



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

**CENTRO DE INVESTIGACIONES EN
ECOSISTEMAS**

**PRIORIDADES DE RESTAURACIÓN PARA
LA RECUPERACIÓN DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS
ASOCIADOS A LOS ASPECTOS HIDROLÓGICOS
DE LA CUENCA DEL RÍO CUITZMALA,
EN EL PACÍFICO MEXICANO**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
(BIOLOGÍA AMBIENTAL)**

P R E S E N T A:

ADRIANA SALDAÑA ESPEJEL

DIRECTOR DE TESIS: DR. JOSÉ MANUEL MAASS MORENO

México, D.F.

Febrero, 2008



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

**CENTRO DE INVESTIGACIONES EN
ECOSISTEMAS**

**PRIORIDADES DE RESTAURACIÓN PARA
LA RECUPERACIÓN DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS
ASOCIADOS A LOS ASPECTOS HIDROLÓGICOS
DE LA CUENCA DEL RÍO CUITZMALA,
EN EL PACÍFICO MEXICANO**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
(BIOLOGÍA AMBIENTAL)**

P R E S E N T A:

ADRIANA SALDAÑA ESPEJEL

DIRECTOR DE TESIS: DR. JOSÉ MANUEL MAASS MORENO

Morelia, Mich. Febrero, 2008

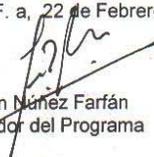
Dr. Isidro Ávila Martínez
Director General de Administración Escolar, UNAM
Presente

Me permito informar a usted que en la reunión ordinaria del Comité Académico del Posgrado en Ciencias Biológicas, celebrada el día 26 de Noviembre de 2007, se aprobó el siguiente jurado para el examen de grado de **MAESTRÍA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS (BIOLOGÍA AMBIENTAL)** de la alumna **SALDAÑA ESPEJEL ADRIANA** con número de cuenta **86372677** con la tesis titulada **"Prioridades de restauración para la recuperación de servicios ecosistémicos asociados a los aspectos hidrológicos de la Cuenca del Río Cuitzmala en el Pacífico mexicano."**, realizada bajo la dirección del **DR. JOSE MANUEL MAASS MORENO**.

Presidente: DRA. MARISA MAZARI HIRIART
Vocal: DRA. HELENA COTLER AVALOS
Secretario: DRA. ALICIA CASTILLO ALVAREZ
Suplente: DRA. LUCIA ALMEIDA LEÑERO
Suplente: M. EN C. MA. JULIA CARABIAS LILLO

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, D.F. a, 22 de Febrero de 2008.



Dr. Juan Núñez Farfán
Coordinador del Programa

c.c.p. Expediente de la interesada.

Edif. de Posgrado P. B. (Costado Sur de la Torre II de Humanidades) Ciudad Universitaria C.P. 04510 México, D.F.
Tel. 5623-0173 Fax: 5623-0172 <http://pcbiol.posgrado.unam.mx>

AGRADECIMIENTOS

Al Posgrado en Ciencias Biológicas de la UNAM, que junto con el Centro de Investigaciones en Ecosistemas y la Dirección General de Estudios de Posgrado apoyaron y promovieron mis estudios de Maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología del cual fui becaria (#181817). Agradezco también al proyecto PAPIIT-DGAPA IN222703 (UNAM) y la Fundación Packard, los cuales proveyeron los recursos necesarios para llevar a cabo mis estudios de maestría con orientación en Restauración Ecológica y desarrollar esta investigación.

De manera especial al Dr. Manuel Maass por haberme concedido el privilegio de ser su alumna, por su sentido visionario de la ciencia, su guía y calidad humana.

A las integrantes de mi comité tutorial las Dras. Alicia Castillo y Helena Cotler, así como a las Dras. Patricia Balvanera y Lucía Almeida, por su asesoría y confianza, y cuyas contribuciones fueron tan relevantes para el desarrollo de esta tesis, pero de manera especial por todo lo que me enseñaron como personas.

A la maestría en Restauración Ambiental y a su coordinadora la Maestra Julia Carabias, gracias sinceras por esta oportunidad de desarrollo.

Al juicio experto o comentarios de los doctores Manuel Maass, Marisa Mazari, Alicia Castillo, Helena Cotler, Patricia Balvanera, Angelina Martínez Yrizar, Catherine Mathuriau, Álvaro Miranda, Gerardo Bocco, Patricia Ávila, Ana Burgos, Felipe García-Oliva, y del M. en G. Jesús Fuentes.

A la Biól. Georgina García por su solidaridad, consejo oportuno y paciencia.

A Luz María Aranda, Lilia Espinosa y a la Lic. Yolanda Morales, por todo el apoyo que tuvieron a bien brindarme y que fue indispensable para que pudiera concluir esta etapa de mi formación.

A los Técnicos del proyecto, Raúl Ahedo, Salvador Araiza, y Abel Verduzco, por su apoyo invaluable en campo y gabinete. A los ingenieros Heberto Ferreira y Alberto Valencia por el sentido de excelencia que caracteriza a su trabajo y persona.

Al M. en G. Jesús Fuentes Junco por su ilimitada generosidad al compartir su conocimiento acerca del análisis espacial, así como su paciencia para instruirme acerca del manejo de los SIGs.

A Pablo Piña, Sergio Martínez y Sergio Solórzano, por su amistad y su generosidad al compartir información acerca de la cuenca que fue fundamental para mi trabajo.

A mis amigos Margarita, Pacho, Yesi, Irene, Anna, Carmen, Lucy, Oscar, Susana, Ale Corzo, Cinthya, Alfredo, Gaby, Adriana Carolina, Pavka, Toño, Adriana Raquel, Lupita, Tere, Noé, Fernando, Faby, Chalino, Luzma, Diana, Luza, Rigo, Irving, Valdemar, Itzel y Edgar, por compartir tantas cosas, la maestría no hubiera sido la misma sin ustedes.

A mi mamá por su entereza y confianza en la vida, por ser mi mejor ejemplo de estudio y trabajo. A mi papá, por el cariño y fortaleza que lo caracterizan, gracias a los cuales sigue con nosotros. A mi hermano por su afecto y solidaridad.

A mi familia “restaurada”, con amor, siempre.

Esta tesis está dedicada in memoriam del Dr. Juan Manuel Chávez Cortés†, de quien tuve el honor de ser alumna durante la licenciatura y cuyas clases despertaron mi interés por los métodos de evaluación multicriterio.

Índice general

	Página
Agradecimientos	v
Dedicatoria	viii
Índice general	ix
Índice de cuadros y figuras	x
Resumen	xii
Abstract	xiii
Capítulo I:	1
I.I.- Introducción general	1
I.II.-Objetivos	4
I.III.- Estructura de este trabajo	6
I.IV.- Conceptos clave	7
I.V.- Características generales del sitio de estudio.	12
V. Bibliografía citada	14
Capítulo II: Provisión del servicio ecosistémico de infiltración y prioridades de restauración ecológica en la cuenca del Río Cuitzmala.	18
Resumen	18
II.I.- Introducción	18
II.II.-Sitio de estudio	23
II.III.-Materiales y métodos	26
II.IV.- Resultados	33
II.V.- Discusión	40
II.VI.-Conclusiones y recomendaciones	44
II.VII.- Bibliografía citada	46
Capítulo III: Provisión del servicio ecosistémico de control de la erosión hídrica y prioridades de restauración en la cuenca del Río Cuitzmala, México.	50
Resumen	50
III.I.- Introducción	50
III.II.-Sitio de estudio	55
III.III.-Materiales y métodos	57
III.IV.- Resultados	65
III.V.- Discusión	74
III.VI.-Conclusiones y recomendaciones	77
III.VII.- Bibliografía citada	80
Capítulo IV: Conflictos asociados al servicio ecosistémico de suministro de agua dulce en la cuenca del río Cuitzmala, México.	84
Resumen	84
IV.I.- Introducción	84
IV.II.-Sitio de estudio	90
IV.III.-Materiales y métodos	95
IV.IV.- Resultados	102
IV.V.- Discusión	115
IV.VI.-Conclusiones y recomendaciones	122
IV.VII.- Bibliografía citada	124

Índice de cuadros y figuras

Cuadros

	Página
Cuadro II.1. Unidades hidrogeológicas de la cuenca del Río Cuitzmala.	25
Cuadro II.2. Descripción de unidades ambientales, en cuanto a su capacidad para favorecer los servicios ecosistémicos de infiltración y de infiltración profunda.	37
Cuadro III.1. Descripción de unidades ambientales de en cuanto a su capacidad para favorecer el servicio ecosistémico de regulación de la erosión hídrica.	66
Cuadro III.2. Susceptibilidad a la erosión o erosión potencial, se presentan los valores promedio por subcuenca y unidad ambiental.	70
Cuadro III.3. Descripción de unidades ambientales que requieren de restauración.	73
Cuadro IV.1. Características relevantes del sitio de estudio en base a las subcuencas.	93
Cuadro IV.2. Cifras relevantes acerca del agua disponible en la cuenca, la demanda para uso doméstico, el origen del agua que se consume y conflictos asociados.	106
Cuadro IV.3. Unidades ambientales en las que se presentan niveles de conflictos muy altos y altos para cada subcuenca.	111
ANEXO V. Leyenda del Mapa Morfo-Edafológico (Martínez, 2007).	132
Anexo VIIa. Guía de entrevista para la consulta a expertos para definir los servicios ecosistémicos de corte hidrológico de la cuenca del río Cuitzmala.	138
Anexo VIIb. Especialistas que fueron consultados para la realización de este trabajo	141
Anexo VIII. Valores y clases de los tipos de suelo en cuanto a permeabilidad, profundidad y erodabilidad.	142
Anexo IX. Datos de balance de balance hídrico anual por subcuenca calculado por Piña (2006) para la cuenca del río Cuitzmala.	143
Anexo X. Estimación relativa de la eficiencia de cobertura por tipo de vegetación para la cuenca del río Cuitzmala.	144
Anexo XI. Clases de pendiente existentes para la cuenca del río Cuitzmala.	145
Anexo XII. Permeabilidad relativa para los tipos de roca de la cuenca del río Cuitzmala.	146
Anexo XIV. Valores de erosividad calculados para cada subcuenca mediante el Índice Modificado de Fournier.	148

Figuras

	Página
Figura II.1. Resumen del proceso metodológico.	27
Figura II.2. Esquema de decisión multicriterio para la estimación del SE de infiltración.	28
Figura II.3. Esquema de decisión multicriterio para la estimación del SE de infiltración profunda.	29
Figura II.4. Algoritmo empleado por la metodología de AMCE Sumatoria Lineal Ponderada.	30
Figura II.5. Esquema de decisión multicriterio para estimar las necesidades de restauración.	32
Figura II.6. Mapa 1. Estimación del servicio de infiltración en la cuenca del río Cuitzmala.	34
Figura II.7. Mapa 2. Estimación del servicio de infiltración profunda en la cuenca del río Cuitzmala.	36
Figura II.8. Mapa 3. Propuesta de prioridades de restauración de las condiciones	39

que favorecen el SE de infiltración.	
Figura III.1. Esquema del proceso metodológico empleado.	57
Figura III.2. Algoritmo correspondiente al Índice Modificado de Fournier.	59
Figura III.3. Esquema de decisión multicriterio para estimar la provisión del SE. de regulación de la erosión hídrica.	61
Figura III.4. Algoritmo empleado por la metodología de AMCE Sumatoria Lineal Ponderada.	62
Figura III.5. Esquema de decisión multicriterio para la determinación de las áreas que requieren restauración ecológica.	64
Figura III.6. Mapa acerca de la provisión del SE de regulación de la erosión hídrica.	68
Figura. III.7. Mapa que muestra la susceptibilidad a la erosión o erosión potencial.	69
Figura III.8. Mapa que indica las prioridades de restauración relacionadas con el SE de regulación de la erosión hídrica.	72
Figura IV.1. Mapa de poblaciones de la cuenca.	94
Figura IV.3. Esquema de decisión multicriterio para evaluar la contraprestación entre la cantidad de agua disponible y las demandas humanas de agua para uso doméstico.	101
Figura IV.4. Esquema de decisión multicriterio para evaluar la contraprestación entre la cantidad de agua disponible y las demandas humanas de agua para agropecuario.	101
Figura IV.5. Esquema de decisión multicriterio para evaluar la contraprestación entre distintos objetivos de manejo (zonas antropizadas y zonas propuestas para la restauración en cada subcuenca).	101
Figura IV.6. Mapa Relación cobertura antrópica-cobertura natural.	103
Figura IV.7. Mapa que presenta la suma de las áreas propuestas para la restauración de las condiciones que mantienen los SEs de infiltración (superficial y profunda) y de regulación de la erosión hídrica.	104
Figura IV.8. Contraprestación y nivel de conflicto entre el agua disponible y la demanda de agua para uso doméstico.	108
Figura IV.9. Contraprestación y nivel de conflicto entre el agua disponible y la demanda de agua para agropecuario.	109
Figura IV.10. Contraprestación y nivel de conflicto entre objetivos de manejo (restauración y actividades productivas agropecuarias).	110
Figura IV.11. Mapa que muestra el porcentaje de la población total que depende del agua subterránea (manantial o pozo) en la cuenca.	113
Figura IV.12. Esquema general de las relaciones en los SEs, contraprestaciones y los impulsores de cambio observados en la cuenca.	114
Anexo I. Mapa edafológico.	128
Anexo II. Mapa geológico.	129
Anexo III. Mapa de vegetación y usos del suelo.	130
Anexo IV. Mapa Morfo-Edafológico (Martínez, 2007).	131
ANEXO VI. Mapa de unidades de respuesta hidrológica en la cuenca del río Cuitzmala (Piña, 2006).	137
Anexo XIII. Ejemplo de matriz de evaluación multicriterio.	147
Anexo XV. Mapa acerca del factor de la pendiente (LS).	148

Saldaña, A. 2008. **Prioridades de restauración para la recuperación de servicios ecosistémicos asociados a los aspectos hidrológicos de la cuenca del río Cuitzmala, en el Pacífico mexicano.** Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigaciones en Ecosistemas, Universidad Nacional Autónoma de México. 150 pp.

RESUMEN

Durante más de 20 años, la UNAM ha venido desarrollando un proceso de investigación ecológica de largo plazo en la región Chamela en la Costa de Jalisco. En ese contexto, Maass y colaboradores (2005) señalaron la relevancia de valorar y definir espacialmente la provisión de servicios ecosistémicos (SEs) a nivel regional, con la intención de generar información que pueda apoyar la toma de decisiones acerca del manejo y la restauración. De acuerdo a esta idea y considerando a la cuenca del Río Cuitzmala como estudio de caso, el objetivo general del presente trabajo fue realizar una prospección general sobre la capacidad de distintas unidades ambientales para brindar servicios ecosistémicos de corte hidrológico (infiltración, regulación de la erosión hídrica y suministro de agua dulce) a fin de identificar las áreas que tienen una mayor prioridad para las acciones de restauración ecológica (en su modalidad de rehabilitación), así como los conflictos asociados al uso del agua. Para ello se utilizaron las metodologías de juicio experto y análisis multicriterio espacial, así como operaciones de álgebra de mapas.

Se determinaron los criterios para evaluar los SEs de la Cuenca del río Cuitzmala. Para el caso del SE de infiltración, se consideró a la permeabilidad de la roca y el suelo, la precipitación y evapotranspiración anuales, la cobertura y la pendiente del terreno; para el SE de regulación de la erosión hídrica, se tomaron en cuenta cuatro de los factores de la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE), erosividad, erodabilidad, cobertura, longitud y gradiente de la pendiente; para el SE de suministro de agua dulce, la cantidad de agua dulce disponible fue determinada a partir de la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración anuales, multiplicada por el área de cada subcuenca. Asimismo, la priorización de las áreas que requieren restauración asociadas al SE de infiltración utilizaron como criterios: el grado de deterioro de la cobertura vegetal, la erodabilidad del suelo y la profundidad para cada tipo de suelo en la cuenca. La priorización de las áreas para la restauración asociadas al SE de regulación de la erosión hídrica, tomaron en cuenta como criterios a la provisión del SE: la diferencia entre la precipitación y evapotranspiración anuales, el grado de deterioro de la cobertura vegetal y factores como la erodabilidad, el factor de la pendiente (Ls) y la erosividad. Para identificar las contraprestaciones ("trade offs") entre el SE de suministro de agua dulce y las demandas por parte la población humana, se consideraron criterios como la demanda de agua para uso doméstico, el área dedicada a actividades agrícolas y el número de usuarios del agua subterránea.

Las unidades ambientales que tienen los valores relativos más altos en su capacidad para brindar el SE de infiltración (a nivel superficial-subsuperficial) ocupan en conjunto aproximadamente el 40 % del área de la cuenca, mientras que para el caso de la infiltración profunda las unidades con mayor capacidad para proveerlo tan sólo ocupan el 4.6% del área de estudio. Las unidades ambientales con mayor prioridad de restauración relacionadas con el SE de infiltración ocupan alrededor del 37% del área de la cuenca y se ubican en la parte más septentrional de la misma. El 18% del área de la cuenca provee en mayor medida el SE de regulación de la erosión hídrica, en especial la parte baja que es la más conservada y en donde el tipo de vegetación que predomina es la selva baja caducifolia, para este SE el 21% de la cuenca requiere acciones de restauración y en el caso de la parte alta algunas de esas zonas coinciden con áreas importantes para la provisión del SE de infiltración. La provisión del SE de suministro de agua dulce se concentra en la parte alta de la cuenca, mientras que la demanda es mayor en la parte baja. El 38% de la cuenca presenta un nivel de conflicto alto entre dos objetivos de manejo distintos, ya que por un lado se cuenta el área que requiere acciones de restauración para mantener tanto el SE de infiltración (superficial y subterránea) como el de regulación de la erosión hídrica, y por otro se tiene una amplia extensión dedicada a las actividades agropecuarias. El consumo de agua subterránea en la parte baja de la cuenca determina una contraprestación que compromete el abasto futuro de agua dulce.

ABSTRACT

Over more than 20 years, the Universidad Nacional Autónoma de México has been developing a long-term process of ecological research at a region called Chamela located in the coast of the Mexican state of Jalisco. It is in this sense that Maass and his team (2005) pointed out the importance of evaluating and defining spatially the supply of ecosystem services (ES's) at a regional level, in order to generate useful information to make decisions about management and restoration. According to this idea and considering the Cutzamala river basin as a case study, the main purpose of this work was to carry out a general prospecting about the ability of different environmental unities to offer ecosystem services of a hydrological nature (infiltration, hydric erosion regulation and fresh water supply) in order to identify areas having a higher priority for ecological restoration actions (in their rehabilitation modality), as well as all the problems linked to the use of water. To achieve this objective, the methodology of expert choice and an spatial multicriteria analysis were used as well as map algebra operations.

The criteria for the evaluation of the ES's of the Cutzamala river basin were then determined. In the case of the infiltration ES, factors like the permeability of soil and rock material, the mean annual precipitation and evapotranspiration, the vegetation cover and the slope of the terrain were taken into account. As for the regulation of hydric erosion ES case, four factors of the Universal Soil Loss Equation (USLE) were considered: rain erosivity, soil erodability, vegetation cover, length and slope angle and for the fresh water supply ES case, the amount of fresh water available was established from the difference between the mean annual precipitation and the mean annual evapotranspiration, multiplied by the area of each secondary basin. Likewise, for those areas chosen as priority cases for restoration linked to the infiltration ES, the criteria followed were the degree of deterioration of the vegetation cover, the erodability of the soil and the depth of each kind of soil in the basin. Also, for the areas chosen as priority cases for restoration linked to the regulation of hydric erosion ES, the criteria considered the ES supply, the difference between the mean annual precipitation and the mean annual evapotranspiration, the degree of deterioration of the vegetation cover and factors like soil erodability, slope (Ls) and rain erosivity. On the other hand, the criteria used in order to identify the trade-offs between the fresh water supply ES and the requirements of the human population were the demand of water for household use, the area designated for agricultural activities and the number of users of the underground water.

The environmental unities having higher relative values in their capacity to offer the infiltration ES (on a superficial-subsuperficial level) occupy together near 40% of the area of the basin, whereas in the case of deep infiltration the unities with a higher capacity to supply it occupy only 4.6% of the area of study. The environmental unities with higher priority of restoration related to the infiltration ES, take up to 37% approximately of the area of the basin and are located in its most northern part. 18% of the same area provides largely for the regulation of hydric erosion ES, notably the lower part which is better preserved and where the predominating kind of vegetation is that of the tropical dry forest. For this ES, 21% of the basin requires restoration actions and in the case of the higher part some of those zones meet with important areas for the supply of the infiltration ES. The provision of the fresh water supply ES concentrates in the higher part of the basin, whereas the demand is greater in the lower one. 38% of the basin shows a high level of conflict between two different management objectives, since, on the one hand, although the area requiring restoration actions to maintain both the infiltration ES (superficial and underground) and the regulation of hydric erosion ES is considered, on the other, there is a great area devoted to agricultural activities. The consumption of underground water in the lower part of the basin, sets a trade off which jeopardizes the fresh water supply in the future.

Capítulo I

I.1.- Introducción general

El agua es uno de los recursos naturales más estratégicos para el bienestar humano, dada su importancia para promover la salud, la seguridad alimentaria y en general la calidad de vida (Varis, 2006). Sin embargo, las presiones sobre los recursos hidrológicos se han agudizado debido a que el crecimiento demográfico y los modelos de desarrollo económico predominantes (Perló, 2006) promueven entre la población una amplia gama de necesidades, cuya satisfacción ha favorecido esquemas de manejo de ecosistemas y de sus recursos poco sustentables. Lo que, para el caso de los recursos hidrológicos, ha provocado escasez, contaminación e incluso puesto en riesgo su disponibilidad para la población (Vörösmarty et al., 2005). Una estrategia para favorecer la conservación y mejorar el manejo de los ecosistemas consiste en promover el reconocimiento de la utilidad que éstos tienen para el bienestar humano. El concepto de servicio ecosistémico retoma esta idea al referirse a los beneficios que los ecosistemas generan y que son aprovechados por las personas (Daily, 1997; M.A., 2003). Entre los servicios ecosistémicos que se encuentran asociados al ciclo hidrológico pueden citarse, entre otros, a la regulación de la calidad y cantidad de agua, la regulación de la erosión hídrica y el suministro de agua dulce para distintos usos (M.A., 2003).

En México, la presión por los recursos hídricos es cada vez mayor, a tal grado que en las últimas tres décadas el escenario acerca del uso del agua cambió, pues de ser considerado como un factor que favorecía el desarrollo, pasó a ser un recurso que lo limita (Landa y Carabias, 2007). En Jalisco, los recursos hídricos presentan diversos conflictos, por un lado, el estado se ubica en una de las regiones hidrológicas del país con menor disponibilidad de agua dulce por persona al año, en la que además se registra una de las mayores tasas de sobreexplotación de los acuíferos (más del 20%) y cuyos cuerpos superficiales de agua presentan un porcentaje alto de contaminación (Ávila, 2007).

Dentro de ese contexto, la UNAM ha realizado en la costa de Jalisco investigación de largo plazo acerca de la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas naturales y transformados, así como de la dimensión social que implica su manejo. En esa área se ubica la cuenca del río Cuitzmala, donde el agua es un recurso prioritario, ya que escasea en la época de secas, y en la de lluvias provoca inundaciones, ambas circunstancias limitan la satisfacción de las necesidades básicas de la población y la realización de actividades productivas.

Dado que el conocimiento acerca de las características puntuales de la cuenca es aún incipiente, el presente trabajo utilizó la información existente a nivel regional, así como, las metodologías de juicio experto y análisis multicriterio espacial, para el estudio de la provisión de servicios ecosistémicos hidrológicos en la cuenca del río Cuitzmala, con el propósito de generar información, que si bien presenta un amplio grado de incertidumbre, pueda contribuir al proceso de manejo adaptativo e

investigación de largo plazo que desarrolla la UNAM en la región, a fin de apoyar la toma de decisiones acerca del manejo y la restauración de la cuenca.

I.II.-Objetivos

En el marco de la investigación de largo plazo sobre el funcionamiento de los ecosistemas en la Costa de Jalisco, Maass y colaboradores (2005) señalaron la relevancia de valorar y definir espacialmente la provisión de servicios ecosistémicos en la cuenca del Río Cuitzmala. En este contexto, el presente trabajo tuvo el siguiente objetivo general:

Realizar una prospección general sobre la capacidad que tienen distintas unidades ambientales para brindar los servicios ecosistémicos de corte hidrológico (infiltración, regulación de la erosión hídrica y suministro de agua dulce), a fin de identificar las áreas que tienen una mayor prioridad para las acciones de restauración ecológica¹ en la cuenca del Río Cuitzmala, Jalisco.

