales. Sin embargo, debido a la necesidad de describir en detalle los servicios que están siendo valorados, las entrevistas que se realizan como parte del MVC a menudo consumen mucho tiempo y pueden no estar orientadas para que el participante conteste objetivamente, sino de manera sesgada hacia lo que se quiere probar, por lo que es muy importante que los cuestionarios sean ampliamente validados para evitar cualquier fuente de sesgo y errores (Dixon y Pagiola, 1998).

A diferencia de otros estudios realizados con el MVC (Hidano *et al.*, 2005; Bandara y Tisdell, 2004; León y Vázquez-Polo, 2000; Pouta *et al.*, 2000; Melo y Donoso, 1995), este trabajo emplea la técnica para valorar el servicio hídrico en la cuenca Tapalpa, Jalisco, México.

3.2 Objetivo

Caracterizar la demanda de agua por tipo de sector (doméstico, agropecuario e industrial) y comparar si la disponibilidad de pago de los usuarios cubre el costo de oportunidad de uso de los terrenos en el área de la cuenca hidrográfica Tapalpa, estado de Jalisco, México.

3.3 Metodología

Área de estudio

La cuenca Tapalpa se localiza aproximadamente a 130 km de la ciudad de Guadalajara por la carretera Guadalajara-Tapalpa (Figura 3.1), entre los paralelos 20° 18' y 19° 42' LN y los meridianos 103° 50' y 103° 36' LO (Flores *et al.*, 2005);

comprende de manera parcial o total los municipios de Atemajac, Chiquilistlán y Tapalpa, siendo en este último donde se concentra la mayor proporción.

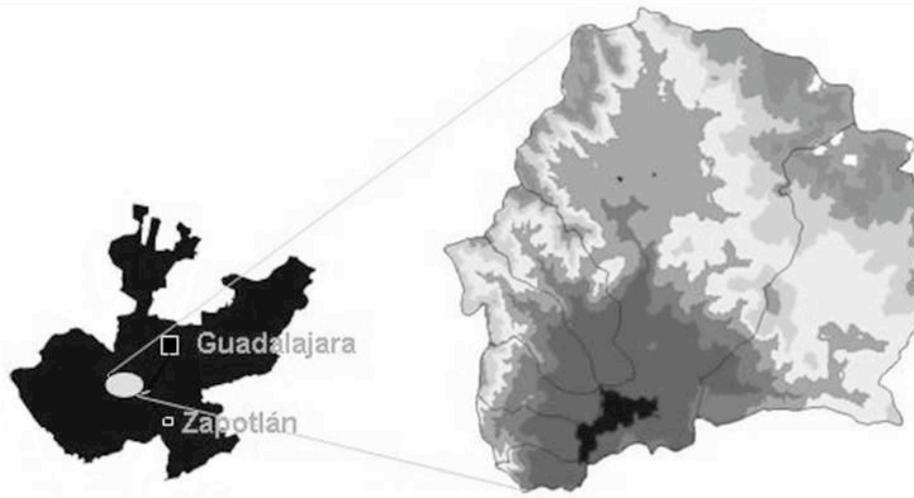


Figura 3.1. Cuenca Tapalpa, Jalisco.

Tiene una superficie aproximada de 21,000 ha, de las cuales el 44% son bosque, 28% de uso agrícola y urbano y el 27% de uso pecuario. Se localiza en la Sierra de Tapalpa, dentro del Eje Neovolcánico. Las principales poblaciones ubicadas dentro de la cuenca son Tapalpa, Attaco y La Frontera.

Planificación del estudio y obtención de la información

Una vez delimitada el área de estudio, se realizaron recorridos de campo con el fin de tener un panorama general de la problemática del servicio hídrico, así como de las características socioeconómicas de los diversos sectores en la región. En las visitas se contactó al personal y expertos de las instituciones ligadas al manejo del recurso hídrico, así como al personal de apoyo en el levantamiento de las encuestas. Se obtuvo información a través de una revisión de literatura, y de bases de datos y estadísticas de información poblacional del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) y del Sistema Nacional de Información Municipal (SNIM). Posteriormente, fue necesario el apoyo de las autoridades municipales de Tapalpa, la unidad de riego “El Nogal”, la Asociación Ganadera Local y los

Prestadores de Servicios Técnicos Forestales para actualizar las bases de datos y realizar el levantamiento de encuestas.

Determinación del tamaño de muestra

El tamaño definitivo de la muestra se estimó con base en la variabilidad de las respuestas de la población al indagar la disponibilidad a participar en el PSAH (i.e., variable dicotómica) (González, 2005) y a través de la Ecuación 3.1, excepto para el sector turista donde se empleó la Ecuación 3.2 debido a que el tamaño de la población total (N) es desconocido. El cuadro 3.1 muestra el grado de precisión, confiabilidad y el tamaño de muestra definitivo en los ocho sectores sociales encuestados.

$$n = \frac{N \times t^2_{(\alpha,n)} \times P \times (1 - P)}{(N - 1) \times B^2 + t^2_{(\alpha,n)} \times P \times (1 - P)} \quad (3.1)$$

Donde:

- n = Tamaño de la muestra;
- $t^2_{(\alpha,n)}$ = Valor de la distribución t correspondiente al nivel de confiabilidad elegido (95%);
- P = Proporción de la población con la característica deseada;
- $1-P$ = Proporción de la población sin la característica deseada;
- B = Error máximo deseado (también conocida como precisión D); y
- N = Tamaño de la población.

La ecuación de tamaño de muestra para el sector turismo es

$$n = Z^2 P \times (1 - P) / B^2 \quad \dots(3.2)$$

Donde

- Z^2 = Valor de la distribución Z correspondiente al nivel de confiabilidad elegido (95%); todo lo demás como se ha definido anteriormente.

Cuadro 3.1. Confiabilidad, precisión y tamaño de muestra obtenido por grupo social encuestado en Tapalpa, Jalisco.

Grupo social (Sector)	Población (N)	Confiabilidad (%)	Precisión (%)	Unidades muestrales (n)
Doméstico	1136 ²	95	11	50
Agrario	333 ³	95	15	30
Pecuario	724 ⁴	95	16	30
Servicios	172 ⁵	95	11	30
Industrial	3 ⁶	-	-	3 ¹⁰
Forestal	135 ⁷	95	13.5	30
Población ¹	5,566 ⁸	95	16.5	34
Turista ¹	Indeterminado ⁹	95	11.5	36
Total				243

¹ Se estableció la necesidad de conocer el punto de vista que los pobladores tienen de los recursos ambientales en la zona, ya que éste se considera un factor determinante en el éxito de los mercados de SAH. De igual forma, dado que la población de Tapalpa tiene un gran potencial turístico y la derrama económica por esta actividad es cuantiosa, se consideró importante la inclusión del punto de vista del sector turístico (Ver Anexo).

² Total de hogares;

³ Padrón de usuarios de la presa el "Nogal";

⁴ Padrón de afiliados a la Asociación Ganadera Local;

⁵ Total de negocios (hoteles, restaurantes, bares, tiendas, farmacias);

⁶ Total de industrias;

⁷ Total de dueños o poseedores de predios forestales;

⁸ Total de habitantes en la población;

⁹ Número de turistas que arriban a Tapalpa al año;

¹⁰ Se realizó un censo.

Las unidades muestrales se eligieron aleatoriamente y sin reemplazo. Para los sectores doméstico, industrial y de servicios, las encuestas (Ver Anexo) se restringieron a la cabecera municipal, ya que en el caso de los dos últimos sectores, la totalidad de sus componentes se encuentra en la localidad. En el sector doméstico, se partió del supuesto que los problemas de disponibilidad de agua son mayores en Tapalpa en comparación con el resto de la cuenca –debido a una mayor densidad poblacional-, por lo que ante una mejora del SAH, los habitantes del municipio serían los principales beneficiarios. En la cabecera municipal (Tapalpa) es donde se concentra el 36% de la población total del municipio (5,566 habitantes); mientras que el 76% de las localidades (79 de 104) cuenta con menos de 100 habitantes; es decir, 20 hogares en promedio (SNIM- INEGI, 2000). Evidentemente las inferencias del estudio son válidas para los datos obtenidos en la cabecera pero deben de interpretarse cuidadosamente en el caso de las localidades de baja

densidad poblacional que están distribuidas en la cuenca. En este caso se espera que a mayor disponibilidad de agua haya mayor consumo. En todo caso cuando se estima la demanda de la cuenca ésta tenderá a sobrestimar la demanda real.

Aplicación de las encuestas

Después del diseño, calibración y validación de las encuestas por tipo de sector (Ver Anexo), éstas se aplicaron en forma personal y directa, lo que permitió disipar dudas y aclarar respuestas. Sin embargo, esta forma de aplicación puede representar algunas desventajas tales como el elevado costo, laboriosidad, duración, y el riesgo de influir en las respuestas por el entrevistador. Este estudio trató de minimizar tales aspectos.

Estimación de la demanda hídrica

Con los resultados obtenidos de las encuestas a través del MVC, se generaron estimaciones puntuales y por intervalos para cuantificar el gasto de agua total por sector (Cuadro 3.2). Una vez obtenidos los valores promedio para el consumo de agua, éstos se hicieron extensivos a toda la población, obteniendo valores promedio de consumo de agua diario por sector.

Cuadro 3.2. Estimaciones puntuales y de intervalo en la cuenca de Tapalpa, Jalisco.

Sector	Estimación puntual	Estimación por intervalo (Límites de confianza ¹)		Unidades
		L.I. ²	L.S. ³	
Doméstico	282.2	239.9	324.5	lt/día/hogar
Agrario	177,624.2	124,669	230,580	lt/día/agricultor
Pecuario	4,727.5	4,133.4	5,321.6	lt/día/ganadero
Servicios	4,119.4	3,005	5,233	lt/día/negocio
Industrial	7,500 ⁴	-	-	lt/día

¹ Con una confiabilidad del 95%. Es decir, en promedio el 95% de las muestras producirán intervalos que contienen a la media verdadera;

² Límite inferior;

³ Límite superior;

⁴ Como fue realizado un censo, éste valor es el gasto total de agua.

Fuente: *Elaboración propia con datos tomados en campo.*

Disponibilidad a pagar (DAP) por el agua a través de variables socioeconómicas

La DAP por el agua se determinó a través del método de valoración contingente (VC) por sector productivo (industrial, doméstico, agrario, pecuario y servicios) en la región, para ello se utilizó un modelo lineal generalizado vinculado a través de una estructura logística. El modelo predice la probabilidad de la DAP usando variables socioeconómicas de interés como variables independientes. Para el ajuste de los datos se descartaron los datos correspondientes al sector industrial, debido a que éste es muy pequeño en la región, existiendo solamente tres industrias y su consumo de agua representa menos de 0.05% de la demanda total. El módulo lineal de la regresión logística es (ecuación 3.3):

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k \quad (3.3)$$

Donde:

- η = Módulo lineal del modelo de regresión logística;
- β_k = k ésimo parámetro a estimar; y
- X_k = k ésima variable independiente incluida en el modelo.

La probabilidad del evento binario (DAP =1) se puede obtener a través de (ecuación 3.4):

$$P(DAP = 1) = \frac{\exp(\eta)}{1 + \exp(\eta)} \quad (3.4)$$

DAP vs Edad

El módulo lineal de la ecuación usado para las clases de edad como variable independiente fue de la forma (ecuación 3.5):

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 C \quad (3.5)$$

Donde:

- β_0 y β_1 = Parámetros a estimar; y
- C= Clases de edad en décadas (Cuadro 3.3).

Cuadro 3.3. Clases de edad en décadas.

Clase de edad (Décadas)	Edad (Años)
1	12-17 ¹
2	18-25
3	26-35
4	36-50
5	51-65
6	Más de 65

Las encuestas se aplicaron a los encargados de los hogares --los que solventan económicamente a la familia. Sin embargo, a pesar de que el menor intervalo de edad es de 12-17, la menor edad declarada fue de 15 años.

DAP vs Edad y Sector

El módulo lineal de la ecuación para años de escolaridad como variable independiente fue de la forma (ecuación 3.6):

$$\eta = \beta_0 + (\beta_A I_A + \beta_P I_P + \beta_D I_D + \beta_S I_S) \times C \quad (3.6)$$

Donde:

β_0 = Intercepto general del modelo;

β_A = Parámetro asociado a la disponibilidad de pago por la edad en el sector agrícola;

I_A = Variable indicadora asociada al sector agrícola;

β_P = Parámetro asociado a la disponibilidad de pago por la edad en el sector pecuario;

I_P = Variable indicadora asociada al sector pecuario;

β_D = Parámetro asociado a la disponibilidad de pago por la edad en el sector doméstico;

I_D = Variable indicadora asociada al sector doméstico;

β_S = Parámetro asociado a la disponibilidad de pago por la edad en el sector servicios;

I_S = Variable indicadora asociada al sector servicios.

DAP vs Edad, Sector y Escolaridad

En este caso se tiene una modificación para integrar la interacción de la escolaridad con los sectores productivos. El módulo lineal usado fue de la forma (ecuación 3.7):

$$\eta = \beta_0 + (\beta_A I_A + \beta_P I_P + \beta_D I_D + \beta_S I_S) \times C + \beta_{SEsc} I_S \times E \quad (3.7)$$

Donde:

β_{SEsc} = Parámetro asociado a la DAP por la escolaridad en el sector de servicios.