Se identificaron los siguientes objetivos particulares:

- 1) Revisión bibliográfica como base para proponer criterios para estimar la importancia relativa de servicios ecosistémicos a lo largo de la cuenca del río Cuitzmala.*

¹ Es importante aclarar que la restauración ecológica, en un sentido amplio, es entendida como el proceso de asistir en la recuperación y manejo de la integridad ecológica (SER, 2000). Sin embargo, dado lo ambiciosos que resultan dichos objetivos, para los términos del presente trabajo cuando se utiliza la palabra **restauración se hace referencia únicamente a su modalidad de “rehabilitación”**, es decir, la realización de acciones para mejorar, en algún grado, el estado degradado (Bradshaw, 1997) del sistema de interés.

- 2) *Ejercicio de juicio de expertos para verificar la pertinencia de los criterios (variables e indicadores), así como su ponderación para la evaluación de la provisión de los servicios ecosistémicos a lo largo de la cuenca.*

- 3) *Integración de un sistema de información geográfica para la cuenca acorde con los criterios y variables propuestos.*

- 4) *Análisis Multicriterio Espacial (AMCE) para identificar las zonas de provisión de los servicios ecosistémicos en las distintas unidades ambientales de la cuenca.*

- 5) *Determinación de las áreas con necesidades de restauración ecológica en la cuenca e identificación de sus prioridades de restauración.*

- 6) *Analizar las contraprestaciones existentes entre el servicio de suministro de agua dulce y las necesidades humanas en la cuenca.*

I.III.- Estructura de este trabajo

El presente documento se desarrolla a lo largo de cuatro capítulos, en el primero se presenta una introducción general, los objetivos generales y particulares de este trabajo, así como, dos apartados, el primero titulado como “Conceptos clave” se refiere a una serie de antecedentes acerca del tema de los servicios ecosistémicos (SEs), los cuales se consideraron relevantes para explicar el enfoque que dirigió el desarrollo de esta tesis, en el segundo apartado se presentan las características generales del sitio de estudio. En los capítulos 2, 3 y 4 se analizó la provisión a lo largo de la cuenca de los servicios ecosistémicos hidrológicos de infiltración, regulación de la erosión hídrica y suministro de agua dulce, respectivamente. A su vez, en los capítulos 2 y 3 fueron priorizadas las áreas que requieren acciones de restauración ecológica, en términos de su capacidad para proveer SEs. En el capítulo 4, se analizaron los conflictos existentes entre las áreas que proveen el SE de suministro de agua dulce, en relación a las áreas de mayor demanda del recurso hídrico, así como, respecto al origen (superficial o subterránea) del agua que se consume en la cuenca. En dicho capítulo, además, se integraron los resultados de las áreas con necesidades de restauración para los tres SEs analizados, con el propósito de estimar que porcentaje del área que se propone para la restauración se encuentra en conflicto con las zonas dedicadas a actividades productivas (como la ganadería y la agricultura).

I.IV.- Conceptos clave

Los sistemas naturales han sido aprovechados, influenciados y conservados con el objeto de satisfacer la amplia gama de necesidades y preferencias que las distintas sociedades han planteado para alcanzar el bienestar humano. En décadas recientes se ha reconocido que la habilidad de nuestra especie para hacer uso de los ecosistemas ha generado diversos efectos (Postel *et al.* ,1996), muchos de los cuales han contribuido de manera notable a mejorar su calidad de vida (Janetos *et al.*, 2005), y otros que por el contrario la aminoran a medida que los ecosistemas y los procesos que éstos generan se han visto disminuidos.

Instituciones humanas como los mercados, las estructuras de gobierno y las redes sociales pueden propiciar la sobreexplotación o el aprovechamiento de los recursos naturales (Costanza y Farber, 2002), de igual forma en que pueden ejercer influencia para su conservación o para que los impactos ambientales sean manejados (Janetos *et al.*, 2005). Algunas de las causas de la crisis ambiental contemporánea se asocian al hecho de que las personas o sus instituciones (i.e. mercado) “fallan” al infravalorar o no asignar valor alguno a los beneficios que generan los ecosistemas (Richards y Moura-Costa,1999), y puesto que éstos no son considerados, se les denomina externalidades. En la búsqueda de mecanismos para “internalizar las externalidades” (Rosa *et al.*, 2003) es que fue acuñado el concepto de servicios ecosistémicos (SEs), el cual se refiere a los beneficios que los seres humanos reciben y obtienen a partir de los ecosistemas (Daily, 1997; MA, 2003). Esta definición incluye un amplio conjunto de condiciones

y procesos naturales que la sociedad puede utilizar, tales como la biodiversidad y el mantenimiento del germoplasma, la regulación del clima, de los ciclos del agua y del carbono (Torres y Guevara-Sanginés, 2004). Los SEs pueden entenderse también como atributos funcionales de los ecosistemas que son benéficos (Myers, 1996, Costanza et al.1997) para sostener la vida humana (Daly et al.,1997). De acuerdo con el Millennium Ecosystem Assessment (2003), los SEs pueden dividirse en servicios de suministro, regulación, culturales y de base. Los servicios de suministro son los productos que las personas obtienen de los ecosistemas, como los alimentos, los combustibles, las fibras, la provisión de agua dulce y los recursos genéticos. Los servicios de regulación son los beneficios de amortiguamiento y control de los procesos de los ecosistemas, entre los que se incluye el mantenimiento de la calidad del aire, la regulación del clima, el control de la erosión, la regulación de las enfermedades humanas y la purificación del agua. Los servicios culturales son los beneficios intangibles que aportan los ecosistemas mediante el enriquecimiento espiritual, el desarrollo cognitivo, la reflexión, la recreación y las experiencias estéticas. Los servicios de base (o de soporte) son los procesos necesarios para la producción de todos los otros servicios de los ecosistemas como la producción de materias primas y de oxígeno, los procesos asociados al ciclo hidrológico como la infiltración y la formación del suelo.

El concepto de SE tiene una trascendencia especial, en el sentido de que facilita la cuantificación de los beneficios y por lo tanto, hace posible que les sea asignado un valor, lo que constituye un medio para que la sociedad y los tomadores de

decisiones reconozcan no sólo a los SEs, sino que también admitan la necesidad de manejar de maneras sustentables a los ecosistemas que los proveen (Costanza et al., 1997; Daily, 1997 Daily et al., 2000).

El valor que se asigna a un SE, aunque es relativo (pues depende de las percepciones o preferencias de quienes lo asignan) puede ser aprovechado como guía para realizar un mejor manejo de las actividades humanas en los ecosistemas naturales (Costanza y Farber, 2002). Si definimos valor como "la contribución a una meta", los ecosistemas adquieren valor en la medida en que contribuyen a esa meta (Costanza, 2000). Asimismo, la meta puede ser definida en términos de su contribución al bienestar humano, lo que en este contexto puede referirse, por ejemplo, a la capacidad de provisión de SEs en distintas unidades geográficas, o por el contrario, a la presencia de un conflicto entre distintos usos del suelo y la provisión de uno o varios SEs. El conflicto puede hacer evidente que la definición de la meta depende del grupo e interés que la defina, ya que aunque su cumplimiento logre beneficios para unos, puede significar costos o pérdidas para otros. La meta también puede ser útil para evaluar el impacto de distintos cursos de acción, por ejemplo, tipos de manejo.

Las percepciones, la asignación de valor, así como la toma de decisiones antes mencionados, puesto que se refirieren a metas asociadas al ambiente y al manejo de los recursos naturales, constituyen problemas complejos o incluso hiper-complejos (Brans, 2002). Una forma para estudiarlos que permite lidiar con dicha complejidad, es considerándolos como "problemas de decisión multicriterio", lo

que implica identificar los objetivos² y criterios³ que los definen, así como la manera en que éstos contribuyen al problema, si son independientes, complementarios o incluso si se encuentran en conflicto (Huth et al., 2004). Para abordar este tipo de problemas de manera sistemática y generar información útil para la toma de decisiones (Mendoza et al., 1999) fue desarrollado el Análisis Multicriterio (AMC). Cuando éste se combina con el uso de sistemas de información geográfica (SIGs) y técnicas de análisis espacial (Chávez et al., 2003; Sharifi y Retsios, 2003) constituyen lo que se denomina como Análisis Multicriterio Espacial (AMCE). Este último es una metodología muy conveniente para el estudio de problemas con criterios cuantitativos (como los datos geográficos) y cualitativos (como las preferencias de habitantes y tomadores de decisión). El análisis se realiza mediante la aplicación de reglas de decisión específicas (Mendoza et al., 1999; Barredo, 1996), es decir, algoritmos mediante los cuales los criterios se combinan para establecer el puntaje o valor correspondiente a cada una de las alternativas. Dichas alternativas, se refieren a cada una de las soluciones que son posibles para el problema, entendidas como alternativas de elección propiamente o incluso objetos espaciales⁴, mismas que poseen ventajas (beneficios) e inconvenientes (costos) diferentes (Barredo, 1996). La estimación global de los puntajes aportados por todos los criterios para cada alternativa,

² En este contexto el "objetivo" se refiere al punto de vista e intereses de los actores que tengan influencia en la toma de decisiones sobre el problema evaluado, así un tipo de actores fomentará como su objetivo el desarrollo económico de una región a través de la industrialización, otro pudiera impulsarlo a través de la conservación y un tercero promovería por ejemplo, la urbanización.

³ Son aquellos aspectos de la realidad que inciden en alguna medida en un problema o fenómeno y que pueden ser representados por medio de variables o indicadores, por ejemplo, la estimación de la erosión mediante la ecuación universal de pérdida de suelos (USLE), los criterios serían cada uno de los factores considerados por la misma (Chávez *et al.*, 2003) erosividad, erodabilidad, pendiente, cobertura y prácticas de manejo, que a su vez podrían ser evaluados por determinadas variables o indicadores, así la erosividad podría ser calculada por el índice de Fournier o mediante el índice de erosividad por precipitación pluvial.

⁴ Mismos que pueden referirse a líneas, puntos o áreas geográficas, por lo que pueden ser representados en capas temáticas o mapas.

permite priorizarlas para que sea posible la selección de la más adecuada (Bosque, 2001, Sharifi y Retsios, 2003) en términos de la medida en que ésta se acerque al cumplimiento del objetivo o de la meta previamente establecida (i.e. la capacidad de proveer SEs o la ubicación de áreas de restauración o de manejo).

Para el caso de los SEs, puesto que aún es incipiente la comprensión acerca de la naturaleza y magnitud de los procesos que los generan y que regulan su provisión (Kremen, 2005), el empleo del AMCE puede llevarse a cabo dentro de la lógica del manejo adaptativo. Este enfoque permite analizar los problemas ambientales (i.e. los SEs hidrológicos) considerando el alto nivel de incertidumbre y complejidad que los caracteriza (Bunch, 2003), por lo que admite que las propuestas de solución, pese a que se fundamenten en la mejor información disponible en (Downs y Kondolf, 2002) el momento del análisis, se trata de información incompleta a la que se irán agregando nuevos datos conforme se aprenda más acerca del sistema de estudio (i.e. los ecosistemas), en lo que puede describirse como un proceso estructurado pero flexible de “aprender haciendo” (Walters, 1997).

I.V. Características generales del sitio de estudio

La cuenca del río Cuitzmala se encuentra al suroeste del estado de Jalisco, dentro de la región Chamela, que a su vez pertenece a la Provincia Fisiográfica de la Sierra Madre del Sur. La cuenca tiene una superficie aproximada de 1080 km² y forma parte de la Región Hidrológica No.15, (Secretaría de Programación y Presupuesto, 1981). Se trata de una cuenca exorreica, cuya corriente principal tiene una longitud aproximada de 105 km., corre en dirección al noreste-suroeste y desemboca en el Pacífico (Meléndez, 1999). El río obtiene el aporte de un gran número de corrientes perennes e intermitentes, entre las que destacan los ríos Jirosto, San Miguel, así como los arroyos Tene, Sila, Las Truchas y Los Metates (Cortés, 2001; Secretaría de Programación y Presupuesto, 1981). Las riveras del río y arroyos constituyen importantes sitios de recreo para los habitantes de las localidades cercanas, así como para el turismo.

En la zona la tenencia de la tierra es federal, ejidal y privada (Ceballos et al., 1999). Se presentan distintos usos del suelo, como la ganadería extensiva, la agricultura de temporal y la de riego; en la parte suroeste de la cuenca existe un área dedicada a la conservación que corresponde a la Reserva de la Biósfera Chamela-Cuixmala.

A nivel regional pueden distinguirse tres grandes zonas (Durán et al., 2002; Cotler et al., 2002):

- 1) La costera (200 msnm- nivel del mar) cuyo clima dominante es semi-seco cálido y muy cálido con lluvias en verano. Los suelos son de tipo Vertisol y Solonchak. En el sustrato geológico predominan el suelo aluvial y la roca de origen sedimentario del tipo Arenisca-conglomerado. La vegetación está compuesta por manglares, vegetación de litoral y riparia.
- 2) Los lomeríos (1000-200 msnm) en los que el clima es subhúmedo con lluvias en verano y escasa lluvia invernal. Los suelos que se presentan son Regosoles, Feozems, Cambisoles y Leptosoles, también existe una zona de terrazas aluviales con suelos tipo Feozem y Fluvisol. En el sustrato geológico predominan las rocas de origen ígneo intrusivas como el granito y las ígneas extrusivas de tipo Volcano-clástico. La vegetación dominante es la selva baja caducifolia.
- 3) La sierra (2400-1000 msnm) en donde el clima es subhúmedo con lluvias en verano. Los suelos son Regosoles, Cambisoles y Feozems. Predominan las rocas de origen ígneo intrusivo del tipo granito. Se presenta selva baja caducifolia, selva mediana, bosque mesófilo de montaña y bosque templado.

I.V.- Bibliografía citada

Aspinall, R. y D. Pearson. 2000. Integrated geographical assessment of environmental condition in water catchments: Linking landscape ecology, environmental modelling and GIS. *Journal of Environmental Management* 59, 299–319.

Ávila, P. 2007. Las cuencas hidrológicas de México y su vulnerabilidad socioambiental por el agua. En: *Sustentabilidad y desarrollo ambiental. Agenda para el Desarrollo Volumen 14*. José Luis Calva (Coord.). Edit. UNAM, H. Cámara de Diputados LX Legislatura, Miguel Ángel Porrúa.

Barredo, J. I. 1996. Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio. Edit. RA-MA. Madrid, pp. 62-63.

Bosque, J. S. 2001. Planificación y gestión del territorio. De los SIG a los Sistemas de ayuda a la decisión espacial (SADE). En: *El Campo de las Ciencias y las Artes*, Madrid, España, nº 138, pp. 137-174.

Bradshaw, A. 1997. *What do mean by restoration?*. Cambridge University Press, Pp: 8-14.

Brans, J.P., 2002. Ethics and decisions. *European Journal of Operational Research* 136:340-352.

Bunch, M.J. 2003. Soft systems methodology and the ecosystem approach: a system study of the Cooum river and Environs in Chennai, India. *Environmental Management* 31(2):182-197.

Ceballos G., A Szekely, A. García, P. Rodríguez y F. Noguera, 1999. Programa de Manejo de la Reserva de la Biósfera Chamela- Cuixmala. INE/SEMARNAP. México, D.F.

Cortés, F. 2001, Estudio hidrogeológico de la subcuenca río Cuitzmala, en la costa de Jalisco. Tesis. Facultad de Ingeniería, UNAM, México, D.F.

Costanza, R. y S. Farber. 2002. Introduction to the special issue on the dynamics and value of ecosystem services: integrating economic and ecological perspectives. *Ecological Economics* 41: 367–373

Costanza, R., 2000. Social goals and the valuation of ecosystem services. *Ecosystems* 3: 4–10.

Costanza, R., R. d'Arge, R. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, S. Naeem, K. Limburg, J. Paruelo, R.V.O'Neill, R. Raskin, P. Sutton, M. van den Belt. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387: 253–260.

Chávez, J. M., M. M. Chávez, G. S. Binnqüist, I. Roldán, E. Leyequien y G. Romano. 2003. Strategic planning of the Iztaccíhuatl-Popocatepetl National Park. En: *Ecology and man in Mexico's Central Volcanoes Area*. Heil, G. W., R. Bobbink y N. Trigo, Editores. Edit. Kluwer Academia Publishers, Dordrecht, The Netherlands

Daily, G. C. 1997. *Nature's services: societal dependence on natural ecosystems*. Island Press, Washington, D.C., USA.

Daily, G. C., T. Söderqvist, S. Aniyar, K. Arrow, P. Dasgupta, P. R. Ehrlich, C. Folke, A. Jansson, B. Jansson, N. Kautsky, S. Levin, J. Lubchenco, K. Mäler, D. Simpson, D. Starrett, D. Tilman, and B. Walker. 2000. The value of nature and the nature of value. *Science* 289:395-396.

Downs, P. W. y G. M. Kondolf. 2002. Post –project appraisals in adaptative management of river channel restoration. *Environmental Management* 29(4):477-496.

Durán, E., P. Balvanera, E. Lott, G. Segura, A. Pérez-Jiménez, A. Islas y M. Franco. 2002. Estructura, composición y dinámica de la vegetación. En: Noguera, F. A., J. H. Vega, A. N. García-Aldrete y M. Quesada (Eds.). *Historia Natural de Chamela*, Instituto de Biología, UNAM. Pp: 443-472.

Janetos, A. C., R. Kasperson, T. Agardy, J. Alder, N. Ash, R. De Fries y G. Nelson. 2005. Condition and trends in systems and services, trade-offs for human well-being, and implications for the future. B. Huntley y R. Norgaard (Edits.). En: *Ecosystems and human well-being: current state and trends*. Findings of the Condition and Trends Working Group. Millennium Ecosystem Assessment Series. Island Press.

Huth, A., M. Drechsler, P. Köhler. 2004. Multicriteria evaluation of simulated logging scenarios in a tropical rain forest. *Journal of Environmental Management* 71:321–333.

Kremen, C. 2005. Managing ecosystem services: what do we need to know about their ecology?. *Ecology Letters* 8:468-479.

Landa, R. y J. Carabias. 2006. Nuevas perspectivas frente a los problemas del agua en México. En: *Sustentabilidad y desarrollo ambiental*. Agenda para el Desarrollo. Volumen 14. José Luis Calva (Coord.). UNAM, H. Cámara de Diputados LX Legislatura, Miguel Ángel Porrúa.

Meléndez, J. F. 1999. Hidrogeografía de la cuenca del río Cuitzmala, Jalisco. Tesis de Maestría. Facultad de Filosofía y Letras, Departamento de Geografía, UNAM.

Mendoza, G.A., P. Macoun, R. Prabhu, D. Sukadri, H. Purnomo y H. Hartanto. 1999. The Criteria & Indicators Toolbox Series. Center for International Forestry Research. Jakarta.

Meyerson, L.A., J. Baron, J. M. Melillo, R. J. Naiman, R.I. O'Malley, G. Orians, M.A. Palmer, A. SP. Pfaff, S.W. Running y O. E. Sala . 2005. Aggregate measures of ecosystem services: can we take the pulse of nature?. *Front. Ecol. Environ.* 3(1):56-59.

Millennium Ecosystem Assessment. 2003. Ecosystems and human well-being: a framework for assessment. Island Press, Washington, D.C, USA.

Myers, N. 1996. Environmental Services of Biodiversity. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* 93.

Perló, M. 2006. Crisis hidráulica y políticas públicas en México: problemas y alternativas. En: Agua y Lagos. Una mirada desde lo global hasta lo local. Patricia Ávila (Coord.). Biblioteca Michoacana. Secretaría de Cultura, Gobierno del Estado de Michoacán, Morelia, Mich.

Postel, S., G. C. Daily y P. Ehrlich. 1996. Human appropriation of renewable fresh water. *Science* 271.

Richards M. y P. Moura-Costa, 1999. Can tropical forestry be made profitable by "internalising the externalities"? *Boletín ODI. Natural Resource Perspectives* 46. DFID Department for International Development. Overseas Development Institute. [Http://www.oneworld.org/odi/nrp/](http://www.oneworld.org/odi/nrp/) for papers in this series.

Rosa, H., S. Kandel y L. Dimas. 2003. Compensación por servicios ambientales y comunidades rurales. Lecciones de las Américas y temas críticos para fortalecer estrategias comunitarias. Programa Salvadoreño de Investigación sobre Desarrollo y Medio Ambiente (PRISMA).

Secretaría de Programación y Presupuesto. 1981..Carta de Hidrología de Aguas Subterráneas, Manzanillo E13-2-5, 1:250,000.

SER, Society for Ecological Restoration Science & Policy Working Group. 2002. The SER Primer on Ecological Restoration. www.ser.org/.

Sharifi, M.A. y V. Retsios 2003. Site selection for waste disposal through spatial multiple criteria decision analysis. In: Proceedings of the 3rd International conference on decision support for telecommunications and information society, 4-6 September 2003, Warsaw, Poland.

Torres, J.M. y A. Guevara-Sanginés. 2004. El potencial de México para la producción de servicios ambientales: captura de carbono y desempeño hidráulico. *Gaceta Ecológica* 63.

Varis, O. 2006. Paradigmas, retos y realidades en torno al agua. En: *Agua y Lagos. Una mirada desde lo global hasta lo local*. Patricia Ávila (Coord.) Biblioteca Michoacana. 2006. Secretaría de Cultura, Gobierno del Estado de Michoacán, Morelia, Mich.

Vörösmarty, C. J., C. Le´ve`que, C. Revenga, R. Bos, C. Caudill, J. Chilton, E. M. Douglas, M. Meybeck, D. Prager, P. Balvanera, S. Barker, M. Maass, C. Nilsson, T. Oki, y C. A. Reidy. 2005. *Freshwater ecosystem services*. Frank Rijsberman, Robert Costanza, Pedro Jacobi (Edits.). En: *Ecosystems and human well-being: current state and trends. Findings of the Condition and Trends Working Group*. Millennium Ecosystem Assessment Series. Island Press.

Walters, C. 1997. Challenges in adaptive management of riparian and coastal ecosystems. *Conservation Ecology*. The Resilience Alliance. [Http://www.consecol.org/vol1/iss2/art1](http://www.consecol.org/vol1/iss2/art1)

Capítulo II.- Provisión del servicio ecosistémico de infiltración y prioridades de restauración ecológica en la cuenca del Río Cuitzmala.

Resumen

Se realizó una prospección general sobre la capacidad de distintas unidades ambientales para brindar el servicio ecosistémico (SE) de infiltración, a fin de identificar las áreas de mayor prioridad para la restauración ecológica en la cuenca del Río Cuitzmala, Jalisco, México. Para ello se utilizaron el juicio experto y el análisis multicriterio espacial, considerando la permeabilidad de la roca y el suelo, la precipitación y evapotranspiración anuales, la cobertura y la pendiente del terreno. Las unidades ambientales que tienen los valores relativos más altos en su capacidad para brindar el SE de infiltración a nivel superficial-subsuperficial ocupan en conjunto, aproximadamente el 40 % del área de la cuenca, mientras que para el caso de la infiltración profunda, las unidades con mayor capacidad para proveerlo tan sólo ocupan el 4.6% del área de estudio. Las unidades ambientales con mayor prioridad de restauración ocupan alrededor del 37% del área de la cuenca y se ubican en la parte más septentrional de la misma, coincidiendo con las áreas que brindan en mayor proporción el SE de infiltración e infiltración profunda. La existencia de estos servicios ecosistémicos contribuye a la recarga y descarga de agua a lo largo de la cuenca, lo que resulta fundamental en la época de secas para cubrir las necesidades básicas de los habitantes y sus actividades productivas, mientras que en la estación de lluvias son áreas que contribuyen a la mitigación de eventos extremos como las inundaciones.

II.I. Introducción

En la costa de Jalisco y la región Chamela, la disponibilidad de agua dulce es considerada como uno de los factores limitantes de mayor relevancia para el desarrollo económico (Maass *et al.*, 2005). Lo anterior se debe, por una parte, a factores de carácter biofísico, como el déficit hídrico que impera en la zona y que es resultado de que la evaporación potencial supera, por mucho, a la evapotranspiración actual (Barradas y Fanjul, 1985; Burgos, 1999), así como que a nivel regional, el sustrato geológico predominante tiene una permeabilidad muy baja pues se trata de granito poco fracturado (Secretaría de Programación y Presupuesto, 1981). Por otra parte, el modelo de desarrollo actual ejerce presiones económicas (Burgos, 1999) que, junto con factores culturales como el

arraigo y la identidad campesina, han favorecido la transformación de los ecosistemas naturales en sistemas productivos agrícolas y pecuarios (Castillo et al., 2006). Estos sistemas tienen demandas hídricas muy elevadas, en comparación con la baja disponibilidad de agua que pueden proveer las condiciones climáticas de la zona (De Ita-Martínez y Barradas, 1986 Maass, 2005), lo que ha promovido la sobreexplotación de los acuíferos de la región (Perló, 2006; Ávila, 2006).

La transformación que sufren los ecosistemas naturales, para dar satisfacción a las necesidades humanas, afecta la capacidad que éstos tienen para proveer beneficios que puedan ser aprovechados por los grupos humanos, beneficios a los que se ha convenido en denominar como servicios ecosistémicos (SEs). De manera particular, se han designado como “servicios ecosistémicos de soporte o de base”, a aquellos procesos que mantienen y son necesarios para el funcionamiento del ecosistema y que por lo tanto permiten la producción de todos los otros servicios (Millennium Ecosystem Assessment, 2003). Para el caso del ciclo hidrológico, algunos ejemplos de los servicios de soporte son los procesos de infiltración, la escorrentía y la evapotranspiración (Maass et al., 2005).

El servicio ecosistémico de infiltración puede subdividirse en dos componentes: 1) el proceso de infiltración propiamente dicho, que hace posible el proceso de entrada del agua de la superficie hacia el interior del suelo, y 2) el proceso de infiltración profunda, que permite el flujo de agua por los horizontes del suelo y subsuelo, y que alimenta a los mantos freáticos. Para entender dicho servicio

ecosistémico se consideran los siguientes factores que controlan el proceso de infiltración:

- a) La pendiente, ya que el agua tendrá menor oportunidad y tiempo para infiltrarse en áreas en las que el ángulo de la pendiente sea mayor que en las zonas planas (Bharati et al., 2002; Bujang et al., 2006).
- b) La cobertura vegetal, ya que ésta aumenta la capacidad de infiltración del suelo y favorece una mayor infiltración, mientras que disminuye el escurrimiento superficial y la erosión del suelo (Maass et al., 1988).
- c) La porosidad y la conductividad hidráulica del suelo (Angelaki et al., 2004).
- d) La profundidad del suelo, pues ésta determina la cantidad máxima de agua que puede ser almacenada sub-superficialmente (Bruijnzeel, 2004).
- e) La porosidad y la permeabilidad del sustrato geológico, ya que éstas controlan la infiltración profunda o percolación del agua hacia los acuíferos (Campos, 1992; Maderey, 2005).

La cuenca hidrológica es idónea como unidad de evaluación del SE de infiltración, puesto que es definida en base a los patrones de flujo del agua superficial. Dado que la dinámica hidrológica interconecta en el ecosistema, tanto los flujos de materia como los de energía, la cuenca posibilita el análisis integrado de una gran variedad de impactos que el ser humano genera en los sistemas naturales (Maass

et al., 2002). De acuerdo a una lógica de unidades anidadas, es posible desagregar a la cuenca para su análisis en subcuencas, que a su vez pueden contener a otras unidades como las morfoedafológicas (Helena Cotler com. pers.). Estas últimas integran los aspectos geomorfológicos y de suelos mediante el análisis y síntesis de los diferentes aspectos que componen el paisaje, así como a su dinámica y evolución (Rossignol, 1987). Cada unidad morfoedafológica tiene un potencial, una función y una vulnerabilidad distintas, por lo que es posible luego de su evaluación, generar distintas estrategias de manejo (Cotler, 2003), por ejemplo, para la conservación o la restauración ecológica de cada unidad. Para ello se hace necesario primero estimar la capacidad que tienen las distintas unidades para proveer el SE de interés, y segundo identificar aquellas unidades que de acuerdo a su grado de deterioro o degradación requieren ser restauradas. Ambos casos implican un análisis que considere y explicita de manera espacial la información (Ehrenfeld, 2000), lo que constituye un problema de investigación complejo, que puede ser abordado mediante el Análisis Multicriterio Espacial (AMCE), metodología en la que los méritos relativos (i.e. provisión de SEs) de diferentes opciones (i.e. unidades morfoedafológicas) pueden ser comparados, organizados y priorizados utilizando un rango cuantitativo y cualitativo de criterios (Mendoza et al., 1999). Este enfoque puede asistir en el proceso de evaluación de distintas opciones de uso del suelo, y generar información relevante para la toma de decisiones (Sharifi y Hertzios, 2003) respecto al manejo y planificación de las acciones para la conservación y la restauración ecológica.

En el marco de la investigación de largo plazo sobre el funcionamiento de los ecosistemas en la Costa de Jalisco, Maass y colaboradores (2005) señalaron la relevancia de valorar y definir espacialmente la provisión del servicio ecosistémico de infiltración en la cuenca del Río Cuitzmala, ante los procesos de cambio de uso del suelo en la cuenca, que están poniendo en riesgo dicho servicio. En este contexto, el presente trabajo tuvo como objetivo general: Realizar una prospección general sobre la capacidad que tienen distintas unidades ambientales para brindar el servicio ecosistémico de infiltración, a fin de identificar las áreas que tienen una mayor prioridad para las acciones de restauración ecológica, en la cuenca del Río Cuitzmala, Jalisco.

II.II.-Área de estudio

En la zona costera de la región Chamela, llueve un promedio anual de 750 mm, con una enorme variabilidad intra- e inter-anual, habiéndose registrado años con tan sólo 366 mm, y otros con más de 1,200 mm (García Oliva et al., 2002). El 80% de la precipitación anual se registra en unos cuantos eventos de tipo ciclónico con alto poder erosivo (García-Oliva et al., 1995), que se concentran tan sólo en 4 meses del año (García-Oliva et al., 1991). Las áreas de la cuenca cubiertas por selva baja caducifolia presentan durante la mayoría de los meses, una precipitación que es menor a la evapotranspiración potencial (Barradas y Fanjul, 1985), por ello es que anualmente, la evapotranspiración potencial llega a ser hasta 50% mayor que la actual, por lo que más del 90% del agua que se precipita en la zona regresa a la atmósfera por efecto de la evapotranspiración (Burgos, 1999).

La parte alta de la cuenca recibe significativamente más precipitación que la zona costera, más de 1,400 mm y menos de 1,000 mm, respectivamente. El balance hídrico de toda la cuenca del río Cuitzmala registra una precipitación anual de 1,245 mm, una evapotranspiración potencial de 1,190 mm y una evapotranspiración actual de 941 mm. La diferencia resulta en una escorrentía total de la cuenca del orden de los 300 mm al año (Piña, 2006).

Los suelos predominantes en la cuenca son de tipo Regosol eútrico (ver anexo I. Mapa edafológico) y ocupan el 84% de su territorio, los cuales de manera general se caracterizan por estar poco desarrollados, poco profundos y localizarse en superficies cuyo rango de pendientes va de moderadas a pronunciadas (Cotler et al., 2002); su textura es franco arenosa, con un alto contenido de arenas (70-80%) y pocos limos (5-20%), con una alta porosidad (entre el 45 y el 70%), y por consiguiente, una baja capacidad (entre el 20 y el 40%) para retener agua (Burgos, 1999). Estas características aunadas a que se trata de suelos con bajo contenido de nutrientes, los hacen poco adecuados para el uso agrícola o pecuario (Maass et al., 2005).

En la región y la cuenca predominan las pendientes mayores a los 10° (Meléndez, 1999) que sufren los efectos ocasionados por la erosión (De Ita-Martínez y Barradas, 1986; Maass et al 1988). A nivel geológico predomina el granito, cubriendo aproximadamente el 80% del área de la cuenca (ver Anexo II Mapa geológico), y se identifican 3 grandes unidades y 7 subunidades (ver Cuadro II.1), mismas que responden a las características litológicas e hidráulicas de las rocas que las conforman (Cortés, 2001).

Cuadro II.1. Unidades hidrogeológicas de la cuenca del Río Cuitzmala de acuerdo a datos de Cortés (2001).

UNIDAD	Sub unidad	Permea- bilidad	Causa de la permeabilidad	Materiales
I	a	Media-alta	Disolución de materiales, fracturamiento y fallamiento.	Calizas, volcanoclástico
	b	Media-alta	Materiales que lo conforman y por fracturamiento	Volcanosedimentario.
	c	Baja	Materiales que lo conforman y ausencia de fracturamiento	Volcanosedimentario.
II	a	Baja	Material impermeable, escaso fracturamiento y baja degradación de sus materiales.	Granito
	b	Baja	Material poco poroso, poco permeable, y con escaso fracturamiento.	Volcánico (toba intermedia, ignimbrita y sílice).
III	a	Alta	Materiales permeables, por su porosidad y fracturamiento.	Arenisca conglomerado con una matriz areno-arcillosa.
	b	Alta	Buena permeabilidad, debida a la mala consolidación de sus materiales.	Fragmentos de roca ígnea intrusiva, extrusiva y calcárea, y arenas arcillosas mal consolidadas.

Aproximadamente el 21.6% de la cuenca, especialmente en la parte media, está cubierta por selva baja caducifolia, con distintos grados de conservación (ver Anexo III. Mapa de vegetación y usos del suelo). En la parte alta se presenta selva baja caducifolia, selva mediana, bosque mesófilo de montaña y bosque templado. En la parte baja de la cuenca la vegetación está compuesta por manglares, vegetación de dunas costeras, halófila y gipsófila (INE et al., 2000). El uso del suelo es principalmente de tipo pecuario y agrícola, sin embargo, hacia la parte baja de la cuenca existe un área dedicada a la conservación, la Reserva de la Biósfera Chamela-Cuixmala cuya extensión es de 130 km².

II.III.- Materiales y métodos

El proceso metodológico se realizó con un enfoque de manejo adaptativo (ver Figura II.1) siguiendo el protocolo de manejo de ecosistemas (Stanford y Poole, 1996):

1.- Síntesis del conocimiento existente sobre la cuenca: Se procesó e integró la información existente a nivel regional de tipo bibliográfico, bases de datos, mapas base y temáticos acerca de la zona de estudio sobre los siguientes temas: tipos de vegetación, unidades hidrogeológicas, permeabilidad de suelos y roca, así como, el cálculo de balance hídrico.

2.- Definición del sistema de manejo: Se realizó una revisión bibliográfica sobre el tema de la infiltración, que sirvió como base para proponer los criterios¹ que serían empleados para estimar la importancia relativa del servicio ecosistémico de infiltración a lo largo de la cuenca, así como, la forma en que éstos podrían ser expresados espacialmente. Las unidades ambientales para evaluar el servicio fueron generadas mediante la reclasificación de la regionalización morfoedafológica propuesta por Martínez (2007, ver Anexos IV y V), y la delimitación por subcuencas realizada por Piña (2006, ver anexo VI).

¹ así como las variables para evaluar cada criterio.

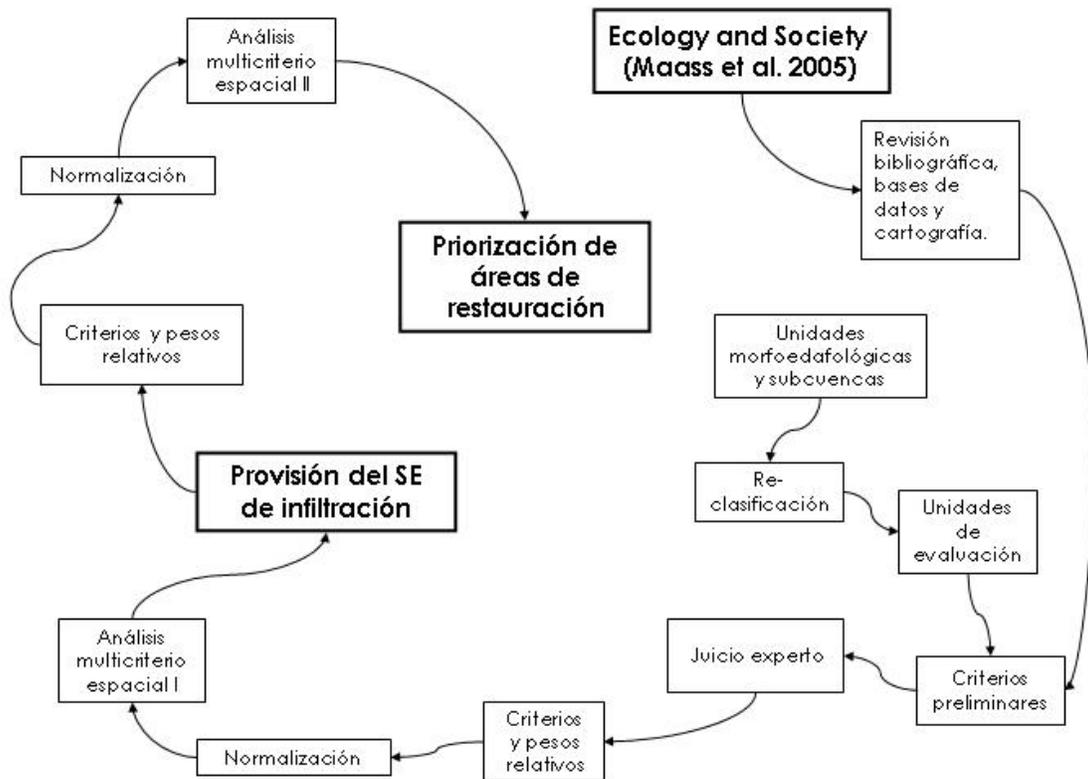


Figura II.1. Resumen del proceso metodológico.

3.-Identificación de objetivos de manejo: Se diseñó una guía para la realización de entrevistas (ver ejemplo en el Anexo VIIa) que sirvió de base para consultar a distintos expertos (ver Anexo VIIb), con el objeto de verificar la pertinencia tanto de los criterios que habían sido propuestos para la evaluación del SE, como, de las variables para estimarlo y cuando fue posible, acerca de la importancia relativa (ponderación) de cada criterio para la evaluación del SE. Los resultados sirvieron

para generar una serie de tablas de valores, en base a las cuales se generaron los mapas correspondientes a cada criterio (mapas-criterio). Los criterios considerados fueron (ver Figura II.2. Esquema de decisión multicriterio):

- a) la permeabilidad relativa del tipo de suelo que se encuentra en la cuenca a partir de la clase textural (Meléndez, 1999; INEGI, 2006),
- b) el agua disponible entendida como la diferencia entre precipitación anual y evapotranspiración actual (Piña, 2006),
- c) la eficiencia de cobertura, asignando un valor relativo para cada tipo de vegetación y subcomunidad (INE et al., 2000), de acuerdo a la capacidad que su cobertura tuviera para brindar protección al suelo y favorecer la infiltración, y
- d) los rangos de pendiente, que fueron reclasificados en términos del grado en que la inclinación favoreciera la infiltración partir del mapa de pendientes (INE, 2003).

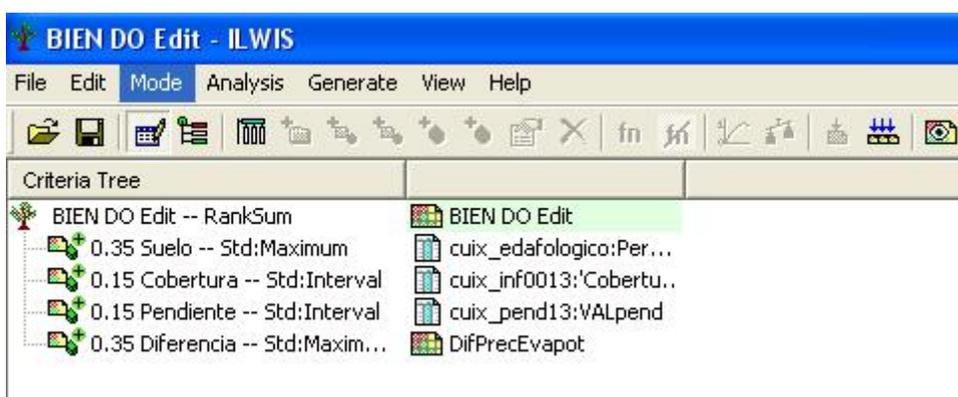


Figura II.2. Esquema de decisión multicriterio para la estimación del SE de infiltración. Los números indican la ponderación asignada a cada criterio.

Como criterios para el servicio de infiltración profunda se consideró (ver Figura II.3. Esquema de decisión multicriterio):

- a) la estimación previa del servicio de infiltración, y
- b) la permeabilidad del sustrato geológico (Cortés, 2001; Secretaría de Programación y Presupuesto, 1981).

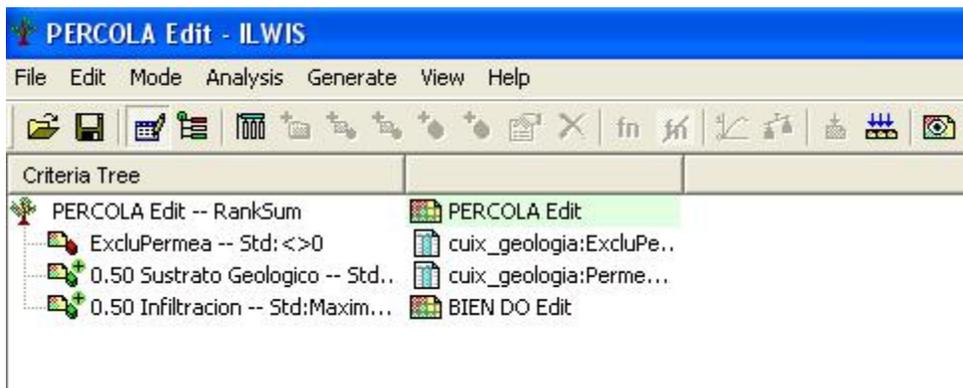


Figura II.3. Esquema de decisión multicriterio para la estimación del SE de infiltración profunda. Los números indican la ponderación asignada a cada criterio.

Dado que los criterios obtenidos en el paso anterior provenían tanto de información de tipo cuantitativa como cualitativa, y estaban expresados en distintas unidades de medida, se realizó un proceso de normalización para transformarlos a una escala común que permitiera su manejo y comparación (ver Anexos VIII, IX, X, XI y XII). Asimismo, la evaluación requirió de un proceso de ponderación para establecer el peso de cada criterio, mismo que estuvo basado en las preferencias expresadas por los expertos (Mendoza et al., 1999) y la información bibliográfica consultada, acerca de la importancia relativa de cada criterio y su influencia en la provisión del SE. Toda esta información pudo ser

condensada para facilitar el análisis en lo que se conoce como matriz de evaluación (ver Anexo XIII).

Mediante el método Análisis Multicriterio Espacial (AMCE) denominado Sumatoria Lineal Ponderada (ver Figura II.4), se asignó un valor de capacidad para la provisión del servicio de infiltración a las distintas unidades ambientales. Considerando que a cada una de las unidades correspondió un valor determinado en el mapa-criterio, dicho valor fue multiplicado por el peso asignado a ese criterio. La sumatoria de los productos de todos los criterios correspondió al valor de “capacidad para la provisión del SE de infiltración” de esa unidad. Mediante el módulo de AMCE del programa ILWIS, el proceso se repitió para todos los criterios y todas las unidades ambientales de la cuenca. El resultado permitió conocer en términos relativos, la capacidad de las distintas unidades ambientales para proveer el servicio ecosistémico de infiltración.

$$SE = \sum_{j=1}^n w_j x_{ij}$$

SE : capacidad para la provisión del SE de infiltración

w_j : peso del criterio

x_{ij} : valor de la unidad ambiental i en el criterio j

Figura II.4. Algoritmo empleado por la metodología de AMCE Sumatoria Lineal Ponderada para calcular los puntajes en cuanto a la provisión del SE de las distintas unidades ambientales.

4.- Desarrollo de una estrategia de manejo: Para la determinación de las áreas con necesidades de restauración ecológica en la cuenca, se determinaron una serie de criterios que permitieran expresar, de manera general, el estado de deterioro de las unidades ambientales y aquellas con posibilidades de acciones de

manejo. Para lo anterior, fueron elaborados una serie de mapas y bases de datos para cada uno de los criterios considerados, los cuales fueron empleados como insumos para realizar un segundo Análisis Multicriterio Espacial. Ello permitió establecer prioridades en cuanto a las unidades ambientales que requieren acciones de restauración ecológica a lo largo de la cuenca, y con ello continuar proveyendo el servicio de infiltración. Como resultado se obtuvieron el mapa de prioridades para la restauración (mapa 3) y la base de datos correspondiente. Los criterios para estimar las necesidades de restauración fueron:

- a) el grado de deterioro de la cobertura vegetal (ver Anexo X),
- b) la erodabilidad del suelo (ver Anexo VIII) calculada mediante el nomograma de la USDA (Natural Resources Conservation Service, 2007) a partir de los datos de tipos de suelo de textura, estructura de agregados, permeabilidad y contenido de materia orgánica (INEGI, 2006), y
- c) la profundidad para cada tipo de suelo en la cuenca (ver Anexo VIII), para el cual se calculó el valor promedio a partir de datos de INEGI (2006).

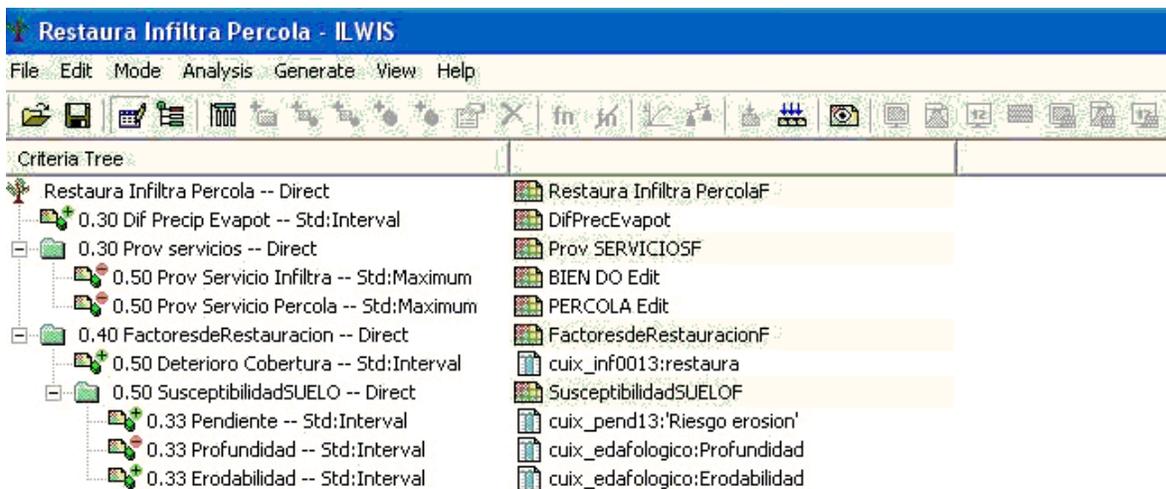


Figura II.5. Esquema de decisión multicriterio para estimar las necesidades de restauración de las diferentes unidades ambientales. Los números indican la ponderación asignada a cada criterio.

II.IV.- Resultados

Infiltración

Los criterios para estimar la provisión del SE de infiltración recibieron los siguientes pesos relativos: a) Permeabilidad del tipo de suelo (35%), b) Agua disponible -diferencia entre precipitación anual y evapotranspiración actual- (35%), c) Eficiencia de cobertura (15%) y d) Pendiente del terreno (15%). Para el caso del SE de infiltración profunda, se asignó un peso del 50% a cada criterio considerado: a) estimación previa del servicio de infiltración, y b) la permeabilidad del sustrato geológico.

Empleando dichos criterios, los resultados de los Análisis Multicriterio Espacial, pueden apreciarse en los mapas 1 y 2 (ver figuras II.6 y II.7). Dichos mapas presentan la evaluación, en términos relativos, de la capacidad de cada unidad ambiental para proveer el SE de infiltración, misma que se expresa en 5 rangos de porcentaje en cuanto a la provisión del SE, considerando al 0% como su ausencia y 100% como la máxima provisión del mismo.

De acuerdo a lo anterior, las áreas que tienen los valores relativos más altos (70-97%), en cuanto a su capacidad para brindar el servicio ecosistémico de infiltración, se distribuyen especialmente en la parte alta de la cuenca (ver Figura II.6, Mapa 1) en unidades del tipo II (ver Cuadro II.2 y Anexos IV y V), ocupando en conjunto, el 40% del área de la misma. Sin embargo, las áreas de mayor

extensión y con valores “de muy alto a alto” en su capacidad para proveer el servicio se concentran en las subcuencas más septentrionales (1 y 4) en unidades del tipo II (ver Cuadro II.2).