E = Años de escolaridad del entrevistado

Así para el caso del sector servicio en especial se tiene que el módulo lineal toma la forma (ecuación 3.8):

$$\eta = \beta_0 + \beta_S \times C + \beta_{SEsc} \times E \quad (3.8)$$

Aquí, la interacción del sector servicios y escolaridad es de forma aditiva, ya que hay evidencias de una mayor sensibilidad en la DAP ante los años de escolaridad. Lo anterior debido a que en este sector tradicionalmente se presentan individuos con un mayor número de años de estudio.

Uso actual del suelo vs uso potencial

Se uso un mapa de uso actual del suelo elaborado a partir de la clasificación de una imagen satelital de la plataforma LANDSAT⁷ 7 ETM+ correspondiente al año 2002 (Flores *et al.*, 2005) y un mapa de uso potencial en la cuenca bajo estudio, obtenido de las cartas de uso potencial de los municipios de Tapalpa y Atemajac, Jalisco (CETENAL, 1977a; 1977b; 1976). Ambos mapas a una escala de 1:50,000. A través de la sobreposición y mediante el programa *ArcMap 8.3*, se generó un mapa que representa las áreas de conflicto del uso actual del suelo. Es decir, se identificaron y cuantificaron las áreas de aptitud forestal que actualmente tienen un uso no forestal.

⁷ Esta imagen corresponde al Path 29 y Row 46 de acuerdo al sistema LANDSAT.

Costo de oportunidad del uso del suelo

Para determinar el costo de oportunidad de uso de los suelos en el área de estudio se consideraron dos escenarios: (a) Reconversión y (b) Estado actual. El primero trata de responder a la pregunta ¿cuál es el costo incurrido en recuperar las áreas en conflicto a su aptitud forestal original? El segundo contempla el costo necesario para que las áreas boscosas actuales no se cambien al “mejor uso alternativo” -- considerando únicamente el aspecto económico. La suma de estos dos valores representa el costo de oportunidad total (COT) del bosque, el cual se considera proveedor del servicio ambiental hídrico. El COT se comparó con la DAP total de los usuarios. Esta última debería ser por lo menos igual al COT a aceptar por parte de los productores forestales; de otra forma nada asegura que en el mediano y largo plazos el uso del suelo pase de forestal a otros usos más rentables, como la agricultura o la ganadería.

3.4 Resultados

Características generales de la cuenca Tapalpa

La cuenca tiene una altitud mínima de 2,000 m y una máxima de 2,660 m, con un promedio de 2,235 m. Estas altitudes son características de áreas que concentran vegetación de pino-encino en el estado de Jalisco.

De las 21,000 ha que conforman la cuenca, 9,240 ha (44% del total) contienen bosques principalmente de pino, mezclándose con encino u otras hojosas en un pequeño porcentaje. Le siguen el pastizal con 5,670 ha (27% del total), agricultura con 3,780 ha (18% del total), urbano con 2,100 ha (10% del total) y los cuerpos de agua con 210 ha (1% del total).

La demanda total de agua, cuantificada a partir de las estimaciones puntuales de uso del recurso por sector, asciende a 23.172 millones de m³/año; su distribución por sector se muestra en el Cuadro 3.4. La cantidad demandada se encuentra

representada mayoritariamente por el sector agrícola (93%), siguiéndole el sector pecuario (5%); mientras que los sectores doméstico, servicios e industrial participan en menos del 1% (Cuadro 3.4).

Cuadro 3.4. Demanda del recurso hídrico por sector y total en Tapalpa, Jalisco.

Sector	Demanda (m ³ /año)	Participación (%)
Doméstico	117,011.4	0.51
Agrícola	21,589,336.0	93.17
Pecuario	1,249,289.0	5.39
Servicios	213,511.3	0.92
Industrial	2,737.5	0.01
Total	23,171,885.1	100.00

Fuente: Elaboración propia con datos tomados en campo.

Valor económico del servicio ambiental hídrico (SAH)

El valor económico que la sociedad beneficiaria otorga al SAH se calculó con base en la DAP declarada de dicha sociedad en su conjunto por mantener y mejorar las condiciones del SAH, incluidos los sectores doméstico, agrícola, pecuario, servicios e industrial. Los valores para cada sector se obtuvieron por inferencia estadística, al estimar la DAP promedio en pesos por unidad muestral por año (Cuadro 3.5). Para el caso en que la DAP fue dada en horas de trabajo al mes, éstas se convirtieron a pesos, tomando como referencia el salario real de un jornal de 9 horas en la región (\$120/jornal), lo que implica \$13.3/hora.

Cuadro 3.5. Valor económico del SAH por sector en Tapalpa, Jalisco.

Sector	DAP unitaria (\$/unidad muestral/año)	DAP total \$/sector/año)	Participación (%)
Doméstico	1,253.4	1,423,922.3	46.5
Agrícola	1,636.2	544,854.6	17.8
Pecuario	1,313.0	950,594.6	31.0
Servicios	976.8	138,699.9	4.5
Industrial	2,077.0	6,230.4	0.2
Total		3,064,301.8	100.0

Fuente: Elaboración propia con datos tomados en campo.

Como se puede apreciar (Cuadro 3.5), contrario a lo esperado, el valor por unidad muestral fue menor para el sector servicios, el cual se ve superado por el sector doméstico en 28%. En términos agregados, el sector doméstico resultó ser el que tiene mayor DAP con 46.5% del valor económico total; la menor participación es la del sector industrial con un 0.2% del total, explicado en parte por el escaso número de industrias existentes en el área.

DAP y variables socioeconómicas

DAP vs Escolaridad

Al correlacionar la DAP con los años de escolaridad (Cuadro 3.6), se observa que el signo del parámetro β_1 sugiere que el aumento de la escolaridad es un factor determinante que aumenta la probabilidad de la DAP. Por ejemplo, alguien con una escolaridad de 9 años tendría una probabilidad de DAP del 80%. Otra persona con 12 años de escolaridad tendría una DAP de 85%; alguien con 16 años de escolaridad tendría una DAP de 91%. Una persona con 6 años de escolaridad tendría una DAP promedio del 73%, con 3 años del 64% y para personas sin educación formal dicha probabilidad se reduce al 55%.

Cuadro 3.6. Parámetros estimados para el modelo DAP vs Escolaridad.

Parámetros	GL	Valor estimado	Error	Intervalos de confianza del 95%		Chi-cuadrada observada	Pr > Chi-cuadrada
β_0	1	0.2172	0.4009	-0.5691	1.0153	0.29	0.5880
β_1	1	0.1317	0.0476	0.0417	0.2298	7.65	0.0057

DAP vs Edad

El signo del parámetro β_1 sugiere que el aumento de la edad es determinante para disminuir la probabilidad de $DAP=1$ (Cuadro 3.7). Caso contrario a lo encontrado con la variable escolaridad. Los modelos se presentan por separado, ya que bajo un ajuste conjunto de escolaridad y edad, el parámetro asociado a la escolaridad no es estadísticamente significativo. Evidentemente, las dos variables están correlacionadas y es de esperarse que personas de mayor edad tengan menor escolaridad, lo cual coincide con la ampliación de los servicios educativos en zonas

rurales en los últimos 30 años. Es decir, la población joven tiene más años de escuela que sus padres y abuelos, y cuando se presentan ambas variables en el modelo éstas se excluyen ya que de alguna manera se duplica información. Esta correlación no es del todo perfecta pero es suficiente para que una de las variables se excluya del modelo. Con el propósito de afinar las estimaciones se construyeron los siguientes modelos que además incluyen el tipo de sector al que pertenece el entrevistado.

Cuadro 3.7. Parámetros estimados para el modelo *DAP vs Edad*.

Parámetros	GL	Valor estimado	Error	Intervalos de confianza del 95%		Chi-cuadrada observada	Pr > Chi-cuadrada
β_0	1	3.4096	0.7664	2.0157	5.0398	19.79	<.0001
β_1	1	-0.5171	0.1666	-0.8628	-0.205	9.63	0.0019

DAP vs Edad y Sector

Este modelo muestra como las personas del sector agrícola, a edades similares, tienen mayor DAP cuando se les compara con personas de cualquier otro sector (Cuadro 3.8). Para los sectores servicios, doméstico y pecuario, la DAP es prácticamente la misma para grupos de edad igual. En este caso se confirma que el sector agrícola es un poco más sensible ya que la disponibilidad de agua es fundamental para el éxito de la actividad agrícola.

Cuadro 3.8. Parámetros estimados para el modelo *DAP vs Edad y sector* en Tapalpa, Jalisco.

Parámetros	GL	Valor estimado	Error	Intervalos de confianza del 95%		Chi-cuadrada observada	Pr > Chi-cuadrada
β_0	1	3.6100	0.8607	2.0366	5.4307	17.59	<.0001
β_A	1	-0.5072	0.1790	-0.8759	-0.169	8.03	0.0046
β_P	1	-0.5854	0.1967	-0.9920	-0.215	8.86	0.0029
β_D	1	-0.5862	0.2072	-1.0113	-0.192	8.01	0.0047
β_S	1	-0.6030	0.2977	-1.1985	-0.007	4.10	0.0428

DAP vs Edad, Sector y Escolaridad

El ajuste de este modelo es superior al anterior y permite ver como se hace más sensible la percepción de los entrevistados del sector agrícola cuya DAP es ahora más evidente y esto se refleja también en el sector pecuario (Cuadro 3.9). El sector doméstico y de servicios mantienen su nivel de DAP con la edad pero el sector servicios es el único donde se presenta una interacción interesante que se esperaría fuera el caso para los otros sectores.

El sector servicios fue el único donde se pudo detectar el efecto simultáneo de edad y escolaridad en la DAP (Cuadro 3.9). Evidentemente, dos personas de la misma edad tendrían diferentes DAP dependiendo de su escolaridad. Lo mismo en el caso de que se tuviera la misma escolaridad, una persona joven tendría mayor DAP. Es muy probable que este sea el caso de manera general bajo una muestra de mayor tamaño. Debe de notarse que para el sector agropecuario, 13% de su población dijo tener 12 o más años de escolaridad, en el sector pecuario un 20% mencionó tener ese grado de escolaridad, mientras que en el sector doméstico un 30% dijo tener 12 o más años de escolaridad. Sin embargo, para el sector servicios, 63% de la muestra declaró tener más de 12 años de escolaridad por lo que es el sector más sensible al contraste entre edad y escolaridad.

Cuadro 3.9. Parámetros estimados para el modelo *DAP vs Edad y Sector* en Tapalpa, Jalisco.

Parámetros	GL	Valor estimado	Error	Intervalos de confianza del 95%		Chi-cuadrada observada	Pr > Chi-cuadrada
β_0	1	3.2519	0.8980	1.5976	5.1399	13.11	0.0003
β_A	1	0.3041	0.1743	0.0366	0.7671	3.04	0.0811
β_P	1	-0.4402	0.1858	-0.8213	-0.088	5.61	0.0178
β_D	1	-0.5117	0.2041	-0.9317	-0.125	6.29	0.0122
β_S	1	-0.5072	0.2166	-0.9483	-0.091	5.48	0.0192
β_{SEsc}	1	-1.3741	0.5599	-2.7772	-0.448	6.02	0.0141

Conflictos en el uso del suelo

Uso actual

El uso actual del suelo predominante en la cuenca se concentra en los cultivos agrícolas y en la superficie forestal (bosques de pino de alta densidad) que sumados ocupan el 35.3% de la superficie total (Cuadro 3.10).

Cuadro 3.10. Uso actual del suelo y participación porcentual.

Uso actual del suelo (categoría)	Área (ha)	Participación (%)
Urbano o sin vegetación	1,840.0	8.7
Cultivos agrícolas	3,882.4	18.4
Pastizal	2,758.6	13.1
Pastizal con arbustos	1,405.2	6.6
Pastizal con arbolado	1,453.6	6.9
Hojosas	1,944.0	9.2
Pino baja densidad	2,977.6	14.1
Pino alta densidad	3,563.6	16.9
Bosque mixto	681.6	3.2
Cuerpo de agua	265.8	1.3
Sin datos	359.2	1.7
Total	21,132.0	100.0

Uso potencial

El uso potencial que predomina en la cuenca es el forestal y pastizal con un 33.06% de la superficie. Le sigue el uso forestal, con limitaciones para pastizal por pendiente del terreno con 15.87%, seguido por el uso forestal con limitación moderada para pastizal por pendiente del terreno con un 14.64% y finalmente el uso forestal, pastizal y para agricultura con limitaciones por deficiencia de agua con 12.15% (Cuadro 3.11).

La mayor parte de la superficie de la cuenca tiene aptitud forestal, ya que el total de estos cuatro tipos de uso de suelo potencial ascienden a 75.7% de la superficie (Cuadro 3.11).