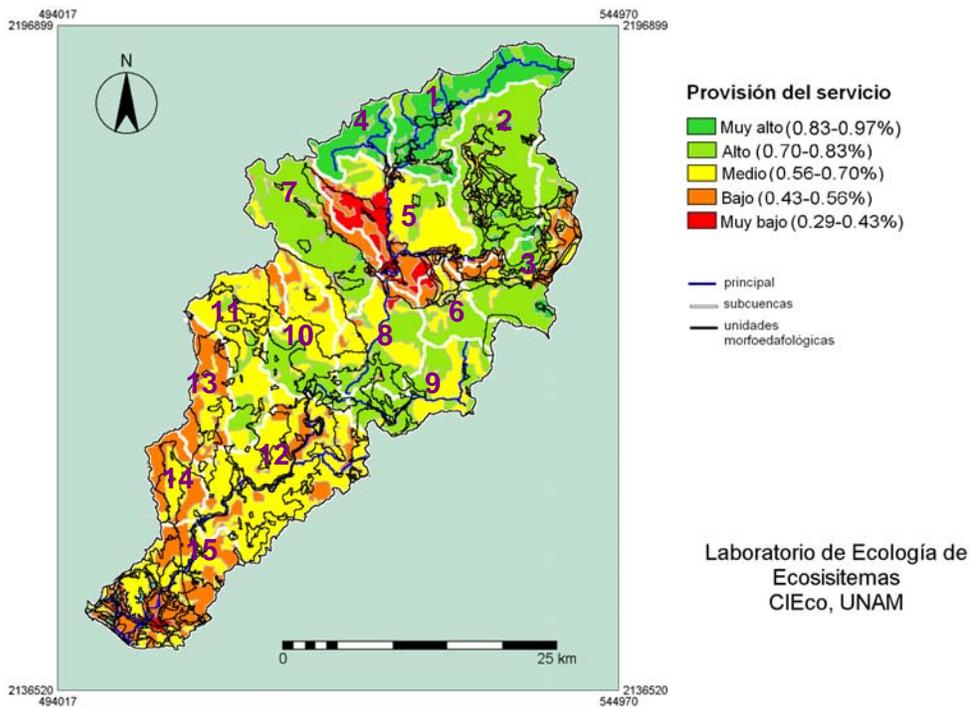


Figura II.6. Mapa 1. Estimación del servicio de infiltración en la cuenca del río Cuitzmala. La numeración corresponde a las subcuencas.

Mientras que para el caso del servicio ecosistémico de infiltración profunda, las áreas con mayor capacidad para proveerlo (78-98%), ocupan solamente el 4.6% de la superficie de la cuenca, presentándose una mayor distribución de las mismas en las subcuencas 3, 15, 2, 6, 7, 5 y 1, que a excepción de la 15, se

encuentran en la parte alta y media de la cuenca, en las unidades XVIII , XIX y V (ver Figura II.7, Mapa 2 y Cuadro II.2).

Las áreas de la parte media y baja de la cuenca (en orden de importancia las subcuencas 15, 12, 10 y 9) que siguen el cauce principal del río Cuitzmala (ver Figura II.7, Mapa 2), también registran valores que van de “muy alto a alto” en su capacidad para proveer el servicio de infiltración profunda, mismas que están representadas por las unidades VII y XIII (ver Cuadro II.2). La subcuenca 15 es caso especial, pues además de la VII destacan las unidades XXXVII, XXXIII, XLIII y XLI en su capacidad para proveer este SE.

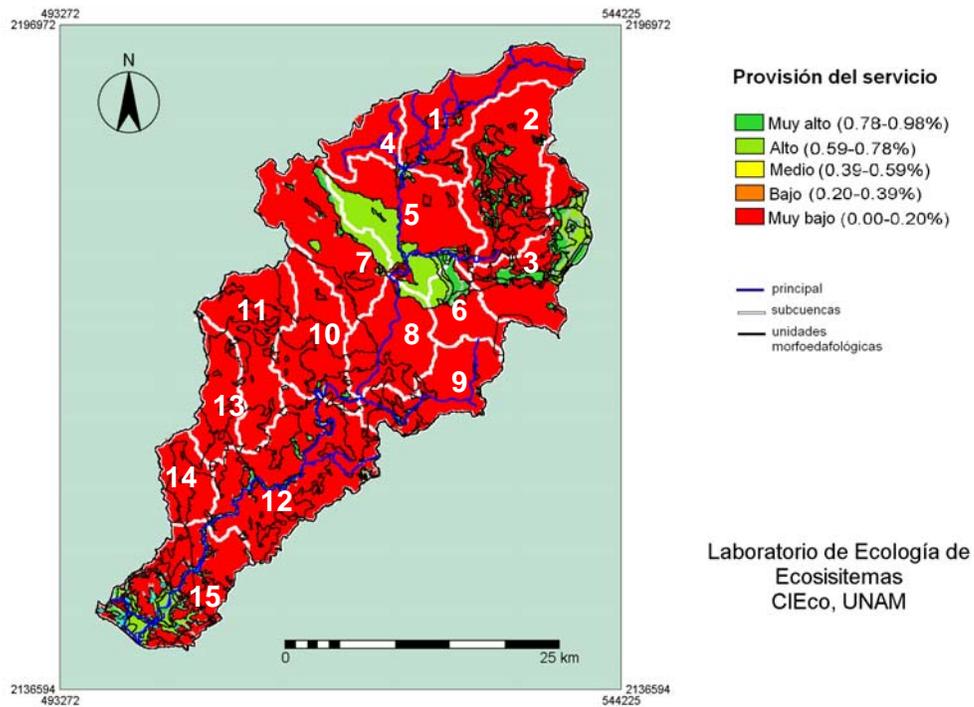


Figura II.7. Mapa 2. Estimación del servicio de infiltración profunda en la cuenca del río Cuitzmala. La numeración corresponde a las subcuencas.

Cuadro II.2. Descripción de unidades ambientales, en cuanto a su capacidad para favorecer los servicios ecosistémicos de infiltración y de infiltración profunda para cada uno de los criterios considerados en el análisis. La numeración corresponde a la empleada por Martínez (2007) para denominar a las unidades morfoedafológicas de la cuenca (ver Anexos IV y V).

Unidad ambiental	<i>Permeabilidad roca</i>	<i>Permeabilidad suelo</i>	<i>Angulo de la pendiente</i>	<i>Eficiencia de cobertura</i>
II) Piedemonte y laderas sobre granito, con Regosol eútrico, pendientes entre los 3°-15°, bosque de encino con vegetación primaria y vegetación secundaria arbórea, pastizal cultivado, bosque pino-encino.	Baja	Alta	Baja-alta	Alta-baja
xviii) Superficies planas sobre depósitos aluviales, con Feozem háplico y Cambisol crómico, Cambisol crómico y Feozem háplico, pendientes entre 1°-3°, agricultura de temporal, pastizal cultivado.	Alta	Media alta	Muy alto	Extremadamente baja- baja.
XIX) Superficies planas sobre materiales residuales, con Cambisol crómico y Regosol eútrico, pendientes de <1° - 3°, agricultura de temporal, pastizal cultivado.	Alta	Media alta	Extremadamente alta-muy alta	Extremadamente baja- baja
V) Piedemonte y laderas sobre calizas, con Leptosol lítico, pendientes entre 10°-15°, pastizal cultivado, selva mediana caducifolia y subcaducifolia con vegetación secundaria arbustiva y herbácea.	Medio alto	Bajo	Bajo	Muy alto
VII) Superficies planas y terrazas aluviales sobre depósitos aluviales, con Feozem háplico y Fluvisol eútrico, pendientes entre 1° - 5°, selva baja caducifolia y subcaducifolia con vegetación primaria y vegetación secundaria arbórea, pastizal inducido.	Alto	Medio -alto	Muy alto-alto	Medio alto
XIII) Superficies planas sobre depósitos aluviales, con Feozem háplico y Fluvisol eútrico, pendientes entre < 1° - 5°, pastizal cultivado, pastizal inducido.	Alto	Medio -alto	Extremadamente alto-alto	Bajo

Restauración

La identificación de las unidades ambientales que presentan la mayor necesidad de restauración ecológica fue realizada mediante un segundo análisis multicriterio considerando los siguientes aspectos:

- ✓ Diferencia entre la precipitación anual y la evapotranspiración actual para cada subcuenca (30%).
- ✓ La provisión del servicio de infiltración y de infiltración profunda, cuya estimación se realizó en el primer AMCE (30 %).
- ✓ Estimación del grado de deterioro en la cobertura vegetal, así como la susceptibilidad del suelo en términos de la pendiente, profundidad y erodabilidad (40%).

Empleando dichos criterios, los resultados del segundo Análisis Multicriterio Espacial pueden apreciarse en el mapa 3 (ver Figura II.8), en el cual se presenta la estimación, en términos relativos, de las necesidades de restauración ecológica de cada unidad ambiental para garantizar la provisión del SE de infiltración (tanto superficial como profunda) en la cuenca. Dicha estimación se expresa en 5 rangos de porcentaje, con base a la prioridad de restauración de las condiciones que mantienen el SE, considerando al 0% como la ausencia de la necesidad de restauración y al 100% como la máxima prioridad para la misma.

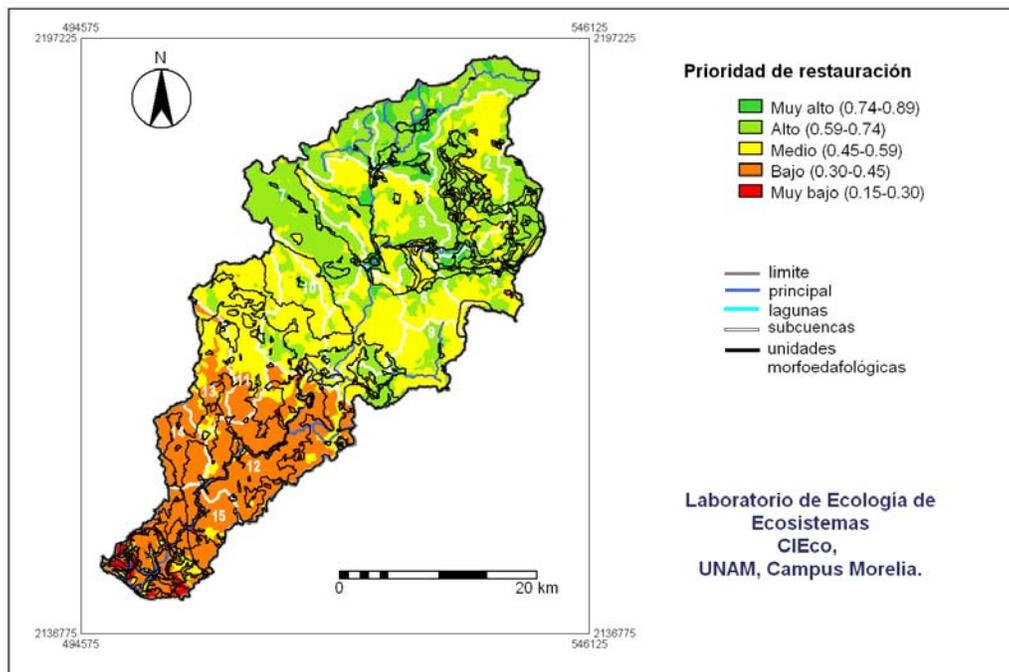


Figura II.8. Mapa 3. Propuesta de prioridades de restauración de las condiciones que favorecen el SE de infiltración en la cuenca del río Cuitzmala. La numeración corresponde a las subcuencas.

A nivel de toda la cuenca, las áreas que tienen la más alta prioridad de restauración ocupan el 3.6%, a diferencia de las que tienen alta prioridad de restauración que abarcan el 35 % del área total de la cuenca. Las áreas con necesidades de restauración en las categorías de muy alto-alto, se localizan en las subcuencas 1, 4, 3, 5, 2 8 y 7. Sin embargo, la extensión con las más altas prioridades de restauración supera el 90% de la extensión total de las subcuencas 1 y 4, y se concentra en las unidades II, IX, XII, XVII y XV. En éstas se destaca el cambio en el uso del suelo, que ha transformado los ecosistemas naturales en pastizales para la ganadería y en tierras de cultivo de temporal.

II.V.- Discusión

Como se observa en la Cuadro II.2, la influencia del ángulo de la pendiente en la provisión del servicio de infiltración, no se da de manera lineal, ya que la unidad ambiental que presenta en mayor medida dicha provisión es la II, cuyas pendientes varían entre los 3° y los 15°. Esto mismo ocurre para la unidad V en las que se registran pendientes entre los 10° y los 15°. Sin embargo, en las unidades XVIII, XIX, VII y XIII, se cumple la condición de que el agua tenga una mayor oportunidad y tiempo para infiltrarse en aquellas áreas en las que la inclinación de la pendiente es menor (Bujang et al., 2006), ya que cuentan con pendientes en el rango de <math><1^\circ - 5^\circ</math> y, por lo tanto, también se presenta una mayor provisión del servicio de infiltración.

La mayor parte de la cuenca se encuentra cubierta por suelos de tipo Regosol eútrico, los cuales, dadas sus características de textura arenosa, alta porosidad y baja capacidad de retención de agua (Burgos, 1999), le confieren a una amplia extensión de la cuenca (80%) cualidades que favorecen la prestación del servicio ecosistémico de infiltración a un nivel superficial y subsuperficial. Así, la poca profundidad de los suelos predominantes, y por consiguiente, su baja posibilidad de almacenar agua (Bruijnzeel, 2004), junto con las características de baja permeabilidad y escaso fracturamiento del granito, favorece que las áreas que proveen dicho servicio (ver Figura 4, Mapa 1) funcionen como áreas de captación y filtración (a nivel subsuperficial) del agua de lluvia y escorrentía, más que de

recarga. Este sustrato geológico de granito (ver Anexo II) constituye la unidad hidrogeológica más extendida en la cuenca (Cortés, 2001), por lo que el agua que logra infiltrarse, probablemente presente un movimiento lateral por debajo del suelo (interflujo), que favorece que una parte de esa agua llegue a las unidades ambientales donde el sustrato es más permeable (i. e. unidades V y XVIII), permitiendo la infiltración profunda e incluso la posible recarga (ver Figura II.5. Mapa 2) del acuífero.

Por otro lado, la distribución del servicio de infiltración profunda a lo largo del cauce del río, en suelos de tipo Fluvisol (ver Anexo I) de textura media y gruesa sobre sustrato de suelo aluvial (Ver Anexo VIII), hace suponer que puede tratarse de unidades (VII, XIII, XVIII, XXI y XXIV) proveedoras del servicio de infiltración profunda en términos de recarga, no del agua proveniente de la precipitación, sino más bien de la que es transportada por el cauce principal del río.

Las condiciones climáticas dominantes (Durán et al., 2002; Cotler et al., 2002), así como la presencia variable e impredecible de la precipitación (García Oliva et al., 2002) de la región Chamela, tienen un importante papel en la provisión de los SE hidrológicos en la cuenca del río Cuitzmala. Por ejemplo, la temperatura y la precipitación tienen una gran influencia en la provisión del servicio de infiltración en la parte alta de la cuenca en las subcuencas 1, 4, 7, 3 y 2, dado que la precipitación anual es mayor que la evapotranspiración potencial, y por lo tanto, el

mayor flujo de agua disponible para escorrentía se da en dichas áreas, a diferencia del que se registra en la parte media, o que es incluso nulo en la parte baja de la cuenca (Piña, 2006).

Congruente con la tendencia a nivel regional, y pese a su importancia a nivel hidrológico, los ecosistemas de la parte alta de la cuenca (subcuencas 1 y 4) han sido transformados debido a factores de tipo cultural (Castillo et al., 2006) y económico (Burgos, 1999), lo que puede observarse en las unidades II, IX, XII, XVII y XV, en las que destaca el cambio en el uso del suelo de natural hacia pastizales para la ganadería y agricultura de temporal (ver Anexo III). Esta situación disminuye la capacidad de infiltración del suelo, favorece un mayor escurrimiento superficial e incrementa la erosión del suelo (Maass et al., 1988), lo que podría disminuir la provisión de agua en términos de su calidad y cantidad, así como comprometer las zonas de recarga de la cuenca (Maass et al., 2005).

La importancia de conservar y recuperar las condiciones y áreas que hacen posible el SE de infiltración, estriba en que al tratarse de un SE de soporte, de su mantenimiento dependen otros servicios (Millennium Ecosystem Assessment, 2003) indispensables para el bienestar humano como son la provisión de agua dulce para el consumo humano, así como para el mantenimiento de las condiciones para las actividades productivas de las que dependen los habitantes de la cuenca. Siendo la cuenca del Cuitzmala un área que se encuentra en una condición de déficit hídrico la mayor parte del año (Manuel Maass com. pers.), es

del mayor interés plantear la necesidad de generar una estrategia de restauración para esas áreas. La restauración de las áreas que proveen el SE de infiltración es relevante porque garantizarían una mejor calidad del agua que escurre a nivel superficial y subsuperficial, además de que favorecerían que una mayor cantidad de agua proveniente de la precipitación y de la escorrentía, se infiltrara hacia horizontes profundos del suelo.

II.VI.-Conclusiones y recomendaciones

El suelo predominante en la cuenca de tipo Regosol eútrico, le confiere, en términos relativos, una baja capacidad de retención de agua que favorece la prestación del SE de infiltración a un nivel superficial y subsuperficial en gran parte de la cuenca, sin embargo, sólo en el 40% de su superficie el SE está presente en valores relativos más altos, debido principalmente a la presencia de coberturas mejor conservadas.

Tratándose de suelos someros con baja posibilidad para almacenar agua en un sustrato geológico de granito poco permeable y con escaso fracturamiento, las áreas que proveen el SE funcionan como áreas de captación y filtración (a nivel subsuperficial) más que como zonas de recarga. Estas últimas se presentan en una extensión reducida de la cuenca, por lo que las unidades con mayor capacidad para proveer el SE de infiltración profunda tan sólo ocupan el 4.6% del área de la misma.

En el 37% de la cuenca se sugiere la realización de actividades de restauración ecológica, sin embargo, es en la parte alta en donde las unidades ambientales que brindan el SE de infiltración e infiltración profunda coinciden con áreas en las que la vegetación natural fue transformada para la realización de actividades productivas. Es por ello que la parte alta de la cuenca presenta una elevada proporción de unidades ambientales que requieren acciones de restauración de manera más prioritaria.

Aunque el presente trabajo se realizó considerando únicamente a la cuenca hidrográfica, sería relevante, dentro de una lógica de manejo adaptativo, que la investigación futura busque conocer los límites y condición de la cuenca hidrológica, para comparar tanto a la superficial como a la subterránea, y conocer cómo la dinámica hidrológica afecta la provisión del SE de infiltración y de otros SEs, como el de suministro de agua dulce.

Asimismo, puesto que los resultados obtenidos presentan un amplio grado de incertidumbre, al provenir de información de tipo regional, sería pertinente realizar mediciones puntuales (por ejemplo a nivel de parcela, o unidad morfoedafológica) para generar información a escalas de mayor detalle acerca de la capacidad de infiltración, conductividad hidráulica y cualidades de los suelos, así como, sobre la forma en que la estacionalidad (lluvias y secas) y los cambios en la eficiencia de cobertura afectan la disponibilidad de agua, y por consiguiente, a la provisión de SEs. De igual manera, es necesario afinar el proceso para la ponderación de los criterios propuestos para estimar tanto la provisión del SE, como de las unidades que requieren restauración ecológica.

Finalmente, sería recomendable que la presente estimación se complemente con los datos generados por la investigación socioambiental acerca de los factores políticos, culturales y de costo beneficio que pudieran hacer factible o no, la implementación de acciones de manejo y restauración en la cuenca.

II.VII.- Bibliografía citada

Angelaki A, M. Sakellariou-Makrantonaki y C. Tzimopoulos. 2004. Laboratory experiments and estimation of cumulative infiltration and sorptivity. *Water, Air, And Soil Pollution: Focus* 4: 241–251.

Ávila, P. 2007. Las cuencas hidrológicas de México y su vulnerabilidad socioambiental por el agua. En: *Sustentabilidad y desarrollo ambiental. Agenda para el Desarrollo 14*. José Luis Calva (Coord.). Edit. UNAM, H Cámara de Diputados LX Legislatura, Miguel Ángel Porrúa.

Barradas, V., y L. Fanjul. 1985. Equilibrio hídrico y evapotranspiración en una selva baja caducifolia de la costa de Jalisco, México. *Biótica* 10:2.

Bharati, L., K.H. Lee, T.M. Isenhardt y R.C. Schultz. 2002. Soil-water infiltration under crops, pasture, and established riparian buffer in Midwestern USA. *Agroforestry Systems* 56: 249–257.

Bruijnzeel, L.A. 2004. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees?. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 104 :185–228.

Bujang B.K., H. A. Faisal y T.H. Low. 2006. Water infiltration characteristics of unsaturated soil slope and its effect on suction and stability. *Geotechnical and Geological Engineering* 24:1293 -1306.

Burgos, A. L. 1999. Dinámica hidrológica del bosque tropical seco en Chamela, Jalisco, México. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.

Campos A., D. F. 1992. Procesos del ciclo hidrológico, UASLP, San Luis Potosí, México.

Castillo, A., A. Pujadas, M.A. Magaña, L. Martínez y C. Godínez. 2006. Comunicación para la conservación: análisis y propuestas para la Reserva de la Biósfera Chamela-Cuixmala, Jalisco. En: Barahona A. y L. Almeida (Eds). *Educación para la Conservación*. Facultad de Ciencias y Programa Universitario de Medio Ambiente UNAM: Pp: 93-109.

CETENAL. 1975a. Carta Edafológica. Comisión de Estudios del Territorio Nacional, México D.F.

CETENAL. 1975b. Carta Geológica 1:50 000. Comisión de Estudios del Territorio Nacional, México D.F.

Cortés, F. 2001, Estudio hidrogeológico de la subcuenca río Cuitzmala, en la costa de Jalisco. Tesis. Facultad de Ingeniería, UNAM, México, D.F.

Cotler, H. 2003. El uso de la información edáfica en los estudios ambientales. *Gaceta Ecológica* 61: 33-42.

Cotler, H, E. Durán y C. Siebe. 2002. Caracterización morfo-edafológica y calidad de sitio de un bosque tropical caducifolio. En: Noguera, F. A., J.H. Vega, A. N. García-Aldrete y M. Quesada (Eds.). *Historia Natural de Chamela*, Instituto de Biología, UNAM. Pp:17-79.

De Ita-Martínez, C. y V. Barradas. 1986. El clima y los patrones de producción agrícola en una selva baja caducifolia de la costa de Jalisco, México. *Biótica* 11: 237-245.

Durán, E., P. Balvanera, E. Lott, G. Segura, A. Pérez-Jiménez, A. Islas y M. Franco. 2002. Estructura, composición y dinámica de la vegetación. En: Noguera, F. A., J.H. Vega, A. N. García-Aldrete y M. Quesada (Eds.). *Historia Natural de Chamela*, Instituto de Biología, UNAM. Pp: 443-472.

Ehrenfeld, J.G. 2000. Defining the limits of restoration: the need for realistic goals. *Restoration Ecology* 8 (1): 2-9.

García-Oliva, F., E. Ezcurra y L. Galicia . 1991. Pattern of rainfall distribution in the Central Pacific Coast of Mexico. *Geogr. Ann.* 73 A(3-4):179-186

García-Oliva, F., R. Martínez-Lugo y J. M. Maass. 1995. Long-term net soil erosion as determined by ¹³⁷Cs redistribution in an undisturbed and perturbed tropical deciduous forest ecosystem. *Geoderma* 68:135-147.

García-Oliva, F., A. Camou y J. M. Maass. 2002. El clima de la Región Central de la costa del Pacífico Mexicano. En *Historia Natural de Chamela*. F. A. Noguera, J. H. Vega, A. N. García-Aldrete y M. Quesada (Eds.). Instituto de Biología, UNAM, México, D.F.

INEGI, 2006. Base de datos sobre perfiles de suelos en la Costa de Jalisco. Archivo de trabajo digital. Departamento de Edafología, INEGI.

INE, SEMARNAT e Instituto de Geografía, UNAM. 2000. Uso de suelo y vegetación 2000, escala 1:250,000. Cobertura preparada para el análisis de cambio de uso del suelo del Inventario Nacional Forestal, 2000. INE, México D.F.

INE, 2003. Base cartográfica y digital mapas de la Cuenca del Río Cuitzmala.

Maass, J. M., P. Balvanera, A. Castillo, G. C. Daily, H. A. Mooney, P. Ehrlich, M. Quesada, A. Miranda, V. J. Jaramillo, F. García-Oliva, A. Martínez-Yrizar, H. Cotler, J. López-Blanco, A. Pérez-Jiménez, A. Búrquez, C. Tinoco, G. Ceballos, L. Barraza, R. Ayala, and J. Sarukhán. 2005. Ecosystem services of tropical dry forests: insights from long-term ecological and social research on the Pacific Coast of Mexico. *Ecology and Society* 10(1): 17. [online] URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol10/iss1/art17/>

Maass, J.M., V.J. Jaramillo, A. Martínez-Yrizar, F. García-Oliva, A. Pérez-Jiménez y J. Sarukhán. 2002. Aspectos funcionales del ecosistema de Selva Baja Caducifolia en Chamela, Jalisco. En: F. A. Noguera, J.H. Vega, A. N. García-Aldrete y M. Quesada. (Eds.). *Historia Natural de Chamela*, Instituto de Biología, UNAM. Pp: 525-542.

Maass, J. M., C. Jordan and J. Sarukhán. 1988. Soil erosion and nutrient losses in a seasonal tropical agroecosystems under various management techniques. *Journal Applied of Ecology* 25:595-607.

Maderey, L. E. 2005. Principios de hidrogeografía. Estudio del ciclo hidrológico. *Geografía para el siglo XXI. Serie Textos Universitarios Num. 1.* Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía. México, D. F.

Martínez, T. S. 2007. La agregación del suelo como indicador de calidad en un ecosistema tropical seco. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de México.