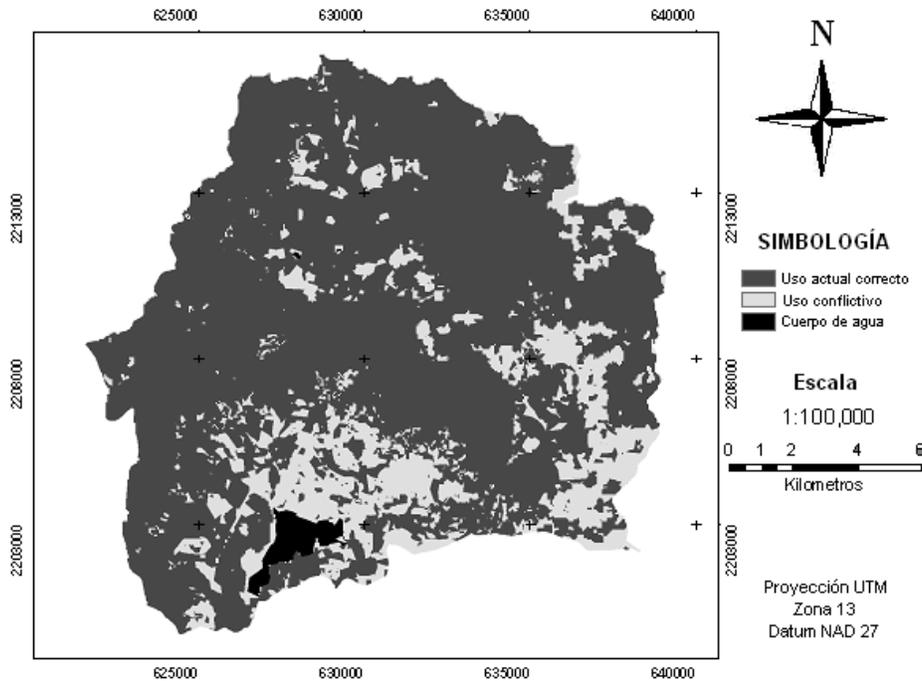
Cuadro 3.11. Participación porcentual del uso potencial del suelo en la cuenca Tapalpa.

Descripción del suelo y características	ha	%
Sin limitaciones para cualquier uso	20	0.09
Forestal, pastizal y para agricultura con limitaciones por deficiencia de agua	2568	12.15
Forestal, pastizal y para agricultura con limitaciones por pendiente del terreno	112	0.53
Forestal, pastizal y para agricultura moderada con limitaciones por deficiencia de agua	57	0.27
Forestal, pastizal y para agricultura moderada con limitaciones por profundidad efectiva de suelo	59	0.28
Forestal, pastizal y para agricultura moderada con limitaciones por pendiente del terreno	2109	9.98
Forestal y pastizal, restringido a la agricultura	20	0.09
Forestal y pastizal, restringido a la agricultura con limitaciones por deficiencia de agua	63	0.30
Forestal y pastizal, restringido a la agricultura con limitaciones por deficiencia de agua y pendiente del terreno	874	4.14
Forestal y pastizal, restringido a la agricultura con limitaciones por pendiente del terreno	800	3.79
Forestal y pastizal, restringido a la agricultura con limitaciones por deficiencia de agua y pendiente del terreno	10	0.05
Forestal y pastizal solamente con presencia de erosión	10	0.05
Forestal y pastizal solamente con limitaciones por fijación de fósforo	6986	33.06
Forestal y pastizal solamente con limitaciones por pendiente del terreno	373	1.77
Forestal con limitación moderada para pastizal por deficiencia de agua	23	0.11
Forestal con limitación moderada para pastizal con presencia de erosión	24	0.11
Forestal con limitación moderada para pastizal por pendiente del terreno	3093	14.64
Forestal con limitaciones para pastizal con presencia de erosión	12	0.06
Forestal con limitaciones para pastizal por pendiente del terreno	3353	15.87
Forestal con limitaciones para pastizal por pendiente del terreno y deficiencia de agua	449	2.13
Uso restringido a vida silvestre con limitaciones por obstrucción y fijación de fósforo	110	0.52
Uso restringido a vida silvestre con presencia de erosión	4	0.02
Total	21,129	100.00

Uso actual del suelo vs uso potencial

Al sobreponer los mapas de uso actual y potencial se generó un mapa de uso conflictivo del suelo (Figura 3.2).

El análisis muestra que actualmente existe una presa (Figura 3.2) que fue construida después de realizar las cartas de uso potencial, por esa razón el mapa de uso potencial reporta un uso con aptitud diferente. La superficie ocupada por la presa es de 265 ha (1.28% del uso potencial) y no se contabilizó como superficie de conflicto. Así, se determinó que el 18.7% (3,875.1 ha) de uso del suelo es conflictivo correspondiendo 47% (1,813.7 ha) a uso agrícola, 47% (1,809.7 ha) a uso urbano y 6% (251.6 ha) a pastizales, las razones de estos cambios en el uso de la tierra están principalmente explicadas por una mayor rentabilidad económica.



Fuente: Adaptado de Flores et al. (2005) y CETENAL (1977a; 1977b).

Figura 3.2. Uso conflictivo del suelo de la cuenca de Tapalpa, Jalisco.

Análisis del costo de oportunidad a través de escenarios

Primer escenario: Reconversión

El costo de oportunidad del área en conflicto, dado por el promedio ponderado de la rentabilidad económica de su uso actual, se estimó con base a una inferencia de ingresos de los sectores pecuario, agrícola y urbano. Para el caso de la renta económica del sector agrícola y pecuario, a partir de los datos obtenidos de las encuestas, se obtuvieron valores de \$2,622.2/ha/año y \$3,304.1/ha/año, respectivamente. Para el caso del sector agrícola, se decidió tomar un valor promedio entre este resultado y la rentabilidad anual de una hectárea de terreno dedicado al cultivo de la papa (\$3,500/ha/año), ya que este cultivo ha ganado mucho terreno en los últimos años debido principalmente a los altos márgenes de ganancia comparados con el resto de los cultivos predominantes en la zona. De esta forma, la rentabilidad económica media anual estimada para el sector agrícola fue de \$3,061.10/ha (Cuadro 3.12).

Cuadro 3.12. Costo de oportunidad por sector (Escenario 1: Reconversión).

Uso actual en conflicto	Renta económica (\$/ha/año)	Superficie (ha)	Costo de oportunidad (\$)
Agrícola	3,061.1	1,813.7	5,551,956.5
Pastizal	3,304.1	251.6	831,449.6
Urbano	6,380.0	1,809.7	11,546,268.1
Total		3,875.1	17,929,674.4

En el caso del costo de oportunidad para el uso urbano, las encuestas indican que el valor promedio de venta es de \$200,000/ha, al cual se le aplicó la tasa de interés real anualizada (sin inflación) de CETES a 28 días (Certificado de la Tesorería de la Federación) de 3.19%, emitida el 30 de agosto del 2005, resultados de la subasta primaria 34/2005 (IXE, 2005). El valor obtenido fue de \$6,380.00/ha/año (Cuadro 3.12).

Posteriormente, al multiplicar la renta económica por la superficie de uso conflictivo, se estimó el costo de oportunidad por tipo de uso en conflicto. Así, el costo de oportunidad de toda la superficie en conflicto en la cuenca fue de aproximadamente 17.930 millones de pesos por año (Cuadro 3.12).

Segundo escenario: Estado actual

Para determinar el costo de oportunidad relacionado con la superficie boscosa que eventualmente podría pasar a un uso más rentable, aunque no adecuado en términos de la aptitud del terreno, se utilizó el promedio ponderado de la rentabilidad económica de cada sector en el escenario anterior (Cuadro 3.12). Esto asume que la tendencia en los cambios de uso del suelo se mantendrá constante en los años siguientes. El valor obtenido para la rentabilidad económica anual en el escenario dos fue de \$4,626.9/ha. De forma agregada, el costo de oportunidad total anual para la superficie que se encuentra actualmente en uso forestal (sólo pino de alta y baja densidad, equivalente al 31.5% de la superficie de la cuenca) asciende a 30.266 millones de pesos al año.

La decisión de considerar en el análisis únicamente la superficie cubierta por pino de baja y alta densidad estuvo motivada por las reglas de operación del PSAH de la CONAFOR, el cual contempla apoyar áreas cuya cobertura forestal sea de al menos el 80%. Aunado a esto, se tiene la limitante de los recursos económicos, por lo que se plantea principalmente proteger las áreas forestales con la mayor cobertura arbórea. Sin embargo, es importante considerar que en caso que la DAP sea mayor al costo de oportunidad total, se deben canalizar recursos hacia áreas con menor cobertura, que también intervienen como reguladoras del SAH.

Costo de oportunidad total (COT)

El COT asciende a \$48,195,289.5 representado por el valor total para recuperar las áreas en conflicto (\$17,929,674.3) y el recurso monetario necesario para que las áreas en uso actual forestal no cambien a un uso distinto (\$30,265,615.2).

3.5 Discusión y conclusiones

Discusión

Resulta menos costoso el proteger áreas proveedoras de SAH que recuperar las que han sido impactadas severamente. Aunque con los valores obtenidos se podría pensar lo contrario, es necesario remarcar que la diferencia se debe a la superficie. Por otra parte, una superficie que ha sufrido mayor deterioro es menos productiva desde la perspectiva de los SAH. En primer lugar se deben proteger y conservar las áreas proveedoras de SAH y en la medida de lo posible se debe transitar hacia la recuperación de áreas dañadas.

Al contrastar la DAP total de la población de la cuenca de Tapalpa (\$3,064,301/año), con el costo de oportunidad de su superficie boscosa (\$30,265,615.2/año), se obtuvo un déficit anual de \$27,201,313; es decir, la DAP total de la población de la cuenca sólo representa el 10.1% del costo de oportunidad. Asimismo, al comparar la DAP total con el costo de oportunidad total (COT), incluyendo la protección y conservación

de la superficie boscosa y la recuperación de la superficie en conflicto, el déficit aumenta a \$45,130,987/año, lo que significa que la DAP total únicamente cubre el 6% del COT.

De lo anterior se deduce que la DAP por el SAH por parte de la población de la cuenca Tapalpa no es suficiente para mantener la superficie boscosa sin cambio de uso, e implica que en el corto plazo se requiere un subsidio de \$4,158.00/ha/año para cubrir dicho costo. Este valor contrasta con el pago de \$300/ha/año que establece el PSAH en el 2005 para el tipo de bosque predominante en la zona. Si además, se contempla la recuperación de la superficie en uso conflictivo, el subsidio debe incrementarse a \$6,899/ha/año.

En apariencia los valores arriba estimados son muy altos, sin embargo, es conveniente aclarar que se asume que el pago del SAH sería cubierto solamente por la población que está dentro de los límites de la cuenca; aún cuando ésta sólo usa parte de la oferta total disponible de agua. Seguramente alguien más hace uso del recurso hídrico aguas abajo, por lo que se debe considerar la posibilidad de que estos usuarios contribuyan con un pago para complementar el costo de conservar los bosques en la parte alta de la cuenca. Una estimación de la posible contribución de usuarios que habitan fuera de los límites de esta cuenca está más allá del alcance del presente estudio, por lo que se recomienda realizar un estudio complementario que ayude a responder tal interrogante.

Es importante subrayar la necesidad de implementar acciones tendientes a mejorar la DAP en el corto y mediano plazos. Lo anterior, a través de elevar el nivel de escolaridad de la población y de la percepción que puedan tener hacia el agua (cantidad y calidad) como un SAH que tiene un costo financiero. Esto cobra mayor importancia día a día debido al acelerado crecimiento poblacional de la región y a los cambios en el uso del suelo, cuya tendencia se orienta a convertir las áreas forestales a usos agrícolas y urbanos, siendo éste último el más rentable (Cuadro 3.12). Lo anterior tiene implicaciones importantes debido a que en el futuro la

cantidad disponible de agua *per cápita* quizá disminuya, al igual que la calidad de la misma, ante la carencia de una planificación adecuada del desarrollo urbano y agrícola, manifestada por los mismos pobladores de la región.

Ante esta problemática, es primordial la coordinación de esfuerzos, tanto de organismos privados como gubernamentales y pobladores de la región, para mejorar el aprovechamiento del recurso hídrico; la sub-utilización del mismo lo encarece. Por ejemplo, un mecanismo en el sector doméstico sería la venta de “agua de calidad” para consumo humano. De acuerdo a las encuestas, más de la mitad de la población (58%) en la región opina que el agua tiene buena calidad, pero 8 de cada 10 personas consumen agua embotellada y casi la mitad de este grupo gasta en promedio \$30 por semana por este concepto.

Si al usuario doméstico se le garantiza agua potable, los recursos por consumo de agua embotellada podrían invertirse en obras de conservación en la zona de recarga de la cuenca. La apreciación que tienen los pobladores acerca de los recursos naturales juega un papel determinante en el éxito de la implementación de un mercado de SAH. En cuanto a la disponibilidad y calidad de agua, el 50% de la población opina que existe un problema, pero la mayoría coincidió en que éste es principalmente de distribución. Con estos resultados, es claro que la implementación de un mercado de SAH en la zona exige grandes retos, principalmente enfocados a elevar la conciencia ambiental; estos retos parecen estar ligados al nivel de estudios de la población (el 50% de la población sólo tiene estudios de primaria), y a la percepción de que no hay problemas de disponibilidad de agua en la región.

Una característica importante de la zona es su gran potencial turístico --el 85.3% de los entrevistados opinan que la actividad turística se ha incrementado en los últimos años. Esta característica le confiere enormes ventajas en el desarrollo económico, pero por otro lado impacta negativamente a los recursos naturales. Al respecto, el 82.2% de los pobladores opina que dicha actividad turística tiene más impactos positivos que negativos en una visión estrictamente económica. Sin embargo, sólo

con una visión integral que reconozca los impactos negativos de esta actividad económica será posible la creación y el sostenimiento de un mercado SAH en la región.

Finalmente, es importante mencionar que para que los ecosistemas forestales puedan proporcionar los servicios ambientales hidrológicos de manera sostenible es importante contar con programas productivos (sistemas agrosilvopastoriles o una combinación de éstos) que permitan a los propietarios de los terrenos forestales obtener beneficios de una manera controlada y sostenible. Lo anterior puede ser posible a través de una planificación participativa.

Conclusiones

Los problemas de abastecimiento y calidad de agua en la población de Tapalpa, obedecen más a un deficiente manejo en la distribución, almacenamiento y tratamiento de agua, que a un déficit de oferta de la misma. El sector agrícola es el principal consumidor de agua en la cuenca con 93% del total consumido. Dentro del sector, el uso de agua se destina principalmente para la producción de hortalizas (50%) y cultivos básicos (23.3%).

En las poblaciones dentro de la cuenca se carece de un mecanismo para conocer la cantidad demandada de agua por el sector urbano. Lo anterior implica el cobro de una tarifa general (en el mejor de los casos), que no discrimina el pago de la cantidad de agua realmente utilizada por el usuario. Debido a ello se sugiere (es también inquietud de los pobladores) la utilización de medidores de consumo de agua para cada usuario.

La DAP fue mayor en el sector servicios (76.7% de los casos), aunque en términos agregados la mayor participación monetaria en la DAP estuvo dada por el sector doméstico (46.5% del total), debido al mayor número de usuarios que componen este sector. Al modelar la DAP se determinó que la escolaridad tiene una relación directa con la DAP por el SAH. De manera contraria, la edad tiene una relación

inversa. También se encontró que el sector agrícola presenta una mayor DAP que otros sectores, considerando igualdad de condiciones en otros factores (escolaridad y edad). Lo anterior pone de manifiesto la importancia de elevar el nivel de escolaridad de la población, para que la población adquiriera un mayor grado de concientización sobre el problema del SAH.

El valor de la DAP total fue menor que el costo de oportunidad para conservar la superficie boscosa de la cuenca, con un déficit anual de 27.201 millones de pesos. La DAP solo cubre el 10% de dicho costo de oportunidad. Al agregar a este costo el valor necesario para la recuperación de la superficie con un uso conflictivo, el déficit anual aumentó a 45.131 millones de pesos, por lo que la DAP sólo cubre el 6% del costo de oportunidad. Ante esta situación, es necesario establecer mecanismos de subsidio si se desea evitar el cambio de uso del suelo de los terrenos forestales, o aumentar la base de usuarios del SAH en zonas más abajo de la cuenca para aprovechar el excedente de la oferta anual de agua e incrementar la DAP total.

Debido a que muchos usuarios del SAH desconocen la importancia de hacer obras de conservación en la zona de recarga de la cuenca, es necesario implementar en forma paralela al cobro por tal servicio, campañas de sensibilización y educación ambiental. El desarrollo de la actividad turística y el gran potencial que la región tiene en este rubro pueden significar un problema en cuanto a la calidad y cantidad de agua en un futuro cercano. Para evitar esto, es necesaria una minuciosa planificación en el crecimiento de los espacios urbanos. También se requiere una visión integral que reconozca los impactos negativos de esta actividad económica y la necesidad de los SAH de calidad para mantener la demanda de desarrollo regional.

3.6 Reconocimientos

En particular al Dr. Juan de Dios Benavides Solorio del Instituto de Nacional de Investigaciones Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) por el apoyo en el trabajo de campo, y en general a la CONAFOR por asignar recursos para este estudio.

3.7 Literatura citada

Bandara, R. and C. Tisdell. 2004. The net benefit of saving the Asian elephant: A policy and contingent valuation study. *Ecological Economics* 48(2004): 93-107.

Barrantes, G. y M. Vega. 2002. Valoración económica del servicio ambiental hídrico: caso de aplicación, Cuenca del Río Tempisque, Instituto de Políticas para la Sostenibilidad (IPS). Costa Rica. 15 p. E-mail: gerardo@ips.or.cr. www.ips.or.cr

CETENAL. 1976. Carta edafológica de Tapalpa E13-B14. Escala 1: 50,000. Primera Edición.

CETENAL. 1977a. Carta de uso potencial del suelo de Tapalpa E13-B14. Escala 1: 50,000. Primera Edición.

CETENAL. 1977b. Carta de uso potencial del suelo de Atemajac de Brizuela, F13-D84. Escala 1: 50,000. Primera Edición.

Diario Oficial de la Federación. 2003. Reglas de operación para el otorgamiento de pagos del Programa de Servicios Ambientales Hidrológicos. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), México. 3 de octubre de 2003.

Dixon, J. y S. Pagiola. 1998. Economic analysis and environmental assessment: Environmental assessment sourcebook update. Washington, D.C. Environment Department, The World Bank. 20 p.

Dunne, T., and L. B. Leopold. 1996. Water in environmental planning. W. H. Freeman and Company. New York. 818 p.

FCEACAC --Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A.C. (Fondo Educación Ambiental), la Fundación Gonzalo Río Arronte, IAP, y el Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza (FMCN). 2006. El agua en

México: Lo que todas y todos debemos saber. FEA (Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A.C.), CEMDA (Centro Mexicano de Derecho Ambiental, A.C.) y Presencia Ciudadana Mexicana, A.C. 93 p. WWW.agua.org.mx.

- Flores G., J. G., J. de D. Benavides S. y D. A. Moreno G. 2005. Clasificación espectral de coberturas de suelo como soporte en la evaluación de servicios ambientales. *In: Contribución al estudio de los servicios ambientales*. Benavides S., J. de Dios, *et al.* (eds). INIFAP. SAGARPA. Pp. 55-74.
- González R., V. 2005. Apuntes del curso de introducción al muestreo. Programa de Estadística y Cómputo aplicado. Colegio de Postgraduados. Edo. de México, México.
- Hidano, N., T. Kato y M. Aritomi. 2005. Benefits of participating in contingent valuation mail surveys and their effect on respondent behavior: A panel analysis. *Ecological Economics* 52(2005): 63-80.
- IXE. 2005. IXEnet. Consultado en línea. Disponible en: <http://www.comfin.com.mx/comunicados/ixe/05/ag/0535.pdf>
- Larqué S., B. S. 2003. Valoración de los servicios ambientales del bosque. Estudio de caso: Ixtapaluca, Chicoloapan, Chimalhuacan y La Paz, municipios del Estado de México. Tesis de Doctorado. División de Ciencias Económico-Administrativas. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Edo. de México. 141 p. + Anexos.
- León, C.J. y F.J. Vázquez-Polo. 2000. Modelización del aprendizaje en valoración contingente. *Investigaciones económicas*. Vol XXIV (1): 117-138.
- Manson, R.H. 2004. Los servicios hidrológicos y la conservación de los bosques en México. Artículo de Forum. *Madera y Bosques* 10(1):3-20.
- Melo C. O., y G. Donoso H. 1995. Uso de encuestas de valoración contingente para valorar beneficios recreativos de parques urbanos, el caso del parque Bustamante. Dpto. de Economía Agraria, Facultad de Agronomía, Pontificia Universidad Católica de Chile. Series de Investigación No. 68: 1-68.
- Pouta, E., M. Rekola, J. Kuuluvainen, O. Tahvonen, and C. Z. Li. 2000. Contingent valuation of NATURA 2000 nature conservation programme in Finland. *Forestry* 73(2): 119-128.
- SNIM-INEGI, 2000. Sistema Nacional de información municipal. Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (INAFED). Disponible en: http://www.inafed.gob.mx/wb2/INAFED/INAF_Sistema_Nacional_de_Informacion_Municipal

3.8 Anexo. Estructura, contenido y objetivo de los diferentes tipos de encuestas aplicadas por sector.

Sector	Propósitos	Estructura y contenido
Forestal	<p>Determinar la disponibilidad a cobrar (DAA) por parte de los dueños o poseedores de las tierras en que se “captura” el agua. Así como estimar los beneficios financieros en la actividad forestal.</p>	<p>Datos del encuestado: Sexo, edad, estado civil, grado de estudios, lugar donde vive de no ser el predio, actividades económicas complementarias, apoyos gubernamentales recibidos, ingreso promedio anual, área y uso del suelo, precio estimado de venta por ha.</p> <p>Abastecimiento y uso del agua: Procedencia del agua, calidad, causas de la calidad, costo del agua, consumo diario de agua, problemas de abasto.</p> <p>Información ambiental: Escasez de agua y causas en los últimos 5 años, presencia de deslaves o arrastre de materiales, problemas ambientales más graves, conocimiento de programas -CONAFOR y CNA- para mejorar calidad y cantidad de agua, expectativas de un Proyecto de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos.</p> <p>Disposición a aceptar una compensación o pago (DAA): Disposición a participar en un proyecto de PSAH, tipo de participación, cantidad (\$) a aceptar, viabilidad del PSAH en el cambio de uso de suelo, participación en otros programas de conservación, procedencia del pago, mecanismo de pago, administración de fondos PSAH.</p>
Doméstico	<p>Estimar la disponibilidad a pagar por parte de los hogares, así como cuantificar la demanda del servicio hídrico.</p>	<p>Datos del encuestado (Sexo, edad, estado civil, grado de estudios, ingreso promedio mensual.</p> <p>Abastecimiento y uso del agua: Importancia del agua, procedencia del agua, causas de escasez, ubicación de la casa -nivel económico-, calidad, causas de la calidad, costo del agua, consumo diario de agua, problemas de abasto, enfermedades, consumo de agua purificada.</p> <p>Información ambiental: Escasez de agua y causas en los últimos 5 años, problemas ambientales más graves, conocimiento de programas -CONAFOR y CNA- para mejorar calidad y cantidad de agua, expectativas de un Proyecto de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos, autoridades y funciones involucradas en el proyecto.</p> <p>Disposición a pagar (DAP): Empleo y antigüedad, gasto promedio mensual, pago por agua, disposición a participar en un programa de PSAH, tipo, forma y cantidad de contribución, manejo de los fondos derivados del PSAH.</p>
Agrícola	<p>Determinar la disponibilidad a pagar por parte de los productores</p>	<p>Datos del encuestado: Sexo, edad, estado Civil, grado de estudios, ingreso promedio mensual.</p> <p>Abastecimiento y uso del agua: Importancia del agua, procedencia del agua, tiempo y causas de escasez, cultivo(s), lamina de riego aplicada, superficie irrigada, cantidad de riegos aplicados por ciclo agrícola, ciclos agrícolas/año, calidad, causas de la calidad, costo del agua, problemas de abasto.</p> <p>Información ambiental: Escasez de agua y causas en los últimos 5 años, problemas ambientales más graves, conocimiento</p>

	<p>agrícolas, así como cuantificar la demanda del servicio hídrico en éste sector.</p>	<p>de programas -CONAFOR y CNA- para mejorar calidad y cantidad de agua, expectativas de un Proyecto de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos, autoridades y funciones involucradas en el proyecto.</p> <p>Disposición a pagar (DAP): Empleo y antigüedad, gasto promedio mensual, pago por agua, disposición a participar en un programa de PSAH, tipo, forma y cantidad de contribución, manejo de los fondos derivados del PSAH.</p>
Pecuario	<p>Determinar la disponibilidad a pagar por parte de los ganaderos, así como cuantificar la demanda del servicio hídrico en este sector.</p>	<p>Datos del encuestado (Sexo, edad, estado Civil, grado de estudios, ingreso promedio mensual.</p> <p>Abastecimiento y uso del agua: Importancia del agua, procedencia del agua, tiempo y causas de escasez, consumo de agua/día, calidad, causas de la calidad, costo del agua, problemas de abasto.</p> <p>Información ambiental: Escasez de agua y causas en los últimos 5 años, problemas ambientales más graves, conocimiento de programas -CONAFOR y CNA- para mejorar calidad y cantidad de agua, expectativas de un Proyecto de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos, autoridades y funciones involucradas en el proyecto.</p> <p>Disposición a pagar (DAP): Empleo y antigüedad, gasto promedio mensual, pago por agua, disposición a participar en un programa de PSAH, tipo, forma y cantidad de contribución, manejo de los fondos derivados del PSAH.</p>
Industrial	<p>Determinar la disponibilidad a pagar por parte de las industrias, así como cuantificar la demanda del servicio hídrico en éste sector.</p>	<p>Datos del encuestado: Sexo, edad, estado Civil, grado de estudios, ingreso promedio mensual.</p> <p>Abastecimiento y uso del agua: Importancia del agua, procedencia del agua, tiempo y causas de escasez, giro de la empresa, consumo de agua/día, calidad, causas de la calidad, costo del agua, problemas de abasto.</p> <p>Información ambiental: Escasez de agua y causas en los últimos 5 años, problemas ambientales más graves, conocimiento de programas -CONAFOR y CNA- para mejorar calidad y cantidad de agua, expectativas de un Proyecto de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos, autoridades y funciones involucradas en el proyecto.</p> <p>Disposición a pagar (DAP): Antigüedad de la empresa, pago por agua, disposición a participar en un programa de PSAH, tipo, forma y cantidad de contribución, manejo de los fondos derivados del PSAH.</p>