Mendoza, G.A., P. Macoun, R. Prabhu, D. Sukadri, H. Purnomo y H. Hartanto. 1999. Guidelines for applying multi-criteria analysis to the assessment of criteria and indicators. 9 *The Criteria & Indicators Toolbox Series.* Center for International Forestry Research, Jakarta.

Meléndez, J. F. 1999. Hidrogeografía de la cuenca del río Cuitzmala, Jalisco. Tesis de Maestría. Facultad de Filosofía y Letras, Departamento de Geografía, UNAM.

Millennium Ecosystem Assessment. 2003. *Ecosystems and human well-being: a framework for assessment.* Island Press, Washington, D.C., USA.

Natural Resources Conservation Service. 2007. *Soil Survey Handbook*, title 430-VI. Soil Survey Staff.National.

Rosignol, J.P. 1987. La morfoedafología: un método de estudio del medio biofísico para su ordenación. En: Geissert, D. y J.P. Rosignol. 1987. *La morfoedafología en la ordenación de los paisajes rurales: conceptos y primeras aplicaciones en México.* INIREB-ORSTOM, Xalapa, México.

Secretaría de Programación y Presupuesto. 1981..Carta de Hidrología de Aguas Subterráneas, Manzanillo E13-2-5, 1:250,000.

Sharifi, M.A. y V. Retsios. 2003. Site selection for waste disposal through spatial multiple criteria decision analysis. In: Proceedings of the 3rd International conference on decision support for telecommunications and information society, 4-6 September 2003, Warsaw, Poland.

Stanford, J.A. y G.C. Poole. 1996. A protocol for ecosystem management. *Ecological Applications* 6(3):741-744.

Piña, P. C, 2007. Regionalización eco-hidrológica de la cuenca del río Cuitzmala, Jalisco, México. Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas. Centro de Investigaciones en Ecosistemas, UNAM.

Perló, M .2006. Crisis hidráulica y políticas públicas en México: problemas y alternativas. En: Agua y Lagos. Una mirada desde lo global hasta lo local . Patricia Ávila Coord. Biblioteca Michoacana. Secretaría de Cultura, Gobierno del Estado de Michoacán, Morelia, Mich.

Capítulo III.- Provisión del servicio ecosistémico de control de la erosión hídrica y prioridades de restauración en la cuenca del Río Cuitzmala, México.

Resumen

La cuenca del Río Cuitzmala se encuentra dentro de la región Chamela en el Pacífico mexicano, misma que se caracteriza por recibir una precipitación anual escasa pero de alto poder erosivo (García Oliva et al., 1995), así como por un intenso proceso de cambio en el uso de suelo. Ambos factores pueden afectar la calidad del agua dulce para el consumo humano y la requerida por las actividades agropecuarias de la cuenca. Por ello se consideró relevante estimar, de manera general, la capacidad de distintas unidades ambientales para proveer el servicio ecosistémico (SE) de regulación de la erosión hídrica. Para ello, se empleó el Análisis Multicriterio Espacial (AMCE) y se tomaron en cuenta 4 de los factores considerados por la USLE (erosividad, erodabilidad, cobertura, longitud y gradiente de la pendiente). El 18% del área de la cuenca provee en mayor medida el SE de regulación de la erosión hídrica, en especial la parte baja que es la más conservada y en donde el tipo de vegetación que predomina es la selva baja caducifolia. El 21% de la cuenca requiere acciones de restauración; en la parte alta algunas de esas zonas coinciden con áreas importantes para la provisión del SE de infiltración.

III.I.- Introducción

Los suelos de los ecosistemas tropicales se caracterizan por una elevada susceptibilidad a la erosión (Maass y García Oliva, 1990), lo que tiene importantes implicaciones para su manejo. Tal es el caso de la región de Chamela en la Costa de Jalisco, en donde la precipitación anual se concentra en unas cuantas tormentas con alto nivel de erosividad, y que constituyen una importante limitante para las actividades agrícolas de la región (García Oliva, 1995). No obstante, se registran intensos procesos de desmonte y de cambio en el uso del suelo, en los que la vegetación natural es transformada en tierras agrícolas y pastizales para la ganadería, lo que ha exacerbado la pérdida de suelo, incrementado la escorrentía

y reducido las tasas de infiltración (Cotler y Ortega, 2006; Maass et al., 2005). La problemática descrita ejerce una importante presión sobre los sistemas naturales y productivos de los que dependen los habitantes de la región, particularmente para asegurar la calidad del agua dulce que es necesaria para el consumo humano, así como para favorecer la capacidad de infiltración de los suelos (Maass et al., 2005) en la región. En este contexto, es relevante que los distintos tipos de actores (i.e. habitantes, agricultores, ganaderos y tomadores de decisiones) reconozcan los beneficios que los ecosistemas les aportan (Daily, 1997), y que gracias a los cuales es posible que mantengan su nivel de bienestar. Estos beneficios del ecosistema, conocidos como servicios ecosistémicos (SEs), incluyen procesos que regulan, modulan, controlan o estabilizan a los ciclos de materia y energía en los ecosistemas. Como ejemplos pueden citarse, el mantenimiento de la calidad del aire, la regulación del clima, el control de la erosión, la regulación de las enfermedades humanas y la purificación del agua (Millennium Ecosystem Assessment, 2003).

En el marco de la investigación ecológica a largo plazo que se realiza en la región Chamela, Maass y colaboradores (2005) señalaron la importancia de evaluar el SE de regulación de la erosión hídrica en la cuenca del río Cuitzmala. Dicho SE puede ser entendido como el conjunto de condiciones proporcionadas por los ecosistemas que hacen posible el control de la pérdida del suelo, sin el cual el impacto de las gotas de lluvia o el arrastre provocado por la escorrentía causarían el desprendimiento del suelo.

Una manera de abordar el análisis de los SEs es mediante la comprensión de los procesos de los cuales dependen, para el caso del SE de regulación de la erosión hídrica, se emplearon 4 de los factores considerados por la ecuación universal de la pérdida de suelos USLE: 1.- Factor R, la erosividad que describe el efecto erosivo de las precipitaciones sobre el suelo (FAO, 1979; Jordán y Bellinfante, 2000), 2.- Factor K, la erodabilidad que representa la susceptibilidad del suelo a la erosión hídrica (Natural Resources Conservation Service, 2007), 3.-Factor SL, la pendiente en términos de su longitud y gradiente, ya que el potencial de erosión se incrementa conforme aumenta este factor (Millward y Mersey, 1999),y 4.-Factor C, la cobertura, que considera el efecto de protección que ejerce la cubierta vegetal sobre el suelo ante la lluvia o la escorrentía (Kirkby y Morgan,1984; Bruijnzeel, 2004).

La cuenca hidrográfica en su condición de sistema abierto (Sarukhán y Maass, 1990) es adecuada como unidad de evaluación del SE de regulación de la erosión hídrica, ya que su parteaguas constituye un límite natural y bien definido, que facilita la evaluación de los balances de energía y materia que ocurren en ella, como es el caso de los flujos hidrológicos (Maass et al. 2002) y la pérdida de suelo. Las cuencas se consideran unidades funcionales que siguen una organización jerárquica, de tal manera que, una cuenca está dividida en subcuencas, cada subcuenca a su vez puede contener a otras subcuencas de menor tamaño, y todas éstas pueden formar parte de una cuenca mayor (Maass et al.2002). Asimismo, las subcuencas pueden contener a otro tipo de unidades

como las morfoedafológicas, estas últimas integran aspectos geomorfológicos y edáficos mediante un proceso que involucra el análisis y síntesis del paisaje, así como de su dinámica y evolución (Rossignol, 1987). Cada unidad morfoedafológica tiene un potencial, una función y una vulnerabilidad distinta (Cotler, 2003), por lo que desde este punto de vista es posible estimar la capacidad de las distintas unidades para proveer el SE de regulación de erosión hídrica a lo largo de una cuenca. Dicha capacidad puede ser replanteada como un problema de análisis objetivo-multicriterio, en el que se evalúa a cada unidad, en términos del grado en que cumple el objetivo (regulación de la erosión hídrica). Se considera que dicho cumplimiento, es resultado de la influencia que ejercen una serie de criterios, cuyos valores pueden representarse espacialmente a través de capas temáticas o mapas (mapas-criterio). Mediante determinadas reglas de decisión (algoritmos) se indica la forma en que los criterios se combinan para realizar la evaluación (Barredo, 1996) de cada una de las unidades, lo que permite jerarquizarlas y elegir las que resulten óptimas para el cumplimiento del objetivo (i.e., la provisión de SE). Este resultado es información útil para el proceso de toma de decisiones (Mendoza et al., 1999), por ejemplo, en la elección de áreas que, de acuerdo a su grado de deterioro o transformación por efecto de la actividad humana, requieran acciones de restauración ecológica (SER, 2002) para mejorar su capacidad de proveer SEs.

El presente trabajo tuvo como objetivo hacer una prospección general sobre la capacidad que tienen distintas unidades ambientales para brindar el SE de

regulación de la erosión hídrica, así como identificar las áreas que tienen una mayor prioridad para las acciones de restauración ecológica relacionadas a dicho servicio, utilizando la cuenca del Río Cuitzmala, en el Pacífico mexicano como estudio de caso.

III.II.-Sitio de estudio

La vegetación natural de la zona ha sido transformada en pastizales para la ganadería y cultivos agrícolas mediante el desmonte y la quema (Burgos, 1999). La mayoría de los pastizales y de las tierras agrícolas dependen de la lluvia, mientras que los cultivos de las zonas aluviales son irrigados (Maass et al., 2005). La cuenca se encuentra dentro de una región cuyo patrón de precipitación es marcadamente estacional, pues se concentra cada año de junio a octubre, meses en los que se presentan ciclones tropicales muy intensos que llegan a aportar hasta el 50% de la precipitación anual; asimismo, ocurren lluvias convectivas de baja intensidad y escasa precipitación (García Oliva et al., 2002; García Oliva et al., 1991). Las lluvias de origen ciclónico, poco frecuentes pero muy intensas, tienen un alto poder erosivo, que llega a alcanzar valores superiores a los 13,000 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ (García Oliva et al., 1995).

En la zona predominan las pendientes mayores a los 10° (Meléndez, 1999) por lo que han sido documentados los efectos que sobre ellas tiene la erosión (De Ita-Martínez y Barradas, 1986). Así, Maass y colaboradores (1988) reportaron que en parcelas sembradas con maíz en suelos de tipo Regosol y pendientes del 41%, se presentó una pérdida de suelo hasta de 59 Mg ha⁻¹ año⁻¹, en contraste con parcelas de selva baja caducifolia conservada, en donde la pérdida de suelo nunca sobrepasó los 0.50 Mg ha⁻¹ año⁻¹. En base a muestreos edafológicos realizados en la cuenca, Martínez (2007) reportó que para suelos tipo Regosol, la

calidad de suelo en áreas con selva baja caducifolia conservada fue mejor que la de parcelas con pastizal cultivado, debido a que este último se encuentra bajo un manejo ganadero extensivo, que deteriora sus propiedades edáficas en variables como la porosidad total, carbono orgánico, pH y Σ Bases, humedad residual y densidad aparente.

III.III.-Materiales y métodos

La investigación se realizó siguiendo el protocolo de manejo de ecosistemas (Stanford y Poole, 1996), por lo que el proceso metodológico se describe de acuerdo a cuatro de las etapas propuestas por el mismo (ver Figura III.1):

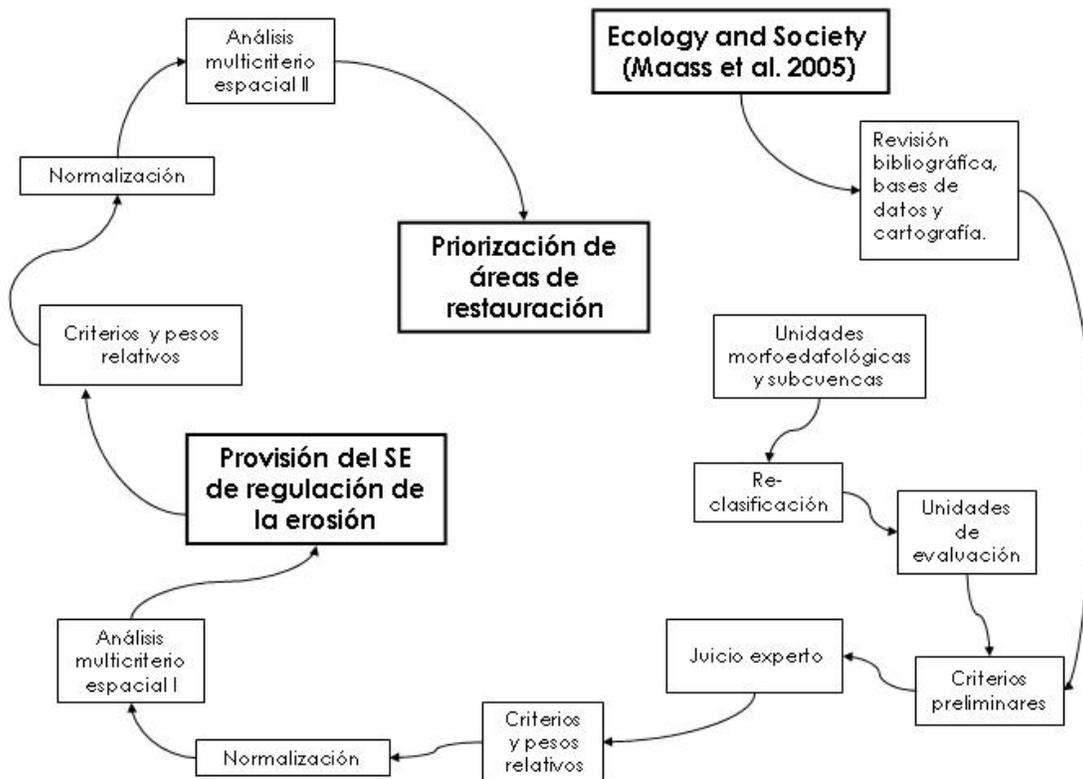


Figura III.1. Esquema del proceso metodológico empleado.

1.- Síntesis del conocimiento existente sobre la cuenca: Fue revisada la información bibliográfica sobre el tema de erosión, bases de datos y mapas temáticos acerca de la zona de estudio sobre los siguientes temas: tipos de vegetación, suelos y geología, así como el cálculo de balance hídrico.

2.- Definición del sistema de manejo: Tomando como referencia los factores considerados en la USLE, se realizó una primera propuesta de los criterios y variables que serían empleados para estimar la importancia relativa del SE a lo largo de la cuenca. Las unidades ambientales empleadas para la evaluación fueron generadas al reclasificar las unidades morfoedafológicas propuestas por Martínez (2007, ver Anexos IV y V) y la delimitación por subcuencas realizada por Piña (2006, ver Anexo VI).

3.-Identificación de objetivos de manejo: Se diseñó una guía para la realización de entrevistas (ver ejemplo en el Anexo VIIa) que sirvió de base para consultar a distintos expertos (ver Anexo VIIb), con el objeto de verificar la pertinencia tanto de los criterios que habían sido propuestos para la evaluación del SE, como, de las variables para estimarlo y cuando fue posible, acerca de la importancia relativa (ponderación) de cada uno para la evaluación del SE. Los resultados sirvieron para generar una serie mapas-criterio, mediante el cálculo de cada uno de los factores de la ecuación universal de pérdida de suelos (USLE).

1) La erosividad se estimó mediante el Índice Modificado de Fournier (FAO, 1979; Jordán y Bellinfante, 2000, Pando et al. 2003; ver Figura III.2) a partir de los datos de precipitación generados por Piña (2006) para cada subcuenca (ver Anexo IX).

$$R = \frac{\sum P^2}{P}$$

R = Índice Modificado de Fournier,
P = precipitación promedio mensual,
P = precipitación promedio anual.

Figura III.2. Algoritmo correspondiente al Índice Modificado de Fournier (FAO, 1979).

- 2) La erodabilidad fue calculada mediante el nomograma de la USDA (Natural Resources Conservation Service, 2007, Rattan, 1990), considerando los datos de textura del suelo, estructura de agregados, permeabilidad (en términos de la conductividad hidráulica saturada) de acuerdo a lo reportado para cada clase textural (US Army Corps of Engineers, 1994), así como el contenido de materia orgánica. Los datos anteriores fueron obtenidos a partir de una base de datos sobre perfiles de suelo realizados en la costa de Jalisco que fue proporcionada por el INEGI (2006); los valores así obtenidos fueron promediados para cada tipo de suelo (ver Anexo VIII).
- 3) Con respecto a la pendiente, y de acuerdo a la metodología propuesta por Toxopeus (2004), se calcularon por separado los factores de longitud y gradiente, para después integrarlos como un solo factor. La longitud (L) se definió como la distancia horizontal entre el punto donde inicia el escurrimiento hasta el punto donde decrece la pendiente, al grado de producir sedimentación o hasta el punto en el que el escurrimiento

encuentra un curso bien definido. El gradiente de la pendiente es el segmento de pendiente, expresado como un porcentaje (Kirkby y Morgan, 1984) o una unidad angular.

- 4) La cobertura se determinó a partir de las bases de datos del Inventario Nacional Forestal, 2000 (INE et al. 2000), asignando valores a cada tipo de vegetación y subcomunidad¹, de acuerdo a la capacidad en que cada cobertura proporciona protección al suelo (ver Anexo X).

Los mapas-criterio correspondientes a cada uno de los factores de la ecuación USLE considerados, implicaban costos en términos de la provisión del SE de regulación de la erosión (ver Figura III.3. Esquema de decisión multicriterio). Dado que los mapas-criterio obtenidos en el paso anterior estaban expresados en distintas unidades de medida, se realizó un proceso de normalización para transformarlos a una escala común que permitiera su manejo y comparación. Asimismo, la evaluación requirió de un proceso de ponderación para establecer el peso de cada criterio (Mendoza, 1999), mismo que determinó su importancia relativa en relación a los otros criterios, así como su influencia en la provisión del SE, puesto que cada criterio equivalía a los factores de la USLE, la ponderación atribuyó a cada uno la misma importancia relativa. Sin embargo, a sugerencia de la consulta expertos, también se probó el peso relativo del 10% y del 5% para el

¹ Se define por la presencia de vegetación secundaria. Indica alguna fase de transformación en donde la vegetación original (primaria) ha sido eliminada o perturbada.

factor C (la cobertura), con el objeto de observar si se presentaban variaciones notables a nivel espacial en cuanto a la capacidad de provisión del SE, al no ocurrir lo anterior, el análisis consideró la ponderación original.

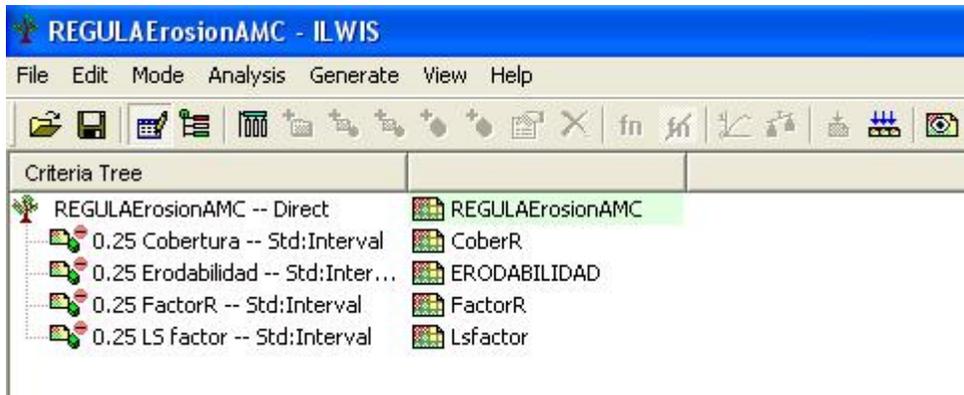


Figura III.3. Esquema de decisión multicriterio para estimar la provisión del SE. de regulación de la erosión hídrica. Los números indican la ponderación asignada a cada criterio.

Mediante la aplicación del método de Análisis Multicriterio denominado Sumatoria Lineal Ponderada (ver Figura III.4), se asignó un valor de capacidad para la provisión del servicio de regulación de la erosión hídrica a las distintas unidades ambientales. Considerando que a cada una de las unidades correspondió un valor determinado en el mapa-criterio, dicho valor fue multiplicado por el peso asignado a ese criterio. La sumatoria de los productos de todos los criterios correspondió al valor de capacidad para la provisión del SE de regulación de la erosión hídrica de esa unidad ambiental.

$$SE = \sum_{j=1}^n w_j x_{ij}$$

SE : capacidad para la provisión del SE de regulación de la erosión hídrica.

w_j : peso del criterio

x_{ij} : valor de la unidad ambiental *i* en el criterio *j*

Figura III.4. Algoritmo empleado por la metodología de AMCE Sumatoria Lineal Ponderada para calcular los puntajes de las unidades ambientales.

Mediante el módulo de AMC del programa ILWIS el proceso se repitió para todos los criterios y todas las unidades ambientales de la cuenca, lo que permitió obtener un mapa-resultado en el cual se pudieron identificar las zonas con la mayor capacidad para la provisión del SE de regulación de la erosión hídrica, constituida por aquellas unidades que obtuvieron los valores de capacidad más altos (valores cercanos al 100%). Éstos fueron analizados considerando el valor de provisión del SE y la extensión del área que lo proporciona en las diferentes unidades ambientales por subcuenca.

4.- Desarrollo de una estrategia de manejo:

Para la determinación de las áreas con necesidades de restauración ecológica en la cuenca fueron considerados como criterios, la provisión del SE de regulación de la erosión hídrica, la diferencia entre la precipitación y evapotranspiración anuales (Piña, 2006; ver Anexo IX), el grado de deterioro de la cobertura vegetal (ver Anexo X) y factores que fueron considerados como indicadores de susceptibilidad

a la erosión: erodabilidad (ver Anexo VIII), factor de la pendiente LS (ver Anexo XV) y erosividad (ver Anexo XIV). A partir de dichos criterios se generó o reutilizó una segunda serie de mapas-criterio (ver Esquema de decisión multicriterio) con los cuales se realizó un segundo Análisis Multicriterio Espacial. Se consideró que los valores expresados en dichos mapas-criterio representaban tanto beneficios, en la medida en que contribuían a la meta de restauración de la cuenca, como costos, en términos de disminuir esta meta. Por ejemplo, el caso del mapa-criterio que refiere la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración anuales, fue considerado como beneficio, ya que en dicho mapa, las áreas con valores más altos son donde el efecto erosivo del agua pudiera ser mayor y por tanto las acciones de restauración tendrían mayor sentido. Los factores de la ecuación USLE que en conjunto pueden ser considerados como indicadores de la susceptibilidad a la erosión (Factores RKLS) o de la erosión potencial, también siguieron la lógica anterior, por lo que representaron beneficios en términos de la meta de la restauración, para proceder con el análisis se elaboró un mapa-criterio que consideró dichos factores (erodabilidad, factor de la pendiente LS y erosividad) mediante la ecuación USLE y de acuerdo a la metodología propuesta por Toxopeus (2004).

El caso contrario, fue el mapa-criterio correspondiente a la provisión del SE (de regulación erosión hídrica) que fue calificado como costo, puesto que las áreas con valores más altos de provisión del SE requerían de menor restauración, por lo que su contribución a la meta sería menor (ver Figura III.5.). Los mapas fueron

normalizados y se realizó el segundo AMCE para todas las unidades ambientales de las subcuencas. Los resultados fueron una base de datos y un mapa acerca de las prioridades de restauración asociadas con el SE de regulación de la erosión hídrica en la cuenca.

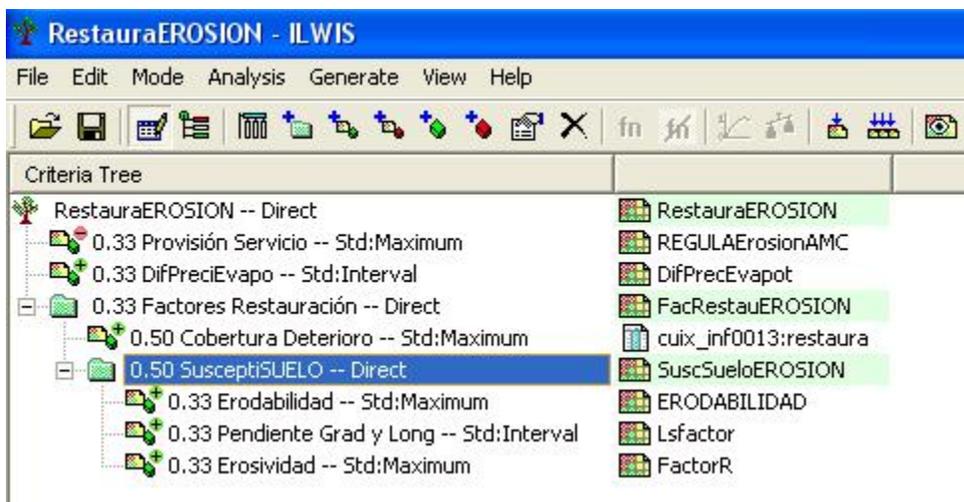


Figura III.5. Esquema de decisión multicriterio para la determinación de las áreas que requieren restauración ecológica. Los números indican la ponderación asignada a cada criterio y grupo de criterios.