Servicios	Determinar la disponibilidad a pagar por parte de los negocios, así como cuantificar la demanda del servicio hídrico en éste sector.	<p>Datos del encuestado: Sexo, edad, estado Civil, grado de estudios, ingreso promedio mensual.</p> <p>Abastecimiento y uso del agua: Importancia del agua, procedencia del agua, tiempo y causas de escasez, tipo de actividad, consumo de agua/día, calidad, causas de la calidad, costo del agua, problemas de abasto.</p> <p>Información ambiental: Escasez de agua y causas en los últimos 5 años, problemas ambientales más graves, conocimiento de programas -CONAFOR y CNA- para mejorar calidad y cantidad de agua, expectativas de un Proyecto de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos, autoridades y funciones involucradas en el proyecto.</p> <p>Disposición a pagar (DAP): Antigüedad del negocio, pago por agua, disposición a participar en un programa de PSAH, tipo, forma y cantidad de contribución, manejo de los fondos derivados del PSAH.</p>
Pobladores	Conocer la percepción de los pobladores hacia los recursos naturales, factor determinante en el éxito de los mercados de SAH.	<p>Datos del encuestado (Sexo, edad, estado civil, grado de estudios, años de radicar en la zona, lugar de nacimiento).</p> <p>Apreciación del medio ambiente: Problemas ambientales y causas, disponibilidad y cantidad de agua, causas y soluciones, aumento en la actividad turística y consecuencias, beneficios económicos generados, sectores beneficiados, compatibilidad de actividad turística y conservación del medio ambiente, disminución de áreas boscosas, tipo y flujo de cambios de uso de suelo, impacto de cambios de uso de suelo.</p>
Turistas	Conocer la percepción de los turistas hacia los recursos naturales. Actividad de gran desarrollo en la zona.	<p>Datos del encuestado: Sexo, edad, estado Civil, grado de estudios, lugar en que radica.</p> <p>Actividad turística: Razones para visitar Tapaipa, dinero y tiempo invertidos en el viaje, tiempo y dinero a invertir durante su estadía, servicios a utilizar, servicios deseables que no se prestan.</p> <p>Apreciación del medio ambiente: Problemas ambientales y causas, disponibilidad y cantidad de agua, causas y soluciones, aumento en la actividad turística y consecuencias, compatibilidad de actividad turística y conservación del medio ambiente.</p>

CAPÍTULO IV

PROYECCIONES DE OFERTA Y DEMANDA HÍDRICA EN LA CUENCA TAPALPA, JALISCO

HYDRIC SUPPLY AND DEMAND PROJECTIONS IN THE WATERSHED OF TAPALPA, JALISCO

RESUMEN

Se realizaron proyecciones de las cantidades demandadas y ofertadas de agua en la cuenca de Tapalpa, Jalisco, con la finalidad de conocer su comportamiento futuro. Utilizando el horizonte temporal 2005-2030, se crearon tres escenarios: (i) *escenario base*, (ii) *aumento en la cantidad demandada*, y (iii) *decremento en la cantidad ofertada e incremento en la cantidad demandada*. En el escenario base, se mantuvieron constantes la cantidad ofertada de agua para el 2005 en la cuenca Tapalpa, estimada mediante el modelo hidrológico SWAT (42,963,900 m³/año), y la demandada, la cual fue obtenida con base en el consumo de agua actual, estimado por sector, por medio del método de valoración contingente (3,859 lt/persona/día). Así, en este escenario se determinó que en el 2030 la cantidad demanda (24,900,280 m³/año) no supera la ofertada, representando solo el 57.9% de ésta. En el segundo escenario se mantuvo igualmente constante la cantidad ofertada, pero la demandada fue incrementada en un 40% en los primeros 20 años; en este caso tampoco se vislumbran problemas de déficit y la cantidad demandada proyectada para el año 2030 (35,146,813 m³/año), representa el 81.8%. de la ofertada. Al mantener el mismo incremento en la cantidad demanda, aplicando un decremento del 37% en la ofertada (tercer escenario), se encontró que en el año 2021 ya existe un déficit del recurso hídrico del orden de 735.28 miles de m³/año, que representa el 2.4% de la cantidad demandada para ese año (30,440,928 m³/año).

Palabras clave: *Demanda y oferta de agua, proyecciones, cuenca forestal.*

SUMMARY

It was projected the water demand and supply in the Tapalpa watershed, Jalisco with the purpose of knowing its future behavior. It was used the temporal horizon 2005-2030. Three scenarios were created. *(i) base scenario, (ii) increased demand, and (iii) decreased supply and increased demand.* In the base scenario it was considered constant water supply using 2005 values. This was determined using the hydrologic model SWAT (42,963,900 m³/year). Demand was also considered constant (3859.03 lt/person/day) and was estimated using water consumption per sector through contingent valuation method. Thus, it was found for this scenario that in 2030 the water demand (24,900,280 m³/year) does not exceed the supply, representing 57.9% of total supply. In the second scenario water supply was also considered constant meanwhile the water demand was increased in 40% during the next 20 years. Similar to the first scenario no water deficit was found in the demand for 2030 (35,146,813 m³/year) which represents 81.8% of total supply for that year. When the same increasing rate in the demand was assumed, but applying a 37% decrement in the supply—third scenario—it was found a water deficit for the year 2021 (735.28 thousand of m³/year) which represents 2.4% of the demand for that year (30,440,928 m³/year).

Key words: Water demand and supply, projections, forest watershed.

4.1 Introducción

El 70% de la superficie terrestre está cubierta por agua. Sin embargo, de este total, 97.5% es agua salada y el resto es agua dulce. De esta última, casi el 70% se encuentra almacenada en témpanos y glaciares polares, un 29% se halla en las profundidades de la Tierra. Por lo que sólo aproximadamente un 1% está en ríos, lagos, pantanos, suelo, embalses, la atmósfera y en organismos vivos (Espinoza, 1999). Así, la disponibilidad del recurso agua es un problema mundial. Existen datos que revelan que hace 2000 años cuando la población sólo representaba el 3% de la actual, la disponibilidad de agua era la misma que ahora (Agua-Latina, 2001).

El incremento de la cantidad demandada de agua tiene una relación directa con el aumento poblacional, pero son alarmantes los datos arrojados por el reporte de Agua Latina (2001) en el que se indica que la población se ha multiplicado tres veces en los últimos 70 años, en tanto que el uso del recurso hídrico ha crecido seis veces.

En México, los problemas con relación al recurso hídrico se han acentuado en los últimos años, por lo que el problema no pasa inadvertido. En parte, la escasez del agua se debe a las bajas tarifas que se cobran por ella. Es importante destacar que el agua no fue reconocida como un bien económico sino hasta enero de 1992 en la Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente celebrada en Dublín (OMM, 2006). Esto fue un gran avance, ya que hasta entonces este recurso no era plenamente considerado como parte del proceso productivo y por tanto, generador de valor, como lo indica el cuarto principio rector de la declaración de Dublín: *“...es esencial reconocer ante todo, el derecho fundamental de todo ser humano a tener acceso a un agua pura y al saneamiento por un precio asequible. La ignorancia, en el pasado, del valor económico del agua ha conducido al derroche y a la utilización de este recurso con efectos perjudiciales para el medio ambiente. La gestión del agua, en su condición de bien económico, es un medio importante de conseguir un aprovechamiento eficaz y equitativo y de favorecer la conservación y protección de los recursos hídricos...”*

Por otra parte, es un hecho que la distribución geográfica del agua en el país representa retos importantes para algunas regiones. En su mayor parte, México es un país árido o semiárido (56% del total de la superficie), es decir, en los estados del norte, que cubren el 50% de la superficie, llueve sólo 25% del total, esto implica que en un área donde se capta 20% de la precipitación del agua del país se encuentra 76% de la población, 90% de la irrigación, 70% de la industria, y se genera 77% del producto interno bruto (FEA, 2006).

Otro aspecto importante a nivel nacional es la sobreexplotación de acuíferos, la cual tiene lugar cuando se extrae más agua de la que naturalmente se recarga. Existen 650 acuíferos distribuidos en el país, de estos, un 15%—que suministran aproximadamente la tercera parte de la extracción nacional para todos los usos—está seriamente sobreexplotado y la mayoría están contaminados (Diario Oficial de la Federación, 2001).

El problema del agua y su disponibilidad se han convertido en un asunto estratégico a nivel nacional. En este sentido, existen algunos esfuerzos orientados a una mejor utilización del recurso hídrico, como el Programa de Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH), iniciado por el gobierno federal a través de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) en el 2003, mediante el cual se otorga una compensación a los dueños o posesionarios de los ecosistemas que proporcionan el servicio ambiental hidrológico (SAH) (Diario Oficial de la Federación, 2003). Aunque este programa es de reciente creación, es importante contar con estudios y herramientas que permitan monitorear y adecuar las acciones orientadas a crear una nueva cultura del agua en México.

En relación a lo anterior, en el Capítulo II y III de este documento se describe cómo se estimó la cantidad ofertada y demandada de agua, así como la determinación de la disponibilidad a pagar (DAP) por el SAH en la cuenca Tapalpa, Jalisco. Lo anterior, con la finalidad de aportar información sobre la factibilidad de crear un mercado de SAH en la cuenca Tapalpa. El realizar un estudio donde se cuantifique

por un lado la cantidad disponible de agua producida por una cuenca y por otro la cantidad demandada del recurso dentro de la misma, permite proyectar estos componentes de mercado en un horizonte de tiempo e identificar el momento en que el sistema dejará de ser sostenible. Lo anterior representa el principal objetivo de la presente investigación. Esto significa conocer el momento en que la oferta de agua en la cuenca Tapalpa no será capaz de satisfacer la demanda dentro de la misma.

Adicionalmente, se crearon escenarios futuros donde se manipuló la cantidad de agua producida por la cuenca y la utilizada. Se simularon las relaciones entre el recurso hídrico, el aumento poblacional —tendencia existente en las poblaciones dentro de la cuenca— y los esfuerzos por preservar la cubierta forestal dentro de la cuenca Tapalpa.

Existen algunos estudios que abordan el análisis de proyecciones futuras a través de escenarios sobre el agua. Por ejemplo, el realizado en el estado de California, USA en 2003 por el Pacific Institute (Gleick *et al.* 2005), donde como parte del Plan Estatal de agua se realizaron proyecciones de la demanda y oferta del recurso hídrico hasta el año 2030. Fueron contemplados tres escenarios: (i) se consideró la demanda de agua con las mismas tendencias del año 2000, (ii) se consideró que en el año 2030 la utilización del agua será más eficiente con una menor demanda de agua per cápita y (iii) en el año 2030 la utilización de agua es menos eficiente que en el año 2000. Los resultados indicaron que con la tecnología existente de eficiencia en el uso del agua y utilizando diferentes estimaciones en el precio del bien, en los escenarios (i) y (ii) en el 2030, se pronostica una reducción en el consumo de agua en los usos agrícola y urbano. Sin embargo, en el escenario de alta eficiencia (ii), la reducción en el uso urbano representa 20% del consumo humano de agua para el año 2000.

En México, existe un estudio realizado en el Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México, en el que se eligió la zona centro del país para evaluar la disponibilidad de agua en el 2050, con base en el cambio en la oferta provocado por el cambio climático. Dicho estudio contempla las cuencas de los ríos

Balsas, Pánuco y la cuenca Lerma-Chapala-Santiago. Se determinó esta última como la región más vulnerable, con serios problemas en la recarga de acuíferos a tal grado que la demanda de agua superará a la oferta disponible en el 2050 (Maderey, 2006).

Por su parte la CONAGUA (2007) en sus estadísticas sobre el agua señala que debido al crecimiento de la población y de la actividad económica del país, en el año 2030 la situación del agua en México se tornará más crítica si se mantienen las tendencias actuales en el uso del recurso. Al punto que la disponibilidad natural media per cápita de agua por habitante a nivel nacional disminuirá de 4,416 m³/hab/año a 3,841 en el 2030, y en algunas de las Regiones Hidrológico-Administrativas del país (I Península de Baja California, VI Río Bravo y XIII Aguas del Valle de México), la disponibilidad natural media de agua alcanzará niveles cercanos o incluso inferiores a los 1, 000 m³/hab/año, es decir una condición calificada como de grave escasez (CONAGUA, 2007).

Así, con el fin de hacer frente a la disminución de la disponibilidad del agua en los próximos años, es necesario realizar acciones para reducir su demanda, a través del incremento en la eficiencia del uso, para lo cual es necesario indagar sobre las tendencias del uso y disponibilidad del recurso en las diferentes regiones del país.

4.2 Materiales y métodos

Área de estudio

La cuenca de Tapalpa (Figura 4.1) se localiza en el estado de Jalisco, municipio de Tapalpa, aproximadamente a 130 km de Guadalajara en la región sur-oeste del estado. Su extensión abarca 21,000 ha. Se considera una cuenca forestal, ya que 44% pertenece a superficie forestal. Sus coordenadas Geográficas son 20° 18' y 19° 42' L. N. y 103° 50' y 103° 36 L. O. (Flores *et al.*, 2005).

El pueblo de Tapalpa es la principal población dentro de la cuenca, con 5,566 habitantes, que representan un 36% de la población total del municipio (INEGI, 2001).

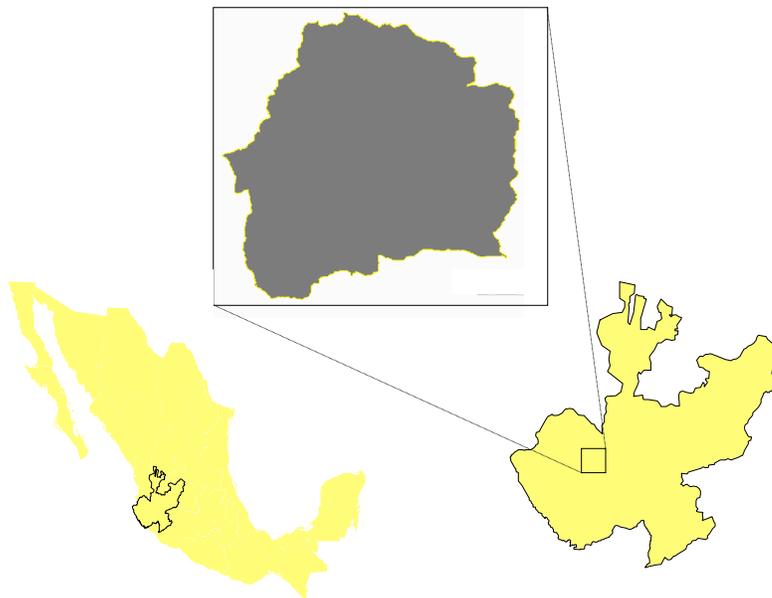


Figura 4.1. Localización de la cuenca Tapalpa en el estado de Jalisco.

Oferta y demanda hídrica en el futuro en Tapalpa

Con la finalidad de conocer el comportamiento futuro en la relación entre demanda y oferta del recurso hídrico en Tapalpa, se realizaron proyecciones de estos componentes en un horizonte temporal de 2005 a 2030, con base en el consumo de agua actual estimado por sector -por medio del método de valoración contingente, MVC⁸-, simulando tres escenarios: (i) El **escenario base**, el cual mantuvo constante la cantidad ofertada y la demandada de agua de acuerdo a la tendencia actual; (ii) **Aumento en la cantidad demandada**, supone una cantidad ofertada constante pero la cantidad demandada se incrementó progresivamente; y (iii) **Decremento en la**

⁸ Los datos para esta parte del estudio provienen de otra investigación relacionada, en la cual se estimo la demanda y disponibilidad a pagar del SAH en la cuenca Tapalpa. (López-Paniagua *et al.*, 2006).

cantidad ofertada e incremento en la cantidad demandada. A continuación se detalla cada uno.

(i) Escenario base

La cantidad ofertada del recurso hídrico—estimación realizada con el modelo SWAT—para la cuenca de Tapalpa en el 2005 (42,963,900 m³/año) (ver Capítulo II) se mantuvo constante en el horizonte de tiempo (2005-2030), suponiendo así, que la provisión de agua será la misma al menos hasta el año 2030.

Se hicieron proyecciones hasta el año 2030 de la demanda promedio de agua *per capita*, ponderada con base en la participación porcentual del total de personas por sector (e.g. doméstico, agrario, pecuario, servicios e industrial). Para lo cual se utilizaron las estimaciones de consumo del recurso hídrico por sector, obtenidos de las encuestas a través del MVC (véase López-Paniagua *et al.*, 2006), así como proyecciones de la población de México 2000-2050 por municipio (CONAPO, 2006).

En el caso del sector doméstico y debido a que el estudio de demanda se obtuvo información para el consumo de agua por hogar, se dividió este dato entre el número promedio de habitantes por hogar en el municipio de Tapalpa (INEGI, 2001), para tener una estimación del consumo por persona (Cuadro 4.1).

Cuadro 4.1. Estimación de la demanda promedio de agua por persona, ponderada con base en la participación porcentual del total de personas por sector encuestado en Tapalpa, Jalisco.

Sector	Consumo promedio	Unidades	Habitantes por sector	Factor de ponderación ¹	Consumo ponderado
Doméstico	56.44 ²	lt/persona/día	15393	0.9258	52.26
Agrícola	177624.20 ³	lt/agricultor/día	333	0.0200	3557.83
Pecuario	4727.50 ³	lt/ganadero/día	724	0.0435	205.88
Servicios	4119.40 ³	lt/negocio/día	172	0.0103	42.62
Industria	2500.00 ³	lt/industria/día	3	0.00018	0.45
TOTAL		lt/día	16625		3859.03 ⁴

¹El factor de ponderación se obtuvo por la participación porcentual del total de personas por sector en la población total del municipio;

²Este valor fue obtenido de dividir el consumo promedio por hogar (282.2 lt/día) entre el número promedio de habitantes por hogar (5);

³Véase (López-Paniagua *et al.*, 2006).

⁴Consumo promedio de agua por persona, dado en lt/día.

(ii) Incremento en la cantidad demandada

En este escenario se mantuvo constante la oferta de agua, mientras que la demanda promedio del recurso por persona se incrementó en un 40%, en los primeros 20 años del horizonte de planeación. Por lo tanto, la cantidad demandada promedio, estimada en el año 2025, representaría el 140% de la estimada para el 2005.

Por lo anterior, se aplicó un incremento del 1.61% sobre la demanda promedio del año anterior, a excepción del año 2006, donde el incremento fue aplicado a la proyección de la cantidad demandada para ese año (en vez del valor real del 2005).

La decisión del orden de este incremento se basó en las proyecciones del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente, de acuerdo al cual, desde 1950 se ha triplicado el uso del agua en el mundo y, de continuar la tendencia actual, en los próximos 20 años los seres humanos utilizaremos 40% más agua que en la actualidad (PNUMA, 2003).

(iii) Incremento en la cantidad demandada y decremento en la cantidad ofertada

Según cálculos oficiales –en un escenario en el que se mantenga un crecimiento económico del PIB del 3%; un desarrollo industrial que aporte el 22% del PIB nacional; con incrementos poco considerables en la eficiencia de conducción, distribución y aplicación de agua en riego agrícola y baja productividad de los cultivos–, en 20 años, la demanda de agua para uso consuntivo será de 100 km³ (3,181 m³/s), en lugar de los 73 km³ actuales (aumento del 37%). Desde esta perspectiva, el panorama es poco alentador. La disponibilidad de agua por habitante, como lo indican esas cifras, tiende a reducirse notoriamente en los próximos 20 años y se volverá definitivamente crítica. Esto quiere decir que bastará una generación más para que el agua deje de ser un problema y se convierta en un asunto estratégico de supervivencia (CCE, 2006).

Por lo anterior, en este escenario además de mantener los incrementos en la cantidad demandada del primer escenario, se supuso una disminución en la cantidad ofertada dada por un decremento del 37% (por el aumento del uso consuntivo del agua mencionado arriba). Lo anterior se supuso con base en una creciente ineficiencia en el uso de agua para la actividad agrícola (la más predominante en la cuenca -93%-), así como una baja productividad. Por lo tanto, la cantidad ofertada de agua por persona estimada para el 2025, representa solo el 63% de la estimación para el año 2005. De esta forma, se aplicó un decremento constante del 2.28% sobre la oferta de agua del año anterior.

Cabe aclarar que para el segundo y tercer escenario, las estimaciones para los últimos 5 años del horizonte de planeación (i.e., 2026-2030) fueron calculados suponiendo las mismas tendencias.

4.3 Resultados

Al proyectar la cantidad ofertada y demandada del recurso hídrico en el municipio de Tapalpa se obtuvo lo siguiente:

(i) Escenario base

Al mantener constante la cantidad ofertada del agua, hasta el año 2030, la cantidad demandada total del recurso hídrico por parte de la población del municipio de Tapalpa no supera a la ofertada. Incluso en el año 2030 –con una población de 17,678 habitantes, que representa un incremento del 6.3% respecto al 2005– la cantidad demandada total solo representa el 57.9% de la cantidad ofertada total disponible (Cuadro 4.2). Lo anterior se puede observar en la Figura 4.2.

(ii) Incremento en la demanda

Suponiendo que la oferta de agua en Tapalpa se mantendrá constante hasta el 2030, ante un incremento acumulado del 40% en los próximos 20 años no se vislumbran problemas de déficit del recurso hídrico (Figura 4.3). Incluso en el año 2030 bajo estos supuestos, la demanda total representa el 81.8% de la oferta total disponible con un consumo de 35.15 millones de m³/año (Cuadro 4.3). Bajo este escenario no se ven problemas deficitarios de la cantidad de agua al menos en los próximos 25 años en el lugar bajo estudio.

(iii) Incremento en la cantidad demandada y decremento en la ofertada

Al mantener los incrementos en la cantidad demandada y ante una disminución en la cantidad ofertada total disponible del 37% en los próximos 20 años, en el año 2020 la disponibilidad de agua en el municipio de Tapalpa sería ya un problema alarmante, debido a que la cantidad demandada total (29.96 millones de m³/año) (Cuadro 4.4) representa el 98.5% de la oferta total disponible (30.40 millones de m³/año) y en el 2021 ya existe un déficit del recurso hídrico del orden de 735.28 miles de m³/año, lo que representa el 2.4% de la cantidad demandada para ese año (30.44 millones de m³/año) (Figura 4.4).

Cuadro 4.2. Proyección de la cantidad demandada y ofertada de agua en el municipio de Tapalpa del 2005-2030, en el escenario base.

AÑO	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
N° de habitantes	16625	16738	16844	16943	17036	17123	17204	17280	17351	17417	17478	17534	17584
Demanda ¹	23.17	23.58	23.73	23.86	24.00	24.12	24.23	24.34	24.44	24.53	24.62	24.70	24.77
Oferta ¹	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96
AÑO	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
N° de habitantes	17629	17668	17702	17729	17749	17763	17771	17773	17769	17757	17737	17711	17678
Demanda ¹	24.83	24.89	24.93	24.97	25.00	25.02	25.03	25.03	25.03	25.01	24.98	24.95	24.90
Oferta ¹	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96

¹ Los valores están dados en millones de m³/año.

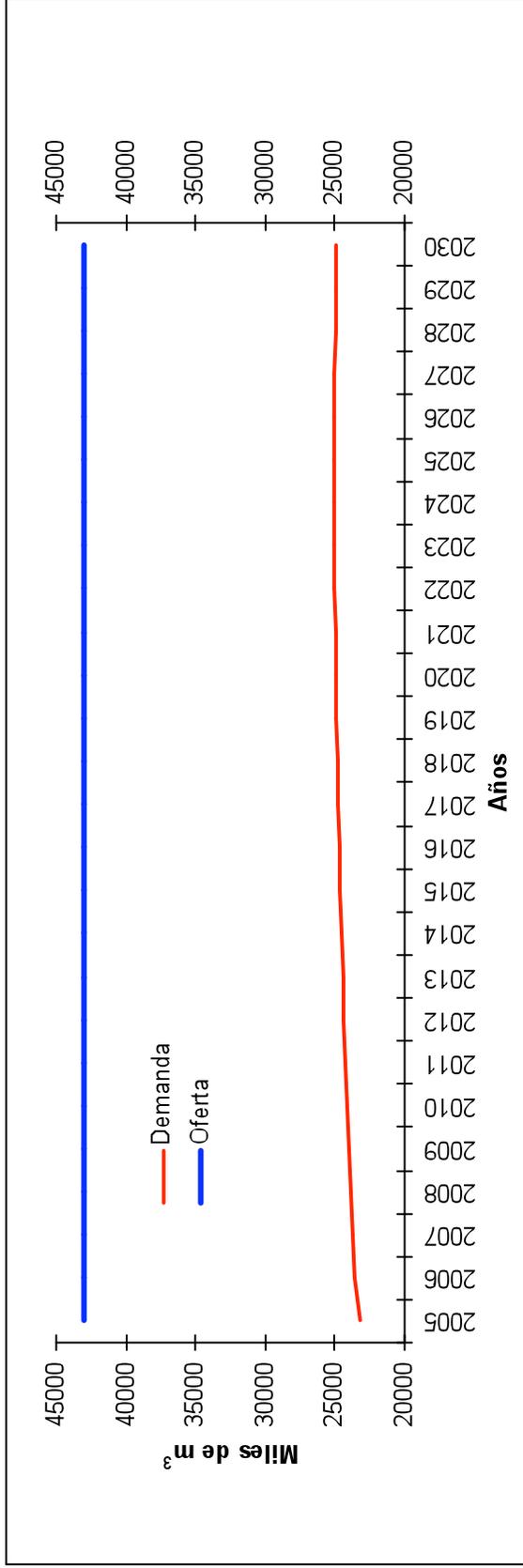


Figura 4.2. Cantidad de agua demandada y ofertada en Tapalpa, Jalisco del 2005-2030, escenario base.