III.IV.- Resultados

Regulación de la erosión hídrica

Las subcuencas que presentaron la mayor parte de su territorio con valores relativos más altos (81-100 %) en cuanto a su capacidad para brindar el SE de regulación de la erosión hídrica (ver Figura III.6.), ocuparon en conjunto el 18% del área de la cuenca, concentrándose en la parte baja de la misma (subcuencas 14, 12 y 13, y unidades del tipo II y IX , subcuenca 15 luego de la unidades II, XXXII y XXVII, ver Cuadro III.1 y Anexos IV y V). Las unidades mencionadas registran, para cada uno de los criterios considerados en el análisis para estimar la capacidad de provisión del SE (ver esquema de decisión multicriterio), valores medios en cuanto al factor R (erosividad), bajos en el factor K (erodabilidad) y muy bajo-bajo en cuanto al factor SL. La combinación de dichos factores de acuerdo a la ecuación USLE, revelan una muy baja susceptibilidad a la erosión o la erosión potencial (ver Figura III.7 y Cuadro III.2). En dichas unidades el factor C alcanza valores “muy altos-medio altos” ya que las coberturas predominantes son selva baja caducifolia y subcaducifolia, así como, selva mediana caducifolia y subcaducifolia (ambas con vegetación primaria y vegetación secundaria arbórea). Destaca la subcuenca 14 cuya superficie se encuentra totalmente cubierta con selva baja caducifolia.

Cuadro III.1. Descripción de unidades ambientales en cuanto a su capacidad para favorecer el servicio ecosistémico de regulación de la erosión hídrica para cada uno de los criterios considerados en el análisis en la cuenca del Río Cuitzmala. La numeración corresponde a la empleada por Martínez (2007) para denominar a las unidades morfoedafológicas de la cuenca (ver Anexos IV y V).

Unidad ambiental	Sub-cuencas	Erosividad (ver Anexo XIV)	Erodabilidad (ver Anexo VIII)	Susceptibilidad del suelo a la erosión (resultado de los factores RKLS, ver Figura. III.7 y Cuadro III.2).	Capacidad de la cobertura para proteger el suelo (ver Anexo X).
II Piedemonte y Laderas sobre granito con Regosol eútrico y Phaeozem háplico, pendientes entre 1° - 5°, selva baja caducifolia con veg. primaria y veg. secundaria arbórea, selva mediana caducifolia y subcaducifolia con veg. primaria y veg. secundaria arbórea.	14, 15, 12 y 13,	Medio	Bajo	Muy bajo	Muy alto-medio alto
IX Superficies Planas y Piedemonte sobre granito con Regosol eútrico y Phaeozem háplico, pendientes entre < 1° y 3°, selva baja caducifolia y subcaducifolia con veg. primaria y veg. secundaria arbórea, selva baja caducifolia y subcaducifolia con veg. secundaria arbustiva y herbácea.	14, 15, 12 y 13	Medio	Bajo	Muy bajo	Medio alto-medio bajo.
XXXII Superficies Planas y Laderas sobre areniscas-conglomerados con Regosol eútrico y Phaeozem háplico, pendientes entre < 1° y 5°, selva baja caducifolia y subcaducifolia veg. primaria y veg. secundaria arbórea.	15	Medio	Bajo	Muy bajo	Medio alto.
XXVII Superficies Planas y Laderas sobre volcano clástico y toba con Regosol eútrico, Phaeozem háplico y Leptosol lítico, pendientes entre < 1° y 5°, selva baja caducifolia y subcaducifolia con veg. primaria y veg. secundaria arbórea, selva mediana caducifolia y subcaducifolia con veg. primaria y veg. secundaria arbórea.	15	Medio	Bajo	Muy bajo	Muy alto-medio alto.

Las subcuencas que presentaron la mayor parte de su territorio con valores relativos altos (63-81%) en cuanto a su capacidad para brindar el SE de regulación de la erosión hídrica (ver Figura III.6) ocupan el 37% del área de la cuenca y se distribuyen principalmente en la parte media de ésta (subcuencas 11, 10, 8 y 9 en las unidades II, IX y III). Las áreas con valores medios (44-63%) se encuentran en la parte media-superior y ocupan el 34% del área de la cuenca (subcuencas 6 y 7 en las unidades II, V y IX, también subcuencas 4, 1 y 2 unidades II y IX).

A diferencia de las anteriores, sobresalen las subcuencas 5 y 3 por tener la menor capacidad para brindar el SE. En ellas predomina la agricultura de temporal y el pastizal cultivado. La subcuenca 5 (unidad V) tiene valores en la categoría de “muy alto” en cuanto a la erodabilidad de sus suelos (Leptosol), predominan las pendientes iguales o mayores a los 10° (10°-15°) y tiene un valor de erosividad climática bajo. En la subcuenca 3, la erodabilidad de sus suelos varía de los valores medios a los muy altos, tiene pendientes más bien planas (<1° y 3°), pero posee un valor de erosividad climática muy alto.

Llaman la atención áreas en las distintas subcuencas y unidades, tales como la subcuenca 5 (unidad V), la subcuenca 6 (unidades V y XVIII), la subcuenca 3 (unidades XVIII, XIX, XXII y XXIV), y la subcuenca 7 (unidad V), ya que aunque registran una menor capacidad para proveer el SE de regulación de la erosión (valores medio-bajo-muy bajo), coinciden con unidades ambientales en las que se

registran valores alto-muy alto del SE de infiltración profunda. Lo mismo ocurre en las subcuencas 1 y 4 (unidad II), donde se observa coincidencia entre las áreas de menor provisión del SE de erosión con las áreas de valores más altos para el SE de infiltración superficial (ver capítulo 2).

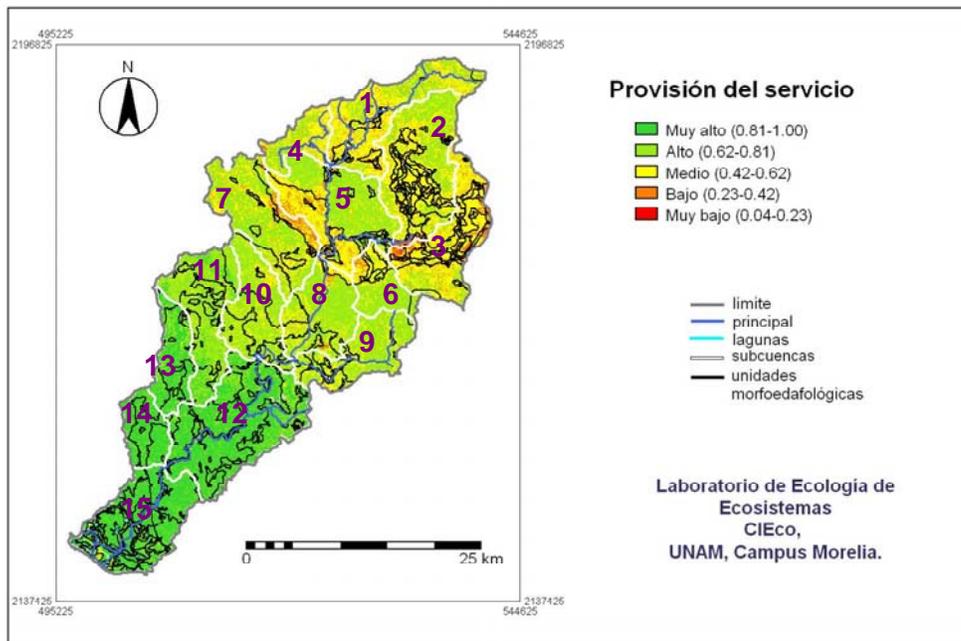


Figura III.6. Mapa acerca de la provisión del SE de regulación de la erosión hídrica en la cuenca del río Cuitzmalá. La numeración corresponde a las subcuencas.

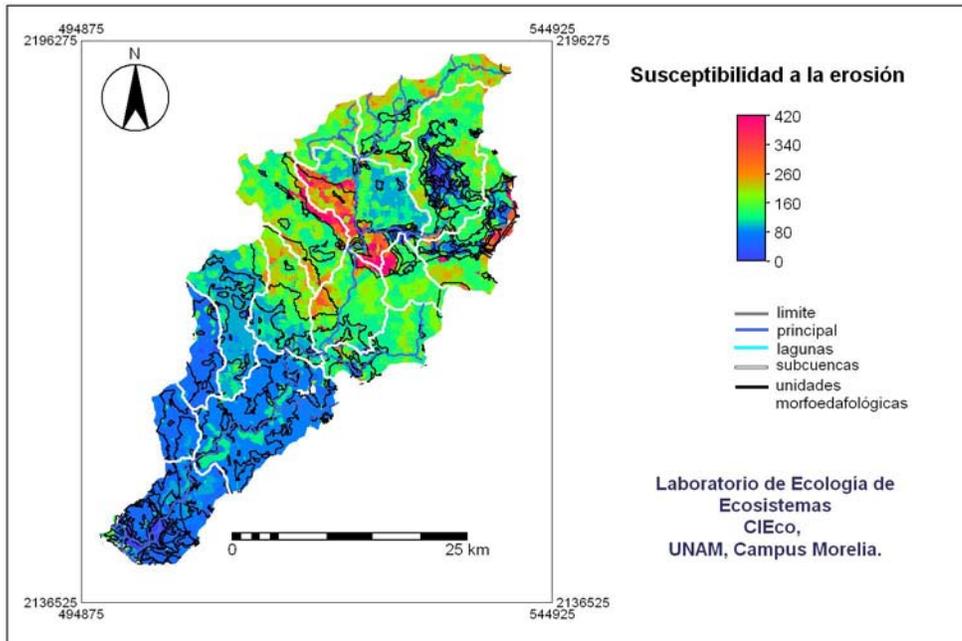


Figura. III.7 Mapa que muestra la susceptibilidad a la erosión o erosión potencial en la cuenca del río Cuitzmala, obtenida considerando los factores RKLS (erodabilidad, factor de la pendiente LS y erosividad) mediante la ecuación USLE de acuerdo a la metodología propuesta por Toxopeus (2004). La leyenda indica el rango de valores expresado en ton/ha/año.

Cuadro III.2. Susceptibilidad a la erosión (erosión potencial) resultado de considerar los factores RKLS (erodabilidad, factor de la pendiente LS y erosividad) mediante la ecuación USLE de acuerdo a la metodología propuesta por Toxopeus (2004). Se presentan los valores promedio por subcuenca y unidad ambiental en ton/ha/año. La numeración corresponde a la empleada por Martínez (2007) para denominar a las unidades morfoedafológicas de la cuenca (ver Anexos IV y V).

Subcuencas	II	III	V	IX	XIV	XXII	XXIV	XXVII	XXXII
1	226		170	160					
2	194			172					
3	322			196	226	223	305		
4	200			190					
5	270		330	215					
6	184		331	177					
7	373		322	332					
8	251	224	312	226					
9	225			195					
11	160			130					
10	169	309		137					
12	120			134					
13	127			98					
14	100			110					
15	90			80				76	50

Escala	Clases
0-76	Muy bajo
77-152	Bajo
153-228	Medio
229-304	Alto
305-380	Muy alto

Restauración

Las áreas con mayor prioridad de restauración (muy alto, 0.78-0.96%), ocupan tan sólo el 0.8% de la superficie de la cuenca, mientras que el 20.8% del área de la misma registra valores altos en su prioridad para ser restaurada (0.60-0.78%). Las subcuencas 1, 3, 2, 7 y 4 abarcan una mayor área de la cuenca con valores alto-muy alto en cuanto a prioridades de restauración (ver Figura III.8), principalmente en las unidades II y IX (ver Cuadro III.3). Dichas áreas coinciden con las que reportan los valores más altos en provisión del SE de infiltración superficial (ver capítulo 2).

El 38.4% del área de la cuenca, en la parte media y alta (subcuencas 6, 9, 10, 8 y 5) alcanza valores medios (43-60%) en cuanto a su necesidad de restauración. Llamam la atención en las subcuencas 1, 4, 2 y 5, las áreas que siguen el cauce principal del río Cuitzmala (ver Figura III.8) ya que también registran valores que van de medio a alto e incluso muy alto en su necesidad de restauración, mismas que están representadas por las unidades II, IX, V y XII (ver Cuadro III.3).

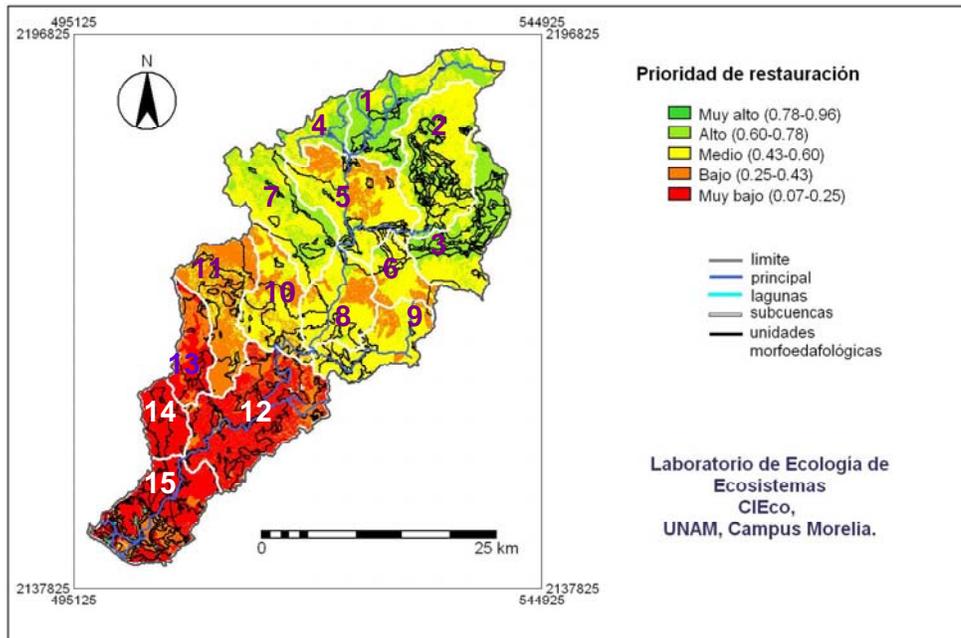


Figura III.8. Mapa que indica las prioridades de restauración relacionadas con el SE de regulación de la erosión hídrica en la cuenca del río Cuitzamal. La numeración corresponde a las subcuencas.

Cuadro III.3. Descripción de unidades ambientales que requieren de restauración para cada uno de los criterios considerados en el análisis (ver Figura III.5).

Unidad ambiental	Sub-cuencas	Provisión del SE de regulación de la erosión (valores predominantes por unidad).	Agua disponible	Clases de deterioro de la cobertura	Susceptibilidad del suelo a la erosión (ver Figura. III.7 y Cuadro III.2).
II Piedemonte y laderas sobre granito, con Regosol eútrico, pastizal cultivado, pastizal inducido.	1 4 2 3 y 5 7 6, 9, 8	Medio-bajo	Muy alto-alto	Alto	Muy alto-alto -medio
V Piedemonte y Laderas sobre calizas, con Leptosol lítico, pastizal cultivado, agricultura de temporal	5, 7 y 6	Medio-bajo	Alto	Muy alto-alto	Muy alto-alto -medio
IX Superficies Planas y Piedemonte con Regosol eútrico y Phaeozem háplico. Sobre granito. Pastizal cultivado, Agricultura de temporal.	1 4 2 3 7, 9 y 6	Medio-bajo	Muy alto	Muy alto-alto	Muy alto -medio

III.V.- Discusión

La parte baja de la cuenca es la que provee en mayor medida el SE de regulación de la erosión hídrica, lo que obedece a que en términos relativos, tanto las condiciones edáficas como las de pendiente, son las menos susceptibles a la erosión en la cuenca. Asimismo, la vegetación en esas áreas es de las más conservadas, lo que se debe en parte a la existencia de la Reserva de la Biósfera Chamela-Cuixmala. La capacidad de la parte baja de la cuenca para generar el SE, es de suma importancia en tanto que pueda aminorar la pérdida de suelo, en una región en la que se presentan lluvias que, aunque poco frecuentes, poseen un alto poder erosivo (García Oliva et al., 1995). En el mismo sentido, se hace prioritaria la conservación y manejo de dichas áreas, si se toma en cuenta que en la mayor parte de la cuenca predominan los suelos de tipo Regosol y las pendientes mayores a los 10° (Meléndez, 1999), así como que en la región se han reportado pérdidas de suelo en Regosol cultivado con maíz de hasta dos órdenes de magnitud mayores a lo registrado en áreas ocupadas por selva baja caducifolia conservada sobre el mismo tipo de suelo (Maass et al., 1988). Lo anterior le confiere gran importancia al mejoramiento de las condiciones productivas mediante la promoción de prácticas de manejo que tomen en cuenta la susceptibilidad del suelo (Maass y García-Oliva, 1990), así como la influencia de factores socio-culturales y económicos que favorecen que en la región las prácticas productivas predominantes sean de tipo agrícola y ganadero (ver capítulos 2 y 4).

En la cuenca existen áreas en las que coincide una baja provisión del SE de regulación de la erosión hídrica con valores altos de los SE de infiltración superficial y profunda. En dichas áreas, en general, la vegetación ha sido modificada para establecer cultivos y pastizales, este proceso de transformación en la cuenca podría aumentar tanto la escorrentía como la erosión, favoreciendo la ruptura de los agregados del suelo, lo cual debilita la estabilidad estructural del mismo, pudiendo disminuir las tasas de infiltración, tal como ha sido investigado en otras partes de la región Chamela (Cotler y Ortega, 2006; Maass et al., 2005). Se trata de una cuenca que posee considerables zonas que favorecen la infiltración superficial, sin embargo, la baja permeabilidad del sustrato geológico predominante no facilita la infiltración profunda (ver capítulo 2), y dado que la cuenca se encuentra en un contexto regional en el que se registra un intenso proceso de cambio en el uso del suelo (Burgos, 1999), la restauración de las áreas degradadas cobra especial relevancia para mejorar la calidad y la cantidad de agua disponible para los distintos usos humanos, así como la capacidad de infiltración de los suelos (Maass et al. 2005) que en el largo plazo asegure tanto la recarga como la provisión de agua dulce.

Además, las unidades ambientales propuestas para la restauración del SE coinciden con las subcuencas en las que hay mayor agresividad climática, más agua disponible y cuyas condiciones hacen de esas áreas las más susceptibles a la erosión. Muchas de esas zonas, principalmente las de la parte alta de la

cuenca, a pesar de que se caracterizan por proveer en menor medida el SE de regulación de la erosión, son de importancia para la provisión del SE de infiltración. Por ello, su restauración favorecería el mejoramiento de las condiciones que hacen posible los dos SEs mencionados. Al tratarse de SE de soporte y de regulación, podrían beneficiar a los pobladores de la parte media y baja de la cuenca, al aumentar la calidad y regular la cantidad del agua, pero también al controlar el transporte y la depositación de los sedimentos, lo que podría tener impactos positivos en las zonas agrícolas cuenca abajo. Asimismo, la restauración de las zonas riparias del cauce principal del río Cuitzmala pudiera contribuir a su aprovechamiento como áreas de recreación para las localidades cercanas y los turistas.

III.VI.- Conclusiones y recomendaciones

El uso de las metodologías de AMCE y juicio experto permitieron generar una evaluación espacialmente explícita acerca de la provisión de SE de regulación de la erosión hídrica, así como la priorización de las zonas que requieren acciones de restauración ecológica.

El 18% del área de la cuenca provee en mayor medida el SE de regulación de la erosión hídrica, en especial la parte baja, que es la que se encuentra más conservada, es menos susceptible a la erosión y en donde el tipo de vegetación que predomina es la selva baja caducifolia. A nivel funcional es relevante la manera en que esta parte de la cuenca contribuye al control tanto de sedimentos como de los flujos hidrológicos.

Las áreas que, debido a su deterioro y susceptibilidad, tienen una mayor prioridad para la restauración de las condiciones necesarias para proveer el SE de regulación de la erosión hídrica abarcan el 29% del área de la cuenca y se ubican en la parte alta principalmente. Siendo las zonas con mayor potencial para la captación de agua, su restauración es importante para asegurar agua superficial de calidad y en cantidad suficiente para la demanda de la población actual y la recarga de agua subterránea.

El deterioro en la cuenca se debe principalmente al cambio en el uso del suelo para la realización de actividades agropecuarias, que pese a no ser las más adecuadas para las condiciones de la región, sí son las más aceptadas culturalmente. Por ello, tanto las actividades para la conservación de las áreas que prestan el SE, como la restauración de las áreas degradadas, debieran considerar este conflicto entre distintos objetivos de uso del territorio. La interdependencia que establece la provisión de distintos SEs entre la parte alta (i.e. infiltración) y la parte baja (i.e. regulación de la erosión) de la cuenca, presenta una oportunidad para hacer evidentes dichos beneficios entre las distintas localidades, lo que puede aprovecharse para la planeación y el manejo de la cuenca.

Los criterios utilizados para evaluar este servicio se basaron en la USLE que evalúa específicamente pérdida de suelo causada por su arrastre, a esto se le debe sumar otros tipos de procesos de degradación de suelos como la compactación, el encostramiento y los movimientos en masa, que no fueron evaluados en este estudio.

El presente trabajo representa una aproximación metodológica para obtener una primera prospección acerca de la provisión del SE de regulación de la erosión hídrica en la cuenca. Los resultados se encuentran sujetos a un amplio grado de incertidumbre debido a que la información disponible actualmente es a nivel regional, y a que, siguiendo una lógica de manejo adaptativo, es necesario afinar el proceso de ponderación para los criterios, así como, realizar el análisis de

sensibilidad correspondiente. Asimismo, para generar datos con mayor precisión acerca del proceso de erosión en las distintas unidades ambientales de la cuenca. se requerirá de mediciones puntuales.

Aunque el diseño de estrategias específicas para la conservación y la restauración excede los objetivos del presente trabajo, la ubicación de las unidades ambientales que proveen el SE, así como, la priorización de aquellas en que es necesaria la restauración, constituyen información útil para ubicar y reducir el esfuerzo de muestreo o de intervención que son requeridos en la cuenca.

Dicha información, además contribuye al proceso de manejo adaptativo que se lleva a cabo en la región, incorporando nuevos datos e investigación para la toma de decisiones y la gestión de los recursos hídricos entre los municipios que comparten la cuenca.

III.VII.- Bibliografía citada

Barredo, J. I. 1996. Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio. Edit. Ra-ma. Madrid. 266pp.

Bruijnzeel, L.A. 2004. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees?. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 104:85–228

Burgos, A., L. 1999. Dinámica hidrológica del bosque tropical seco en Chamela, Jalisco, México. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico, D.F.

Cortés, F. J. 2001, Estudio hidrogeológico de la subcuenca Río Cuitzmala, en la Costa de Jalisco. Tesis. Facultad de Ingeniería, UNAM, México, D.F.

Cotler, H, E. Durán y C. Siebe. 2002. Caracterización morfo-edafológica y calidad de sitio de un bosque tropical caducifolio. En: Noguera, F. A., J. H. Vega, A. N. García-Aldrete y M. Quesada (Eds.). *Historia Natural de Chamela*, Instituto de Biología, UNAM. Pp:17-79.

Cotler H. y Ortega P. 2006. Effects of land use on soil erosion in a tropical dry forest ecosystem, Chamela watershed, Mexico. *Catena* 65:107-117

Cotler, H. 2003. El uso de la información edáfica en los estudios ambientales. *Gaceta Ecológica* 61: 33-42.

De Ita-Martínez, C. y V. Barradas. 1986. El clima y los patrones de producción agrícola en una selva baja caducifolia de la costa de Jalisco, México. *Biótica* 11: 237-245.

FAO. 1979. A provisional methodology for soil degradation assessment, Roma, Italia.

García-Oliva, F., A. Camou y J. M. Maass. 2002. El clima de la Región Central de la costa del Pacífico Mexicano. En: F. A. Noguera, J. H. Vega, A. N. García-Aldrete, and M. Quesada, editores. *Historia Natural de Chamela*. Instituto de Biología, UNAM, México, D.F.

García-Oliva, F., E. Ezcurra y L. Galicia. 1991. Pattern of rainfall distribution in the Central Pacific Coast of Mexico. *Geogr. Ann.* 73 A(3-4):179-186.

García Oliva, F., J.M. Maass y L. Galicia. 1995. Rainstorm Analysis and Rainfall Erosivity of seasonal Tropical Region with a Strong Cyclonic Influence in the Pacific Coast of Mexico. *Journal of Applied Meteorology* 34:2491-2498.

INE, SEMARNAT e Instituto de Geografía, UNAM. 2000. Uso de Suelo y Vegetación 2000, escala 1:250,000. Cobertura preparada para el análisis de cambio de uso del suelo del Inventario Nacional Forestal. INE, México D.F.