Cuadro 4.3. Proyección de la cantidad demandada y ofertada de agua en el municipio de Tapalpa del 2005-2030, con un incremento en la cantidad demandada del 40% en los primeros 20 años.

AÑO	2005	2006 ²	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
N° de habitantes	16625	16738	16844	16943	17036	17123	17204	17280	17351	17417	17478	17534	17584
Demanda ¹	23.17	23.96	24.34	24.73	25.13	25.54	25.95	26.37	26.79	27.22	27.66	28.10	28.56
Oferta ¹	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96
AÑO	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
N° de habitantes	17629	17668	17702	17729	17749	17763	17771	17773	17769	17757	17737	17711	17678
Demanda ¹	29.02	29.48	29.96	30.44	30.93	31.43	31.94	32.45	32.97	33.50	34.04	34.59	35.15
Oferta ¹	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96

¹ Los valores están dados en millones de m³/año; ² En éste año, el incremento constante del 1.6% en la demanda, no fue aplicado en el valor para el año anterior, sino en la proyección de consumo de agua del 2006 (23.58 millones de m³/año, ver cuadro 4.2).

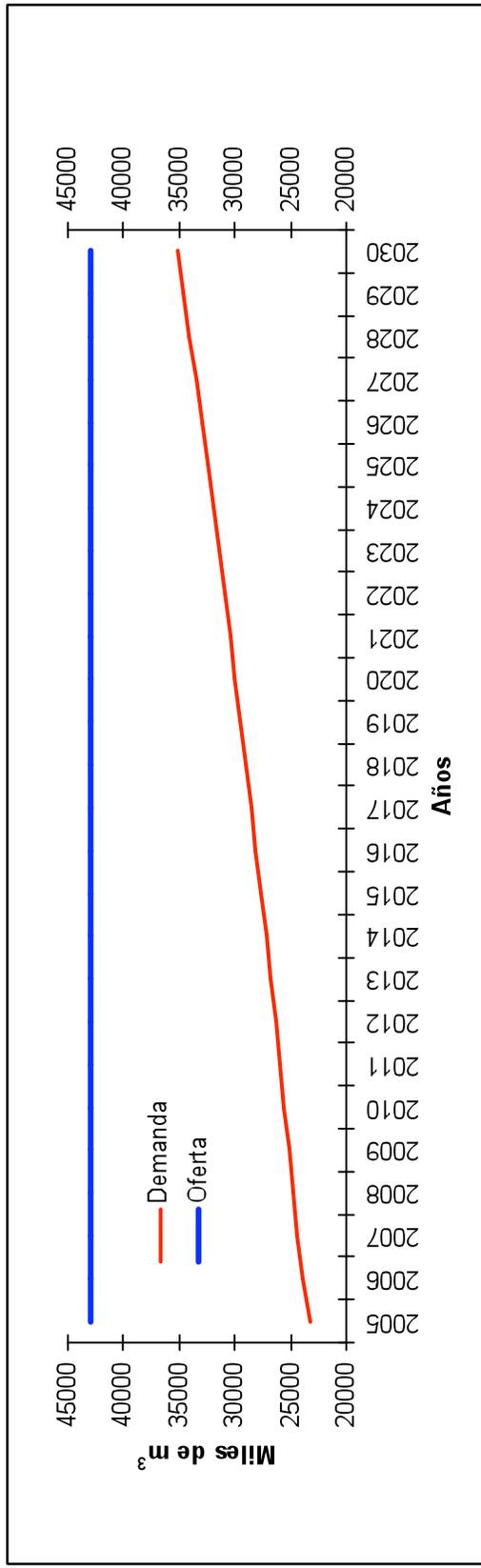


Figura 4.3. Cantidad de agua demandada y ofertada en Tapalpa, Jalisco del 2005-2030, con un incremento en la cantidad demanda del 40% en los primeros 20 años (escenario del incremento en la cantidad demanda).

Cuadro 4.4. Proyección de la cantidad demandada y ofertada de agua en el municipio de Tapalpa del 2005-2030, con un incremento en la cantidad demandada del 40% y un decremento en la ofertada del 37%, ambos en los primeros 20 años.

AÑO	2005	2006 ²	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
N° de habitantes	16625	16738	16844	16943	17036	17123	17204	17280	17351	17417	17478	17534	17584
Demanda ¹	23.17	23.96	24.34	24.73	25.13	25.54	25.95	26.37	26.79	27.22	27.66	28.10	28.56
Oferta ¹	42.96	41.98	41.03	40.09	39.18	38.28	37.41	36.56	35.72	34.91	34.11	33.34	32.58
AÑO	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
N° de habitantes	17629	17668	17702	17729	17749	17763	17771	17773	17769	17757	17737	17711	17678
Demanda ¹	29.02	29.48	29.96	30.44	30.93	31.43	31.94	32.45	32.97	33.50	34.04	34.59	35.15
Oferta ¹	31.83	31.11	30.40	29.71	29.03	28.37	27.72	27.09	26.47	25.87	25.28	24.70	24.14

¹ Los valores están dados en millones de m³/año; ² A partir de éste año, se aplico un decremento del 2.28% en la oferta del año anterior.

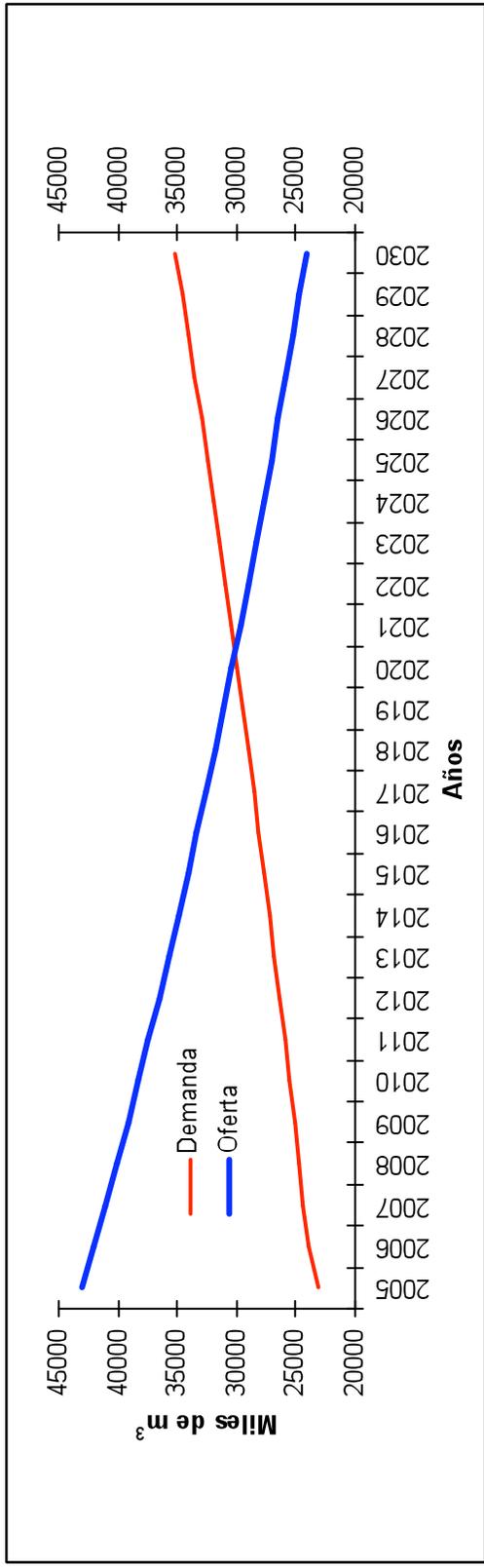


Figura 4.4. Cantidad de agua demandada y ofertada en Tapalpa, Jalisco del 2005-2030, con un incremento en la demanda del 40% y un decremento en la oferta del 37%, ambos en los primeros 20 años (escenario del incremento en la cantidad demandada y decremento en la oferta).

4.4 Discusión y conclusiones

De no tomarse medidas en la racionalización y uso adecuado del agua, en el año 2021 la población de Tapalpa podría enfrentar severos problemas con la disponibilidad de este recurso (la certeza de esta aseveración guarda una relación directa con la veracidad de los supuestos establecidos en la presente investigación). A tal grado que la oferta estimada para el año 2021— dentro de la cuenca, no sería capaz de satisfacer el consumo promedio per cápita estimado, existiendo un déficit del recurso hídrico (735.28 miles de m³/año) que representaría el 2.4% de la demanda para ese año (30.44 millones de m³/año).

Respecto a lo anterior, es importante subrayar que las proyecciones aquí presentadas están basadas en supuestos que rara vez pueden ser totalmente realistas, pero el valor de este tipo de estudios recae en el generar herramientas que permitan a las autoridades con poder para tomar decisiones, el prevenir situaciones que la mayor parte del tiempo no son reversibles en el corto plazo y afectan profundamente los componentes ambientales, económicos y sociales de nuestro entorno. De tal forma que los resultados aquí expresados deben ser tomados con mucha cautela y su utilidad no puede excederse más allá de herramientas parciales de apoyo en la toma de decisiones.

Así, en la población de Tapalpa, es necesario que se tomen acciones para prevenir problemas en la futura disponibilidad de agua. Más aún, el hecho de que Tapalpa sea un destino turístico importante para una de las ciudades más pobladas del país, como lo es Guadalajara, presenta retos adicionales para los tomadores de decisiones y formuladores de políticas relacionadas al recurso hídrico. Se anticipa— de acuerdo a las tendencias de las últimas décadas— un cambio gradual de uso de suelo de agrícola a residencial en el municipio, lo que obedece a una mayor rentabilidad del suelo. Lo anterior implicaría una mayor demanda de agua para uso urbano y una disminución en el uso agrícola, esto por una parte podría indicar una reducción de la cantidad de agua utilizada (se reporta una mayor demanda en el uso

agrícola) pero por otra parte la infiltración de agua se vería comprometida ante un mayor escurrimiento superficial, lo que también redundaría en riesgos de avenidas para la poblaciones de la parte baja de la cuenca. Respecto a esto último, es necesario aclarar que existe la necesidad de un análisis mas a fondo para poder evaluar dichos escenarios.

Por otra parte es necesario acotar que las proyecciones en la presente investigación sólo toman en cuenta la cantidad del recurso hídrico y no la calidad o la distribución. De ésta forma, aunque de acuerdo a los resultados aquí presentados, se está analizando el problema del agua desde el punto de vista de su cantidad, es importante añadir a este análisis el aspecto de la calidad del recurso hídrico, lo cual sin duda exige mayores retos y requiere de una mayor cantidad de herramientas y recursos.

Por lo tanto, es necesario el buscar mecanismos que permitan un nivel de consumo más eficiente del recurso hídrico. Para ello es necesario un cambio sustancial en la cultura del agua; es decir, generar una conciencia ciudadana sobre el manejo del recurso en sus diversos usos. En relación a esto, actualmente en México existe un enfoque conocido como *“la nueva cultura del agua”*, que busca garantizar el acceso al agua como derecho humano e incluye también la necesidad de una gestión de la demanda con un enfoque integral, prevenir la contaminación y mantener la salud de los ecosistemas, impulsar la participación ciudadana proactiva en el manejo del recurso y mantener una racionalidad económica en los usos de negocios privados, que permita la sustentabilidad y la equidad social (FEA, 2006).

4.5 Literatura citada

- Agua-Latina. 2001. Medio mundo sin agua en el 2050. Consultado en línea. Disponible en: <http://www.agua-latina.com/articulos2.html>.
- CCE (Consejo Coordinador Empresarial), 2006. Eficiencia y uso sustentable del agua en México. Participación del Sector Privado. Capítulo 2: Uso y aprovechamiento del agua en México. Centro de Estudios del Sector Privado para el Desarrollo Sustentable/Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción, México. Consultado en Internet. Disponible en: http://www.cce.org.mx/cespedes/publicaciones/otras/Ef_Agua/cap_2.htm
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), 2007. Estadísticas del agua en México. Capítulo 7: Escenarios futuros. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). México. 256 p.
- CONAPO (Consejo Nacional de Población), 2006. Proyecciones de la Población de México 2000-2050 por municipio. Consultado en Internet. Disponible en: <http://www.conapo.gob.mx/00cifras/5.htm>
- Diario Oficial de la Federación. 2001. Plan Nacional de Desarrollo 2001-2006. Presidencia de la República, México. 30 de mayo de 2001.
- Diario Oficial de la Federación. 2003. Reglas de operación para el otorgamiento de pagos del programa de servicios ambientales hidrológicos. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), México. 3 de octubre de 2003.
- Espinoza, N., J. Gatica, y J. Smyle. 1999 El pago de servicios ambientales y el desarrollo sostenible en el medio rural. Unidad Regional de Asistencia Técnica (RUTA). San José, Costa Rica. 88 p.
- FEA (Fondo Educación Ambiental), 2006. El agua en México: Lo que todas y todos debemos saber. Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A.C.. Centro Mexicano de Derecho Ambiental, A.C., Presencia Mexicana Ciudadana, A.C. México. 93 p.
- Flores-Garnica, J. G., J. de D. Benavides-Solorio y D. A. Moreno-González. 2005. Clasificación espectral de coberturas de suelo como soporte en la evaluación de servicios ambientales. *In*: Contribución al estudio de los servicios ambientales. Benavides-Solorio, J. de D. *et al.* (eds). Libro Técnico No. 1. SAGARPA-INIFAP-CIRPAC. Guadalajara, Jalisco. pp. 55-74.
- Gleick P. H., H. Cooley y D. Groves. 2005. California water 2030: An efficient future. Pacific Institute, Oakland 44 p.

INEGI. 2001. XII Censo General de Población y Vivienda, 2000. Resultados Definitivos. Tabulados Básicos. Jalisco. México. Disponible en: www.inegi.gob.mx. (Consulta: octubre de 2006).

López Paniagua, C., M.J. González Guillén, J.R. Valdez Lazalde y H.M. de los Santos Posadas. 2007. Demanda, disponibilidad de pago y costo de oportunidad hídrica en la Cuenca Tapalpa, Jalisco. Madera y Bosques 13(1):3-23.

Maderey, L. E. y R. A. Jiménez. 2006. Los recursos hidrológicos del centro de México ante un cambio climático global. Departamento de Geografía Física del Instituto de Geografía de la UNAM. Disponible en: <http://ccaunam.atmosfcu.unam.mx/cambio/libro/HIDROLO.pdf>

PNUMA (Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente), 2003. Hechos clave sobre el agua. Consultado en Internet. Disponible en: <http://www.rolac.unep.mx/dmma2003/hechos.htm>

OMM (Organización Meteorológica Mundial), 2006. Declaración de Dublín sobre el agua y el desarrollo sostenible. Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente. Consultado en línea. Disponible en: <http://www.wmo.ch/web/homs/documents/espanol/icwedecs.html>

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES GENERALES

En la presente investigación se realizó un estudio de mercado del servicio ambiental hidrológico (SAH) en la cuenca de Tapalpa, Jalisco. La cuenca presenta características deseables para este tipo de estudios, como son: el 44% es de uso forestal, la población dentro de la cuenca presenta una alta explosión demográfica en los últimos años, los usos del recurso hídrico son muy variados y es un área que ha sido utilizada en pasadas investigaciones, lo que permite contar con datos a través del tiempo. Un mercado de servicios ambientales implica la retribución o compensación monetaria por parte de los beneficiarios del SAH a los dueños de los ecosistemas que provén dichos servicios. Así, al realizar un estudio de mercado del SAH, es necesario cuantificar las cantidades ofertadas (balance hidrológico) y demandas del recurso hídrico

En el capítulo II se describe cómo fue estimado el balance hidrológico en la cuenca de Tapalpa, Jalisco. Se utilizó el modelo hidrológico SWAT, con el cual se obtuvo un buen ajuste ($R^2 = 0.85$) en la producción de agua. El modelo fue primeramente calibrado en la parte alta de una de las cinco subcuencas que integran a la cuenca, para luego ser utilizado en el resto de las 21,000 ha que componen el área de estudio.

Se encontró que las subcuencas presentan un buen estado hidrológico. Así lo indica la presencia de infiltración del agua al suelo a través del escurrimiento subsuperficial, la existencia de escurrimiento superficial y la poca producción de sedimentos. Igualmente fue notorio que aquellas subcuencas con mayor superficie agrícola o pecuaria presentaran mayor escurrimiento superficial y mayor producción de sedimentos; mientras que la evapotranspiración fue más elevada en las subcuencas forestales. La oferta total del recurso hídrico asciende a 42,963,900 m³/año.

En esta parte del estudio fue importante contar con datos climáticos que permitieran la implementación del modelo SWAT, ya que diversos estudios han sido realizados en esta misma área (Benavides-Solorio, 1998; Benavides-Solorio *et al.*, 2005a, Benavides-Solorio *et al.*, 2005b).

En el capítulo III se detalla la estimación de la demanda del recurso hídrico, así como la cuantificación de su disponibilidad a pagar (DAP) por parte de los beneficiarios. Estos datos fueron utilizados para indagar sobre el costo de oportunidad del suelo para “producción de agua”.

En esta parte del estudio se utilizó el método de valoración contingente (MVC), ya que éste ha sido previamente usado con éxito para estimar el valor de bienes o servicios que no cuentan con un precio *per se* en el mercado.

De esta forma se determinó que la demanda del recurso hídrico asciende a 23,171,885 m³/año, de los cuales la mayor parte (93%) es utilizado en el sector agrícola (hortalizas y cultivos básicos mayormente).

En cuanto a la DAP, se encontró que ésta es mayor en el sector servicios (con 76.7% de respuestas afirmativas), aunque la mayor participación monetaria declarada fue por parte del sector doméstico (46.5% del total). Por otra parte, se encontró que existe una relación directa entre los años de escolaridad y la DAP por el recurso hídrico, en tanto que la edad presenta una relación inversa.

Finalmente, al comparar el valor estimado de la DAP total con el costo de oportunidad para la conservación de la superficie boscosa en la cuenca, se descubrió que éste solo cubre el 10% de dicho costo de oportunidad. Al agregar el costo para la recuperación de la superficie forestal (con un uso de suelo diferente al momento de la realización del estudio), la DAP sólo cubrió el 6% del costo de oportunidad total.

Los resultados en este capítulo ponen de manifiesto algunos aspectos importantes, como son: es necesario elevar el nivel de escolaridad en la población, de otra forma es muy difícil el crear conciencia sobre los problemas del SAH. También es de carácter urgente la aplicación de mecanismos que permitan la protección de la superficie boscosa en el corto plazo, no dejando de lado la recuperación de los terrenos forestales en el largo plazo.

Durante esta etapa de la investigación se descubrió que una gran cantidad de usuarios del SAH no perciben algún tipo de relación entre la parte alta de la cuenca y la cantidad y calidad de agua que reciben, lo cual realza la importancia de la necesidad de educar y sensibilizar a la población en materia de educación ambiental.

De esta forma, el funcionamiento exitoso de un mercado de SAH en Tapalpa, está en función de la concientización de los pobladores de la cuenca ante los recursos hídricos y lo que es más importante, la relación de estos con la parte alta de la cuenca. De acuerdo a los resultados de la presente investigación, se concluye que la implementación de un mercado de SAH en la cuenca de Tapalpa es posible aunque para asegurar su éxito en el mediano y largo plazo es necesaria la cuidadosa planificación de las siguientes etapas⁹ (ii) *Instalación del marco institucional del proyecto*; (iii) *Implementación del plan de manejo y el mecanismo del PSAH*; y (iv) *Seguimiento y certificación de los bienes y SAH*. Se sugiere que una parte importante de los fondos del PSAH sea destinada a promover la educación en materia de SAH, lo que redundaría en el mediano plazo a elevar la DAP por parte de los beneficiarios y con ello pasar de un programa de subsidios a un esquema de pagos autosostenible local o regionalmente en el cual el Gobierno Federal puede fungir como administrador.

Por otra parte, debido al gran desarrollo turístico que Tapalpa presenta, y ha tenido en los últimos años, es necesaria una adecuada planificación en el crecimiento

⁹ La primera etapa la constituye el *diseño del proyecto*, la cual incluye los diversos estudios físicos y sociales necesarios para la determinación de los componentes de un mercado de SAH.

urbano, de no ser así, se puede esperar en las siguientes décadas, problemas graves con el abastecimiento del agua y con la calidad de la misma.

Esta inquietud derivó en la parte final de la presente investigación, en la cual como se detalla en el capítulo IV, se realizaron proyecciones sobre la cantidad demandada y la ofertada del SAH en la cuenca de Tapalpa. El objetivo de esta etapa fue el determinar el momento en el cual la oferta de agua será incapaz de satisfacer la demanda por parte de los pobladores de la cuenca. Obviamente que un estudio de esta naturaleza presenta diversos desafíos, entre los cuales se encuentra el contar con información realista que permita proyectar con cierta confiabilidad las variables de importancia. Por lo anterior, es crucial la definición y selección de los supuestos a utilizar.

Una de las ventajas en esta clase de estudios es la posibilidad de crear escenarios con la manipulación de variables, así es posible el simular un aumento poblacional, la disminución de la cantidad de agua ofertada o el aumento de la cantidad demandada o alguna combinación de las mismas.

Para conocer el comportamiento futuro en la relación entre la demanda y oferta del recurso hídrico en Tapalpa, se utilizó un horizonte temporal 2005-2030, en el cual se proyectó la oferta y demanda del SAH con base en el consumo de agua actual estimado por sector -por medio del MVC, capítulo III-, simulando tres escenarios: (i) escenario base (la oferta y demanda de agua se mantuvieron constantes), (ii) incremento en la cantidad demandada e (iii) incremento en la cantidad demanda y decremento en la ofertada.

En el escenario base se determinó que manteniendo constante la cantidad ofertada de agua, hasta el año 2030, la cantidad demandada del SAH en la población de Tapalpa no superaría la ofertada, ya que incluso en el año 2030, ésta representa solo el 57.9% de la oferta total disponible. Al incrementar la demandada en un 40% (en los primeros 20 años) y manteniendo igualmente constante la ofertada (primer

escenario) tampoco se vislumbran problemas de déficit en el SAH. La cantidad demandada proyectada para el año 2030, representa el 81.8% de la ofertada total disponible.

Al mantener los incrementos en la cantidad demandada y ante una disminución en la cantidad ofertada total disponible del 37%, se encontró que en el año 2020 la disponibilidad de agua en el municipio de Tapalpa podría presentar ciertos problemas, ya que la demanda total (29.96 millones de m³/año) representaría el 98.5% de la oferta total disponible (30.40 millones de m³/año) y en el 2021 ya existiría un déficit del recurso hídrico del orden de 735.28 miles de m³/año, lo que representaría el 2.4% de la demanda para ese año.(30.44 millones de m³/año).

Aunque los resultados en las proyecciones de oferta y demanda hídrica están basados en supuestos, por lo que deben ser tomados con mucha cautela, es un hecho que la población de Tapalpa, de seguir la tendencia de una urbanización acelerada y sin una adecuada planificación, en el largo plazo, corre el riesgo de enfrentar graves problemas con el abasto de agua.

5.1 Limitaciones y recomendaciones

La investigación realizada representa una contribución al análisis de la factibilidad en la creación de un mercado del recurso ambiental hídrico en la región bajo estudio, por lo que los métodos y técnicas aquí empleados pueden ser aplicados en cualquier otra región del país o del exterior. Sin embargo, se debe tener mucho cuidado al tratar de extrapolar los resultados aquí presentados a otros lugares o regiones del país. Los resultados de estudio provienen de estudios físicos muy específicos en la zona de estudio. El estudio social presenta algunas características que pueden o no ser diferentes a otras regiones, como son la acelerada urbanización y el carácter turístico de la cuenca Tapalpa.

Por otra parte, es importante recalcar que en la presente investigación se indagó sobre la oferta y demanda del recurso hídrico, tomando en cuenta la cantidad del mismo y no así su calidad. Este es un aspecto importante y factor decisivo para el bienestar social.

Se sugiere realizar trabajos similares en cuencas con diferentes características, esto aportaría información sobre la posible creación de un mercado de servicios ambientales hidrológicos en diferentes condiciones económicas, ambientales y sociales a las encontradas en la cuenca de Tapalpa. Principalmente se debe tener especial cuidado al comparar los resultados referentes a la DAP por el recurso hídrico, pues ésta se encuentra en función de una variedad de factores que pueden o no diferir en distintas regiones del país.

Como se indica en el capítulo III, en la presente investigación se encontró que la DAP tiene relación directa con la escolaridad, por lo cual es de esperarse diferentes valores en la DAP en una cuenca urbana, así como las condiciones en el uso del suelo serán totalmente distintas y por consiguientes el balance hidrológico. Con relación a esto hay que recalcar que la cuenca de Tapalpa presenta 44% de superficie forestal.

Finalmente, se sugiere elevar el nivel de apreciación de los SAH y su relación con el recurso hídrico entre los pobladores de Tapalpa. Lo cual es un punto clave en el funcionamiento de un mercado de SAH.

La siguiente etapa en la creación del mercado, constituye la definición e instalación del marco institucional del proyecto, que implica la negociación entre demandantes (usuarios –diversos tipos) y oferentes (dueños de los predios forestales), así como el diseño de los mecanismos de captación de los fondos y su legislación (a nivel municipal, regional y federal). Sin embargo, es importante que en conjunto con estas acciones, el organismo encargado del seguimiento y control del PSAH (fideicomiso) en conjunto con las autoridades gubernamentales busquen la forma de elevar la DAP de los beneficiarios del SAH, lo anterior sería posible a través de campañas de educación ambiental dirigidas a los diferentes sectores productivos (diferentes usos del agua), así como ampliar la información en estos temas en los distintos niveles educativos. Es un hecho que de no cambiar el punto de vista que se tiene sobre el valor del agua (cantidad y calidad), el mecanismo de mercado de SAH es un enfoque que no madurará en nuestro país, y es que la DAP de los beneficiarios es un punto medular sobre el que se sostiene la lógica del pago por SAH.