INEGI, 2006. Base de datos sobre perfiles de suelos en la Costa de Jalisco. Archivo de trabajo digital. Departamento de Edafología, INEGI.

Jordán, A. y N. Bellinfante. 2000. Cartografía de la erosividad de la lluvia estimada a partir de datos pluviométricos mensuales en el Campo de Gibraltar (Cádiz). Edafología 7(3)83-92.

Kirkby, M. J. y R. P. Morgan. 1984. Erosión de suelos. Limusa, México, D.F. 371 pp.

Maass, J. M., V.J. Jaramillo, A. Martínez-Yrizar, F. García-Oliva, A. Pérez-Jiménez y J. Sarukhán. 2002. Aspectos funcionales del ecosistema de Selva Baja Caducifolia en Chamela, Jalisco. En: F. A. Noguera, J. H. Vega, A. N. García-Aldrete y M. Quesada. (Eds.). Historia Natural de Chamela, Instituto de Biología, UNAM. Pp 525-542.

Maass J. M. y F.García Oliva, 1990. La conservación de suelos en zonas tropicales: el caso de México. Ciencia y Desarrollo 15 (90):21-36.

Maass, J. M., P. Balvanera, A. Castillo, G. C. Daily, H. A. Mooney, P. Ehrlich, M. Quesada, A. Miranda, V. J. Jaramillo, F. García-Oliva, A. Martínez-Yrizar, H. Cotler, J. López-Blanco, A. Pérez-Jiménez, A. Búrquez, C. Tinoco, G. Ceballos, L. Barraza, R. Ayala, and J. Sarukhán. 2005. Ecosystem services of tropical dry forests: insights from long-term ecological and social research on the Pacific Coast of Mexico. Ecology and Society 10(1): 17. [online] URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol10/iss1/art17/>

Maass , J. M., C. Jordan and J. Sarukhán.1988. Soil erosion and nutrient losses in seasonal tropical agroecosystems under various management techniques. Journal of Applied Ecology 25(2): 595-607.

Martínez, T. S. 2007. La agregación del suelo como indicador de calidad en un ecosistema tropical seco. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de México.

Meléndez, J. F. 1999. Hidrogeografía de la cuenca del Río Cuitzmala, Jalisco. Tesis de Maestría. Facultad de Filosofía y Letras, Departamento de Geografía, UNAM.

- Mendoza, G.A., P. Macoun, R. Prabhu, D. Sukadri, H. Purnomo y H. Hartanto. 1999. Guidelines for Applying Multi-Criteria Analysis to the Assessment of Criteria and Indicators.9 The Criteria & Indicators Toolbox Series. Center for International Forestry Research. Jakarta.
- Millennium Ecosystem Assessment. 2003. Ecosystems and human well-being: a framework for assessment. Island Press, Washington, D.C., USA.
- Millward, A. A. y J.E. Mersey. 1999. Adapting the RUSLE to Model soil erosion potential in a mountainous tropical watershed. CATENA 38 :109-129.
- Natural Resources Conservation Service, 2007. Soil Survey Staff, Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Handbook, title 430-VI.
- Pando, M., M. Gutiérrez, A. Maldonado, J. L. Palacio y A. E. Estrada. 2003. A comparison of methods in estimating soil water erosion. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM 51:23-36
- Piña, P. 2007. Regionalización Eco-Hidrológica de la Cuenca del Río Cuitzmala, Jalisco, México. Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas. Posgrado En Ciencias Biológicas. Centro de Investigaciones en Ecosistemas, UNAM.
- Rattan, L. 1990. Soil erosion In the Tropics. Principles & Management. McGraw-Hill. New York. 381pp.
- Rosignol, J. P. 1987. La morfoedafología: un método de estudio del medio biofísico para su ordenación. En: Geissert, D. y J.P. Rosignol. 1987. La morfoedafología en la ordenación de los paisajes rurales: conceptos y primeras aplicaciones en México. INIREB-ORSTOM, Xalapa, México. 83 pp.
- Sarukhán, J. y J. M. Maass. 1990. Bases ecológicas para un manejo sostenido de los ecosistemas: el sistema de cuencas hidrológicas. En: E. Leff (Ed.). Medio ambiente y desarrollo en México. Vol. I. UNAM (CIIH)-Porrúa. Pp:81-114.
- Secretaría de Programación y Presupuesto. 1981. Carta de Hidrología de Aguas Subterráneas, Manzanillo E13-2-5, 1:250,000
- SER, Society for Ecological Restoration Science & Policy Working Group.2002. The SER Primer on Ecological Restoration. www.ser.org/.
- Stanford, J.A. y G.C. Poole. 1996. A protocol for ecosystem management. Ecological Applications 6(3):741-744.

US Army Corps of Engineers. 1994. Flood-Runoff Analysis. Engineer Manual. Department of the Army. Washington, D.C.

Toxopeus, A.G. 2004. Cibodas: the erosion issue. En: ILWIS 2.1 Applications Guide. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), Enschede, The Netherlands. Disponible en:
<http://www.itc.nl/ilwis/applications/application23.asp>

Capítulo IV.- Conflictos asociados al servicio ecosistémico de suministro de agua dulce en la cuenca del río Cuitzmala , México.

Resumen

En la Costa de Jalisco, las condiciones climáticas regionales determinan que el agua disponible al año sea reducida, ello hace que en la cuenca del río Cuitzmala se compita por el servicio ecosistémico (SE) de suministro de agua dulce y se presenten conflictos (contraprestaciones) entre el servicio y las demandas por parte la población humana para el consumo doméstico y la realización de actividades productivas. En este contexto se empleó el enfoque metodológico de seis pasos propuesto por Maass y colaboradores (2005) para abordar el estudio de los SE. Así, se estimó que la provisión del SE de suministro de agua dulce se concentra en la parte alta de la cuenca, mientras que la demanda es mayor en la parte baja. Mediante álgebra de mapas se sumaron las áreas con necesidades de restauración para mantener los SEs de infiltración (superficial y subterránea) y regulación de la erosión hídrica. Los resultados sirvieron para que mediante Análisis Multicriterio Espacial se estimara que el 38% del área propuesta para restauración se encuentra en conflicto con la dedicada a actividades productivas (ganadería y la agricultura). Se analizó el hecho de que el consumo de agua subterránea en la parte baja de la cuenca determina una contraprestación que compromete el abasto futuro de agua dulce en la cuenca.

IV.I.- Introducción

La capacidad de los ecosistemas para sostener la provisión de agua dulce de la cual depende el bienestar humano, se ha visto comprometida a nivel mundial. Esta tendencia podría continuar o incluso exacerbarse, mientras persistan los patrones históricos de manejo y sobreexplotación del recurso hídrico (Vörösmarty et al. 2005). Por ello, para un número creciente de personas a escala global, el tener acceso a agua dulce limpia y en cantidad suficiente, se ha convertido en un problema cotidiano (Janetos et al., 2005). En la Costa de Jalisco, particularmente en la región Chamela, desde hace más de 17 años (Marisa Masari com. pers.),

poderosos grupos de inversionistas han intentado implementar desarrollos turísticos cuyas demandas de agua excederían por mucho la capacidad climática de la región para proveer este recurso, pues en ella la mayor parte de los meses, la evaporación potencial es el doble de la actual, por lo que se registra déficit hídrico casi todo el año (Barradas y Fanjul, 1985; Burgos, 1999). Por ello es que la cantidad de agua disponible es el factor limitante más importante para el desarrollo en la zona (De Ita-Martínez y Barradas, 1986; Maass et al., 2005). Como parte de un programa de investigación ecológica a largo plazo, acerca de la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas naturales y transformados y sobre la dimensión social que implica su manejo, Maass y colaboradores (2005) señalaron la importancia que para el bienestar de las poblaciones humanas y de los ecosistemas en la región tiene la disponibilidad de agua dulce, por lo que sugirieron la necesidad de investigar esta relación en términos de la provisión de los servicios ecosistémicos hidrológicos.

El concepto de servicios ecosistémicos (SEs) surgió por parte de la economía ecológica como respuesta a la crisis ambiental, con el objeto de hacer evidentes y asignar un valor a la inmensa gama de beneficios que los seres humanos obtienen de los ecosistemas (De Groot et al., 2002; Costanza et al., 1997). Un tipo particular de SEs son los de suministro, entendidos como aquellos productos proporcionados por los ecosistemas que son bienes tangibles, cuya apropiación por las personas es directa y que se pueden cuantificar (M.A., 2003). Dentro de este tipo de SE destaca por su importancia para el bienestar humano, el SE de

provisión de agua dulce, mismo que puede definirse como la cantidad total de agua que queda disponible entre la diferencia de la precipitación y la evapotranspiración anuales (Manuel Maass com. pers.). Dicho SE tiene distintos usos, tales como el abastecimiento de agua para fines domésticos, agropecuarios e industriales, así como, para el mantenimiento de los ecosistemas. Cada una de esas actividades tiene requerimientos particulares en términos de la calidad, cantidad y temporalidad del agua que necesita (Maass, 2003; Rojas y Aylward. 2003). Por ejemplo, se considera que para el consumo doméstico es más importante cuidar la calidad del agua que para otros usos. En el caso de los sistemas municipales de distribución de agua, éstos necesitan un abastecimiento constante, mientras que los sistemas de irrigación sólo necesitan agua en ciertas épocas del año (Pagiola, 2003).

Las necesidades, intereses y metas pueden diferir entre los beneficiarios de este SE, por lo que puede surgir entre ellos competencia por la apropiación del agua dulce. Las llamadas contraprestaciones (“trade-offs”), ocurren cuando se le da prioridad a la provisión de un SE en particular, sin considerar las consecuencias que ello genere en otros SEs o beneficiarios (M.A., 2003). Por ejemplo, cuando se utiliza el SE de fertilidad de suelo y se pone en riesgo el SE de control de erosión. Las contraprestaciones entre los SEs y el bienestar humano pueden ocurrir a través de distintas escalas espaciales y temporales (Jametos et al., 2005). Una manera de entender cómo es que se presentan dichas contraprestaciones es mediante la elección de una unidad de manejo, en la cual sea posible observar

cómo es que los usuarios se apropian y compiten por el agua. La cuenca hidrológica facilita dicho análisis, al ser una zona de captación por la que drena el agua hacia un punto común (Kerr, 2003) y cuyo parteaguas establece un límite definido para observar el balance de los flujos hidrológicos (Maass *et al.*, 2002), lo que favorece la visualización de los conflictos que se presentan en torno al uso del SE mencionado.

De acuerdo a este enfoque, cuando los usuarios de aguas arriba contaminan el agua que fluye hacia los usuarios de aguas abajo, los primeros establecen competencia por este recurso a una escala espacial, ya que desplazan los efectos de sus actividades hacia otras partes de la cuenca (Southern African M. A., 2004) y disminuyen la oportunidad de los usuarios de aguas abajo para utilizar agua limpia. A escala temporal, cualquier modificación para incrementar la cantidad o disponibilidad de agua en el corto plazo puede comprometer la calidad de este recurso en el largo plazo, lo que se traduce en contraprestaciones que afectan la equidad intergeneracional, ya que crean competencia no sólo entre los usuarios del presente, sino también entre los del pasado y aquéllos que lo serán en el futuro (Southern African M. A., 2004; Manuel Maass com. pers.).

La competencia entre los distintos usos humanos y el flujo de agua que requieren los ecosistemas, genera un tipo de contraprestaciones entre dos objetivos aparentemente contrapuestos, ya que el objetivo de conservación implica que los

ecosistemas se apropien (para su funcionamiento y uso) de una parte del agua disponible en el ciclo hidrológico, lo que disminuye la cantidad total de agua que podrían aprovechar otros usuarios (CONAF, 1997; Vörösmarty et al., 2005).

Las contraprestaciones son un componente inevitable de las interacciones entre el ser humano y los recursos hidrológicos (Vörösmarty et al., 2005). Sin embargo, si la sustentabilidad se establece como la mayor meta del manejo de los recursos hídricos, se vuelve prioritario vigilar que las contraprestaciones no sean tan graves como para poner en riesgo la capacidad de los ecosistemas para seguir funcionando (Southern African M. A., 2004) y proporcionando SEs, ya que su pérdida podría comprometer la capacidad para cumplir las metas propuestas por el desarrollo (Vörösmarty et al., 2005). Una metodología que puede abordar las contraprestaciones relacionadas con la provisión de SEs hidrológicos, es el Análisis Multicriterio Espacial (AMCE), pues provee de un marco sistemático para el análisis de problemas que involucran múltiples criterios (i.e. agua disponible, demanda humana de agua) y alternativas (i.e. objetos espaciales como las subcuencas, objetivos y metas para la restauración o desarrollo turístico) mediante la estimación de los valores relativos de cada alternativa (Mendoza et al., 1999; Huth et al., 2004), de acuerdo a reglas de decisión específicas (algoritmos) que indican la manera en que se combinarán los criterios, y determinan si éstos generan beneficios o costos para el cumplimiento del objetivo o meta para el que fue propuesto el análisis (Bosque, 2001).

El presente trabajo tuvo como objetivo general analizar algunas de las contraprestaciones existentes entre el SE de suministro de agua dulce en la cuenca del Río Cuitzmala, respecto a:

1. La demanda del recurso hídrico para uso doméstico y agropecuario,
2. El nivel de conflicto entre las áreas propuestas para la restauración y las zonas dedicadas a actividades productivas (ganadería y agricultura),
3. El origen (superficial o subterráneo) del agua que se consume en la cuenca.

IV.II.- Sitio de estudio

La cuenca del Río Cuitzmala se extiende en parte de los municipios de Purificación y La Huerta, en ellos destacan las poblaciones de La Eca, Nacastillo, Francisco Villa y Emiliano Zapata (ver Figura IV.1). De acuerdo al INEGI (2000), la cuenca tiene una población total de 7,117 habitantes y una población ocupada de 2,044. De ésta última el 50.6% está dedicada al sector primario, el 14.3% al secundario y 33.4% al terciario. Las viviendas particulares habitadas son 1,571 de las cuales el 78.9% dispone de agua entubada (ver Cuadro IV.1).

La información generada por Solórzano (2007, en preparación), mediante la realización de encuestas a los pobladores de La Eca que se ubica en la parte alta de la cuenca y Zapata en la parte baja, reporta que el origen del agua que consumen la mayor parte de los encuestados para uso doméstico en La Eca proviene del río, mientras que en Zapata la mayoría la obtiene de pozo. En cuanto al abastecimiento de agua para las parcelas en La Eca, el 37% de los encuestados no disponen de agua en su parcela, lo que hace suponer que dependen únicamente de la precipitación estacional, los que se abastecen del río equivalen al otro 37% y aquellos que hacen uso de los manantiales son el 26% de los encuestados. Mientras que en el caso de Zapata sólo el 20%, no cuentan con agua en sus parcelas, el 57% de los encuestados obtiene agua de pozo y sólo el 16% la obtiene del río (Solórzano, 2007, en preparación).

El 62% del área de la cuenca tiene una cobertura de vegetación natural con distintos grados de conservación (Inventario Nacional Forestal, 2000), que se caracteriza porque provee de manera importante distintos SEs (ver Cuadro IV.1). Por ejemplo, el 40% del área de la cuenca favorece la infiltración superficial, el 5% es importante para la infiltración profunda (ver capítulo 2). Además, el 56% de la superficie tiene un importante papel en la regulación de la erosión hídrica (ver capítulo 3). Sin embargo, el 38 % del área de la cuenca se encuentra antropizada, por lo que han sido sugeridas zonas que requieren, de manera prioritaria, restauración ecológica (39% para el caso de la infiltración y 21% para el caso de la regulación de la erosión hídrica).

En la cuenca se registra un creciente proceso de cambio en el uso del suelo; las causas de dicha transformación han formado parte de políticas de Estado en varias épocas y sexenios, para incrementar la frontera agrícola y ganadera del país (Challenger, 1998, Castillo et al., 2005). Entre otras causas de dicha transformación, se cuenta el hecho de que un número reducido de especies maderables poseen valor comercial, por lo que es más rentable, en el corto plazo, el uso de suelo agrícola y ganadero (Burgos, 1999). Otra razón, es que el arraigo y la identidad campesina se encuentran asociadas a la creación de unidades de producción pecuaria (Castillo et al., 2006). Sin embargo, la baja predictibilidad, la irregularidad de la sequía intraestival, la intensidad de la sequía relativa y el déficit hídrico hacen que la región, en general, no sea un lugar apto, desde el punto de vista climático, para la producción de maíz (De Ita-Martínez y Barradas, 1986).

Maass y colaboradores (2005) determinaron para la región Chamela, que los principales “impulsores de cambio”¹ para el SE de provisión de agua dulce son el cambio en el uso del suelo y la erosión. Los efectos más conspicuos de dichos impulsores se observan en la disminución tanto de la calidad del agua, como de la capacidad de infiltración. El incremento en la evaporación en el suelo y la escorrentía superficial (Maass et al., 1988, García-Oliva et al., 1995) producto de la transformación del ecosistema, generan un aumento del agua superficial disponible, pero con una considerable disminución en su calidad, así como una reducción en la tasa de recarga del agua subterránea (Maass et al., 2005).

¹ Aquellas condiciones y necesidades humanas que inducen transformaciones en los ecosistemas y que a su vez tienen efectos en el SE de provisión de agua dulce y por consiguiente en el bienestar de las poblaciones humanas (MA, 2003).

Cuadro IV.1. Características relevantes para cada subcuenca.

Sub-cuenca	% de la cuenca ocupado por la subcuenca	% del área de la subcuenca que está antropizada	% del área de la subcuenca que tiene cobertura natural	% del área de la subcuenca que provee SEs en mayor medida		% del área de la subcuenca que requiere acciones de restauración		% de la población ocupada por sector en la subcuenca			% de viviendas con agua entubada en la subcuenca
				Infil../infil. prof.	Reg. de erosión	Infiltración	Reg. de erosión	Primario	Secundario	Terciario	
1	7.7	43.9	56.1	99.1/2	28.9	95	38	68.2	7.3	22.9	86.1
2	9.6	52.4	47.6	87.8/7.8	27.5	57	20	81.0	4.8	7.9	89.8
3	7.3	67.7	32.3	63.1/30.6	14.4	69	68	90.5	9.5	0	75.0
4	2.7	29.2	70.8	98.4/0.6	39.2	90	25	0	0	0	0
5	9.0	50.8	49.2	15.4/34.7	32.2	48	33	69.0	12.3	17.9	86.7
6	3.2	45.2	54.8	52.3/28.6	42.2	32	26	86.2	5.2	6.9	59.6
7	8.1	49.4	50.6	69.6/14.4	31.5	84	25	82.1	6.3	9.5	82.5
8	5.8	23.3	76.7	47.6/3.5	51.8	25	10	54.5	0	45.5	20.0
9	5.5	38.8	61.2	63.3/2.2	46.5	37	16	50.8	12.3	35.7	86.1
10	6.00	27.1	72.9	41.1/1.4	57.2	29	8	74.5	5.9	19.6	94.3
11	7.0	37.2	62.8	18.2/0.2	81.8	4	6	100.0	0	0	16.7
12	12.6	15.4	84.6	0/5.6	96.4	0	1	92.1	5.3	2.6	45.0
13	3.7	42.0	58.0	0/0	94.8	0	1	88.7	2.8	7.0	88.9
14	3.0	1.5	98.5	0/0	99.8	0	0	0	0	0	0
15	8.6	26.9	73.1	0/27.0	95.8	0	2	17.1	24.2	56.9	65.9

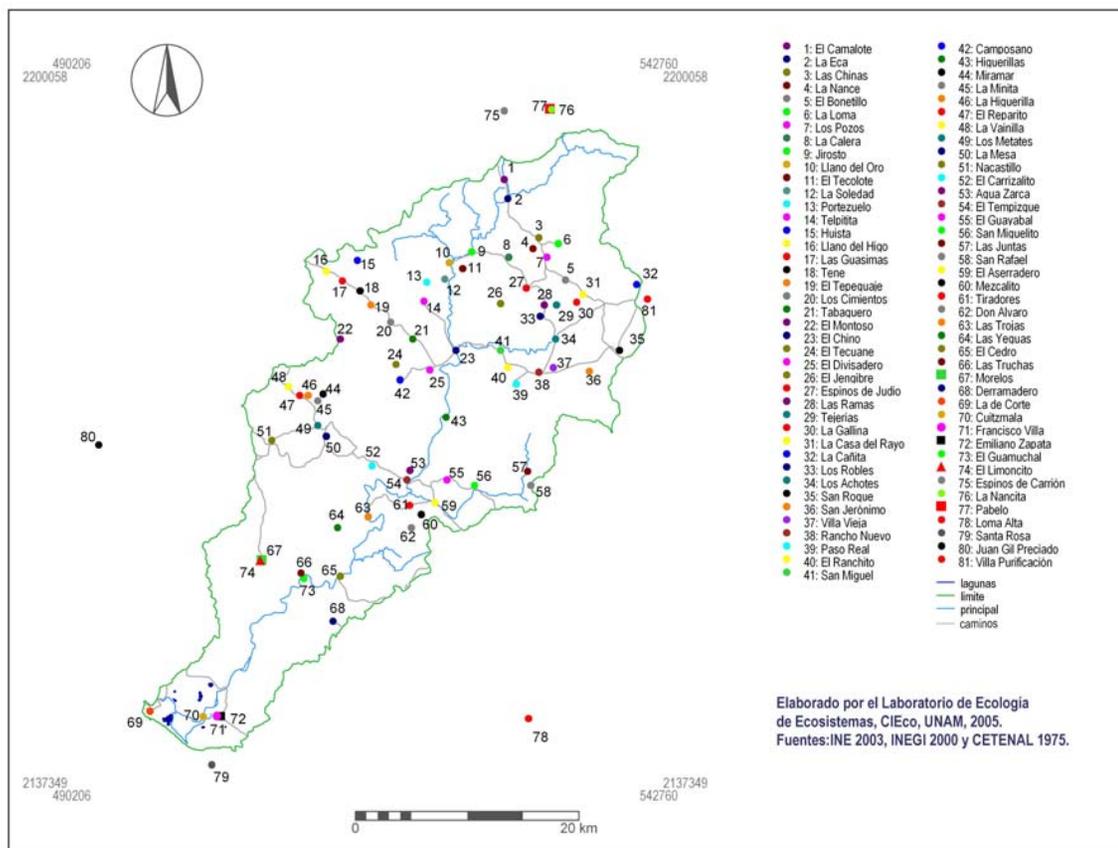


Figura IV.1. Mapa de poblaciones de la cuenca.

IV.III.- Materiales y métodos

Maass y colaboradores (2005) propusieron un enfoque metodológico de seis pasos para abordar el estudio de la provisión de SEs en la región Chamela, el presente trabajo retoma dicho enfoque para abordar el SE de suministro de agua dulce, así como algunos de los conflictos asociados al mismo en la cuenca del río Cuitzmala:

Paso 1.- Definición de límites y escala de análisis para los distintos tipos de

SEs: Se elaboró una definición para el SE de suministro de agua dulce, con el objeto de describirlo y facilitar su análisis. Asimismo se consideró, que la cuenca hidrográfica y la división de la misma en subcuencas (Piña, 2006), constitúan las unidades funcionales más adecuadas para la evaluación del SE en cuestión.

Paso 2.- Identificación de las restricciones e impulsores de cambio² que actúan sobre el ecosistema desde el punto de vista biofísico y

socioeconómico: Se realizó una revisión bibliográfica, así como el análisis de los balances hídricos existentes sobre la cuenca y las subcuencas (Piña, 2006), lo que permitió reconocer que la restricción biofísica más importante para el SE en

² La existencia de relaciones e interacciones dinámicas entre las personas y los ecosistemas, las cuales se traducen, en que las condiciones y necesidades humanas actúen impulsando cambios directa e indirectamente en los ecosistemas (impulsores de cambio), los que a su vez provocan cambios en el bienestar humano (M.A., 2003).

cuestión es la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración anuales, misma que determina la cantidad de agua disponible, y que ya había sido establecida por Maass y colaboradores (2005) para la región Chamela. Se consideró que los impulsores de cambio más relevantes para el SE de suministro de agua dulce en la cuenca eran el cambio en el uso del suelo y la erosión que éste genera, ambos impulsores ya habían sido señalados por los mismos autores también a nivel regional.

Paso 3.- Explicitar las relaciones existentes entre los servicios ecosistémicos y el bienestar humano, mediante la identificación de los servicios, sus beneficiarios y los conflictos presentes: Se analizó la información existente sobre la zona de estudio y se consultó, mediante entrevistas, a un diferentes especialistas (ver Anexo VIIIb) con el objeto de conocer sus opiniones y obtener información del tipo que se conoce como “juicio experto”. La consulta a los expertos aportó información para identificar los criterios más adecuados para estimar el SE, así como aquellos criterios que podían considerarse para entender los conflictos relacionados con la provisión del SE. En base a dicha información se prepararon las tablas y mapas-criterio necesarios para realizar el análisis:

- a) **Agua disponible:** La estimación se realizó en base a los datos de balance hídrico (Piña, 2006), considerando la diferencia entre la precipitación anual y la evapotranspiración actual para cada subcuenca y multiplicando dicho valor por el área de la misma.

- b) **Demanda anual de agua para consumo doméstico:** Entre las distintas poblaciones de cada subcuenca, esta demanda fue estimada mediante el índice de consumo mínimo por persona establecido por la UNESCO (WHO, 2002) y los datos de número de habitantes por localidad del XII Censo Nacional de Población y Vivienda (INEGI, 2000). El índice mencionado, considera que el consumo diario mínimo por persona es de 50 litros de agua dulce para beber, cocinar y llevar a cabo la higiene personal.
- c) **Relación cobertura antrópica-cobertura natural:** Utilizando la metodología propuesta por Palacio y colaboradores (2004) se elaboró un mapa para estimar la relación existente entre al área con cobertura natural y la cobertura antrópica. Para ello, se agruparon las áreas con uso de suelo agrícola y cobertura de pastizal como áreas con cobertura antrópica, todas las demás áreas fueron consideradas como cobertura natural.
- d) **Zonas propuestas para restauración ecológica:** Mediante el proceso de álgebra de mapas se sumaron las áreas propuestas para la restauración en la cuenca, tanto para el caso de las condiciones que proveen los SEs de infiltración (superficial y profunda) como para el caso de la regulación de la erosión hídrica (ver capítulos 2 y 3).

e) **Origen del agua que se consume en cada subcuenca:** Se consultó la cartografía de uso del suelo (CETENAL, 1975) para conocer el tipo de abastecimiento (pozo, manantial o río) del cual dispone la población de cada subcuenca para obtener agua dulce. En base a esa información y al número de habitantes por localidad (INEGI, 2000) se calculó la proporción de los habitantes de cada subcuenca que hacen uso del agua de origen superficial (río) o subterránea (pozo o manantial).

Paso 4.-Análisis integrado de las escalas espaciales y temporales en las cuales se lleva a efecto la provisión del servicio, así como de las contraprestaciones (trade-offs) que se presentan: Se evaluó la posibilidad de que se presentaran las siguientes contraprestaciones

1. Contraprestación entre el agua disponible y las demandas humanas:

a) **doméstica:** Nivel de conflicto entre el agua disponible y la demanda de agua para uso doméstico por parte de la población de cada subcuenca.

b) **agropecuaria:** Nivel de conflicto entre el agua disponible y las áreas que tienen cobertura antrópica, considerando la presencia y extensión de estas últimas como indicadores del consumo de agua para uso agropecuario (usos de suelo agrícola y ganadero) que se presenta en la cuenca.

2. Contraprestación entre objetivos de manejo: Nivel de conflicto existente entre las zonas antropizadas y zonas propuestas para la restauración en cada subcuenca.

3. Contraprestación a nivel temporal: El origen del agua que se consume (superficial y subterránea) en las poblaciones de las distintas subcuencas determinará una contraprestación temporal considerando que el tiempo de recarga de los acuíferos de la zona sea distinto al ciclo hidrológico anual.

Paso 5.- Diseño de escenarios para la provisión de servicios, incorporando un fuerte sesgo en el bienestar humano en su sentido más amplio: Para estimar las contraprestaciones 1 y 2 se aplicó la metodología de Análisis Multicriterio Espacial (AMCE). Puesto que los mapas-criterio obtenidos en pasos anteriores proporcionaban información que estaba expresada en distintas unidades de medida, se realizó un proceso de normalización para transformarlos

a una escala común que permitiera su manejo y comparación. Asimismo, el análisis requirió que se establecieran los pesos que determinaban la importancia relativa de cada mapa-criterio (Mendoza et al., 1999), y su influencia en el análisis de las contraprestaciones. Se establecieron qué criterios implicaban beneficios y cuáles costos, en términos de la evaluación de cada contraprestación (ver Figuras IV.3, IV.4 y IV.5).

En el caso de la contraprestación a nivel temporal fueron analizados tanto el mapa-criterio como la base de datos que le dio origen (CETENAL, 1975; INEGI, 2000), para luego contrastar esa información con la que Solórzano (2007, en preparación) elaboró sobre el mismo tema mediante encuestas.

Paso 6.- Desarrollo de estrategias de manejo sustentable para asegurar o aumentar la provisión futura de los servicios, así como, de la investigación socio-ecológica que será necesaria para ello: La evaluación multicriterio fue distribuida espacialmente en toda la cuenca, al repetirse para todos los criterios y las subcuencas. El análisis permitió asignar un valor de importancia relativa del nivel de conflicto en cinco rangos (de muy bajo a muy alto) lo que permitió la elaboración de mapas-resultado acerca de las contraprestaciones consideradas. Para el caso del análisis de la contraprestación entre objetivos de manejo, se utilizaron las unidades ambientales generadas a partir de la reclasificación de las unidades morfoedafológicas propuestas por Martínez (2007, ver Anexos IV y V) y la delimitación por subcuencas realizada por Piña (2006, ver Anexo VI).



Figura IV.3. Esquema de decisión multicriterio para evaluar la contraprestación entre la cantidad de agua disponible y las demandas humanas de agua para uso doméstico.

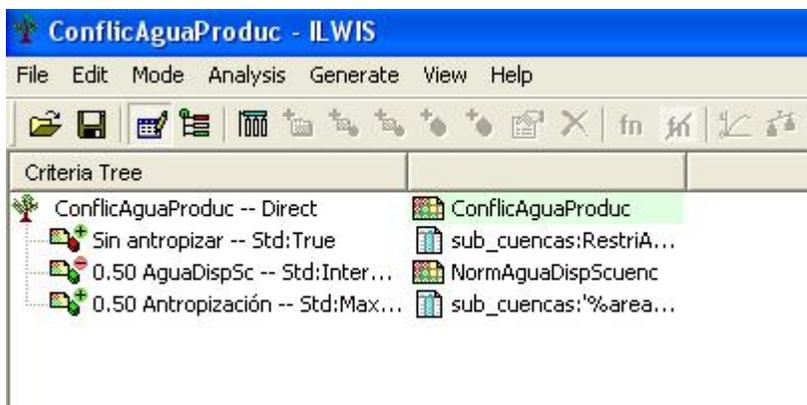


Figura IV.4. Esquema de decisión multicriterio para evaluar la contraprestación entre la cantidad de agua disponible y las demandas humanas de agua para uso agropecuario.

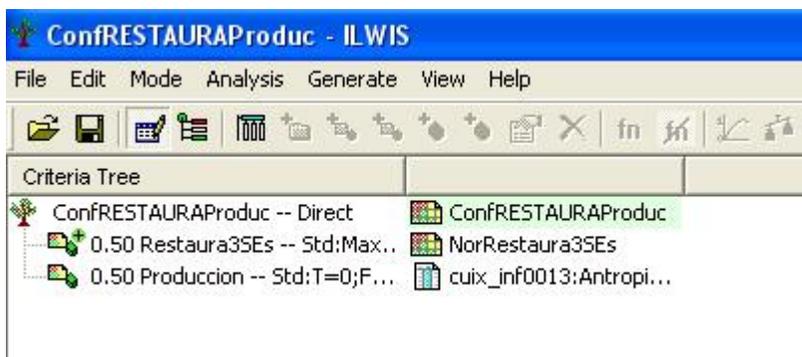


Figura IV.5. Esquema de decisión multicriterio para evaluar la contraprestación entre distintos objetivos de manejo (zonas antropizadas y zonas propuestas para la restauración en cada subcuenca).

IV.IV.- Resultados

Se consideraron las mismas restricciones e impulsores de cambio que Maass y colaboradores (2005) habían señalado para la región Chamela, por lo que la restricción biofísica de mayor relevancia para la cuenca fue la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración anuales, ya que determina la cantidad de agua disponible por subcuenca. Los impulsores de cambio más relevantes para la provisión del SE de agua dulce en la cuenca fueron el cambio en el uso del suelo y la erosión que éste genera.

La información correspondiente a los criterios para estimar la provisión del SE y los conflictos derivados de las contraprestaciones existentes, fue plasmada en las tablas y/o mapas-criterio siguientes:

a) Agua disponible: De acuerdo a la definición propuesta por el M.A. y la opinión de los expertos, el SE de suministro de agua dulce fue definido como la cantidad de agua dulce disponible para cada subcuenca por unidad de área. El análisis de los datos para este criterio hizo evidente que la mayor disponibilidad de agua se encuentra en la subcuencas 1 y 2, con 73,164,000 y 62,475,000 m³ respectivamente, mientras que las 15, 14 y 13 tienen los valores más bajos de agua disponible al año; las dos primeras incluso registran valores anuales de cero (ver Cuadro IV.2).

b) Demanda anual de agua para consumo doméstico: Las subcuencas que registran una mayor demanda son las 15 y la 9, debido a que son las más pobladas de la cuenca, por lo que requieren al año 34,347 y 26,408 m³ respectivamente, a diferencia de las subcuencas 14 y 4 que al no contar con población humana no presentan demanda alguna (ver Cuadro IV.2).

c) Relación cobertura antrópica-cobertura natural: Las subcuencas que se encuentran más antropizadas son la 3, 2 y 5, con 67.7%, 52.4% y 50.8%, respectivamente. Las subcuencas que poseen mayor área conservada son la 14 y la 12 (ver Figura IV.6 y Cuadro IV.1).

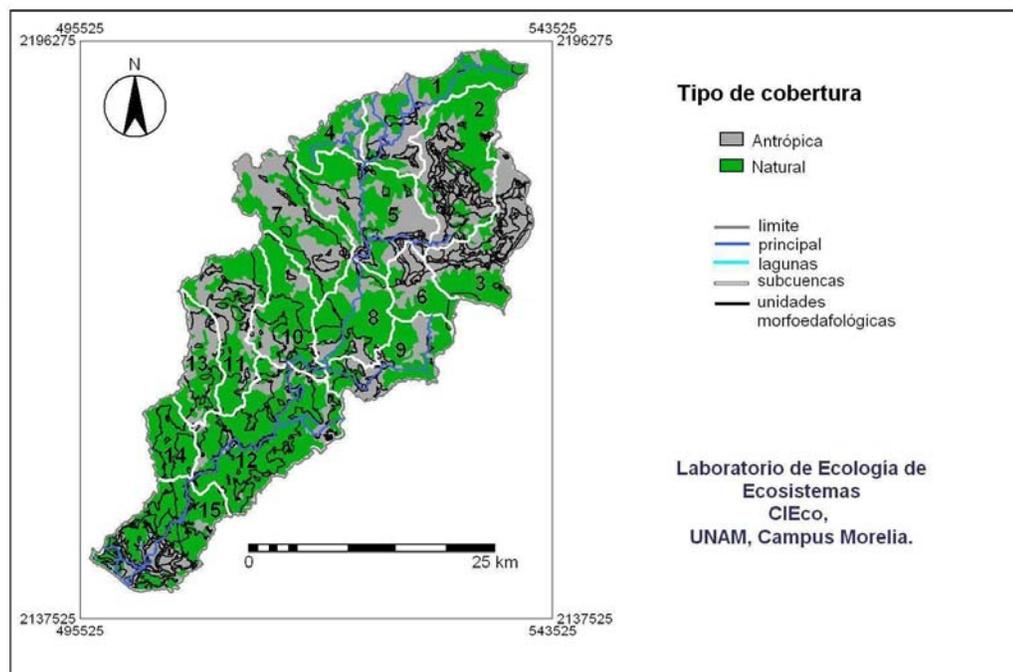


Figura IV.6. Mapa Relación cobertura antrópica-cobertura natural. La numeración corresponde a las subcuencas.

d) Zonas propuestas para restauración ecológica: La suma de las áreas propuestas para la restauración de las condiciones que mantienen los SEs de infiltración (superficial y profunda) y de regulación de la erosión hídrica (ver capítulos 2 y 3) con valores muy altos-altos ocupan el 35.1% de la cuenca, siendo las que presentan un mayor porcentaje de área con necesidades de restauración las subcuencas 1, 3 y 7, con porcentajes de 7.7, 5.8 y 5.7 respectivamente (ver Cuadro IV.2 y Figura IV.7).

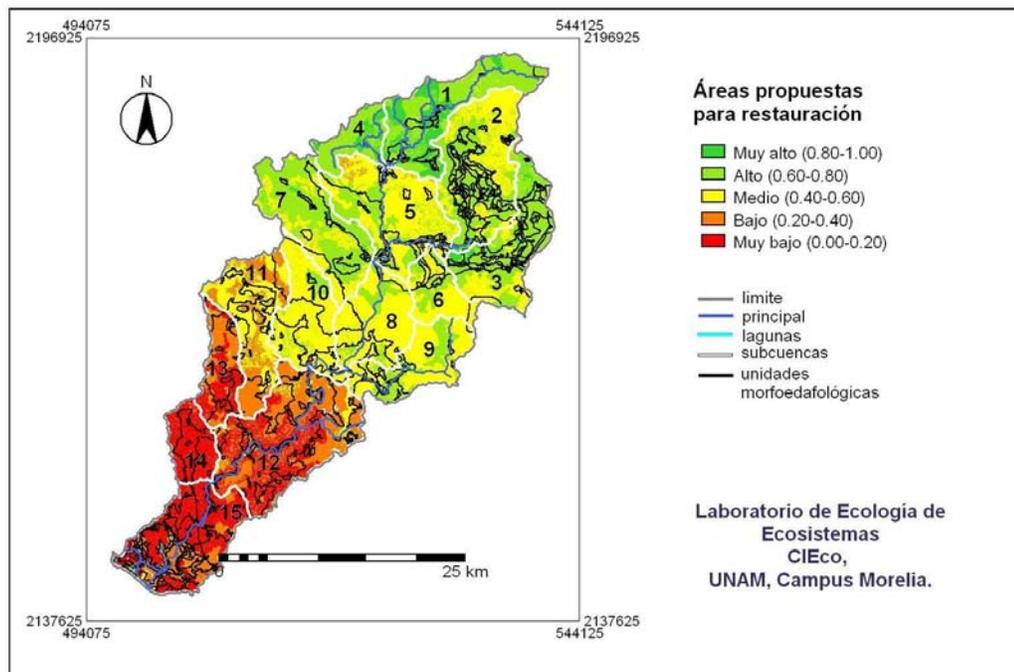


Figura IV.7. Mapa que presenta la suma de las áreas propuestas para la restauración de las condiciones que mantienen los SEs de infiltración (superficial y profunda) y de regulación de la erosión hídrica (ver capítulos 2 y 3). La numeración corresponde a las subcuencas.

e) Origen del agua que se consume en cada subcuenca: Nueve de las subcuencas (3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12) obtienen el agua para consumo doméstico exclusivamente de fuentes superficiales, es decir, del río y los arroyos. La subcuenca 13 obtiene el 100% del agua que requiere de un manantial, mientras que en la subcuenca 15 el 90% de la población la obtiene de pozo y sólo el 10% del río (CETENAL, 1975 y Solórzano, 2007 en preparación). En las subcuencas 1 y 2, alrededor del 50% de la población obtiene el agua de manantial la primera y de pozo la segunda, el resto de la población se abastece del río y arroyos. Las subcuencas 4 y 14 no tienen población humana por lo que no ejercen ningún consumo (ver Cuadro IV.2).

Cuadro IV.2.Cifras relevantes acerca del agua disponible en la cuenca, la demanda para uso doméstico, el origen del agua que se consume y conflictos asociados.

Núm. sub-cuencas	Área (Km ²)	Área (m ²)	Promedio mm de agua al año [*] .	Promedio m ³ al año de agua potencialmente disponible por subcuenca	Núm. de habitantes por sub-cuenca ^{**} .	Demanda anual de agua (m ³) para uso doméstico por subcuenca	% de la población de la subcuenca que aprovecha el agua subterránea o superficial.	Habitantes usan agua superficial	Habitantes uso agua subterránea	% de área para restauración en relación a toda la cuenca	% de área en conflicto que presenta cada subcuenca en relación al área total de la cuenca
1	84	84,000,000	871	73,164,000	622	11,351,500	52% manantial	298	324	7.66	3.42
2	105	105,000,000	595	62,475,000	526	9,599,500	50% pozo	261	265	5.63	5.13
3	80	80,000,000	640	51,200,000	140	2,555,000	100% río	140	0	5.72	4.89
4	30	30,000,000	875	26,250,000	0	0	Sin población	0	0	2.72	0.79
5	98	98,000,000	422	41,356,000	1,008	18,396,000	100% río	1008	0	3.09	4.67
6	34	34,000,000	476	16,184,000	269	4,909,250	100% río	269	0	1.03	0.96
7	88	88,000,000	651	57,288,000	564	10,293,000	100% río	564	0	5.69	4.02
8	63	63,000,000	467	29,421,000	34	620,500	100% río	34	0	1.11	1.37
9	59	59,000,000	469	27,671,000	1,447	26,407,750	100% río	1447	0	1.62	2.06
10	65	65,000,000	458	29,770,000	169	3,084,250	100% río	169	0	0.83	1.65
11	77	77,000,000	308	23,716,000	61	1,113,250	100% río	61	0	0.00	2.66
12	137	137,000,000	84	11,508,000	185	3,376,250	100% río	185	0	0.00	1.91
13	41	41,000,000	5	205,000	210	3,832,500	100% manantial	0	210	0.00	1.52
14	33	33,000,000	0	0	0	0	Sin población	0	0	0.00	0.04
15	93	93,000,000	0	0	1,882	34,346,500	90% pozo	26	1856	0.00	2.19
TOTAL	1087			450,208,000	7,117	129,885,250					

^{*} Calculado a partir de datos del balance hídrico (Piña 2006).

^{**} Calculado a partir de datos INEGI (2000).

1. Contraprestación entre el agua disponible y las demandas humanas:

a) **doméstica:** Los niveles de conflicto que derivan de la contraprestación entre el agua superficial disponible y la demanda de agua para uso doméstico (ver Cuadro IV.2) por parte de la población de cada subcuenca que hace uso del agua superficial, pueden apreciarse en el mapa Figura IV.8, siendo las subcuencas 9, 5, 12 y 15, las que presentan los mayores niveles de conflicto en la cuenca. Las subcuencas 6, 10 y 11 tienen valores de conflicto medios. Las subcuencas 1 y 2 presentan un bajo nivel de conflicto en relación a las otras subcuencas. Las subcuencas 4, 13 y 14 no presentan conflicto alguno en la contraprestación analizada.

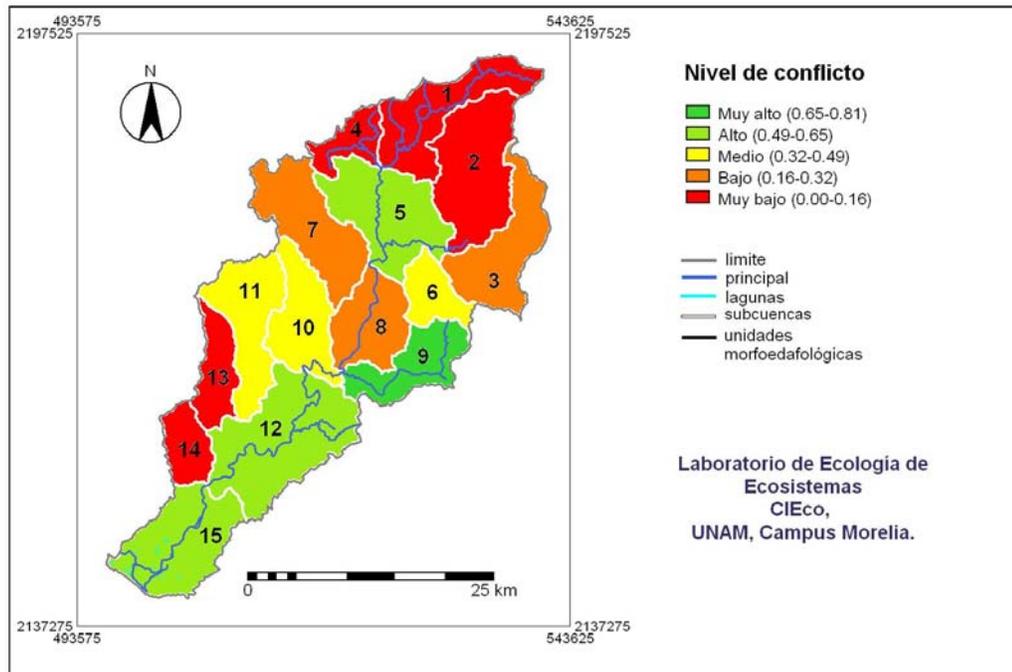


Figura IV.8. Contraprestación y nivel de conflicto entre el agua disponible y la demanda de agua para uso doméstico. La numeración corresponde a las subcuencas.

b) **agropecuaria:** La contraprestación entre el agua disponible por subcuenca y las áreas que tienen cobertura antrópica (que fueron consideradas como consumidoras de agua para uso agropecuario) representa distintos niveles de conflicto que pueden observarse en la Figura IV.9. Las subcuencas 3, 6, 13 y 15 registran el nivel de conflicto más alto de la cuenca. Les siguen la 4, 5, 9, 10, 11 y 12 que presentan un nivel de conflicto alto. Las subcuencas 2, 7 y 8 presentan niveles de conflicto medios. Mientras que la subcuenca 1 tiene un nivel de conflicto bajo y la 14 registra el conflicto más bajo de la cuenca.

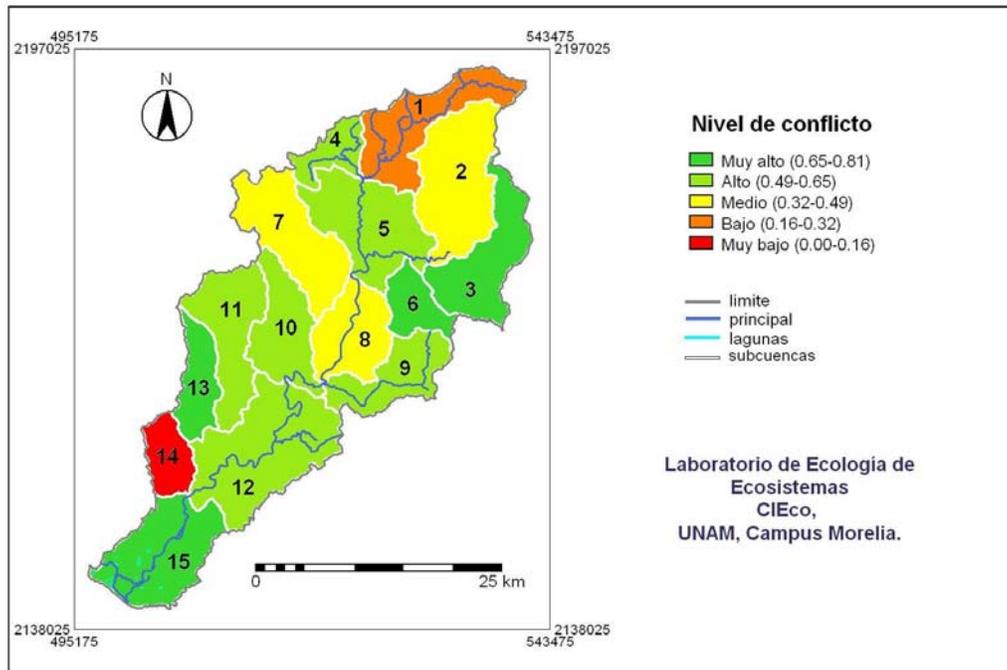


Figura IV.9. Contraprestación y nivel de conflicto entre el agua disponible y la demanda de agua para uso agropecuario. La numeración corresponde a las subcuencas.

2. Contraprestación entre objetivos de manejo: La contraprestación entre los dos objetivos de manejo considerados, es decir la restauración y las actividades productivas agropecuarias representadas por el área antropizada, abarca un área en conflicto de 38% de la cuenca, 25% del cual corresponde a las zonas en que el conflicto es muy alto y en 13% sólo es alto. Las subcuencas 2, 3, 5 y 7 son las que poseen mayores áreas y nivel de conflicto (ver Cuadro IV.2 y Figura IV.10). Las unidades en las que es más frecuente la presencia de conflicto son las II, IX y XIII, sin embargo las que ocupan un área de conflicto mayor a lo largo de la cuenca son las II, IX y V (Figura IV.10).

Por otro lado, existen áreas que coinciden con las unidades mencionadas y la provisión de distintos SEs en las diferentes subcuencas en valores altos. Las subcuencas 1, 4, 2, 7 y 3 presentan las áreas más extensas de coincidencia con la provisión del SE de infiltración superficial (ver capítulo 2 y Cuadro IV.3). La misma condición se registra en las subcuencas 2, 3, 5, 6 y 15 pero para el SEs de infiltración profunda. Para el SE de regulación de la erosión hídrica las subcuencas 5, 7, 9, 11, 13 y 15 son las que registran la mayor área de coincidencia (ver capítulo 3 y Cuadro IV.3).

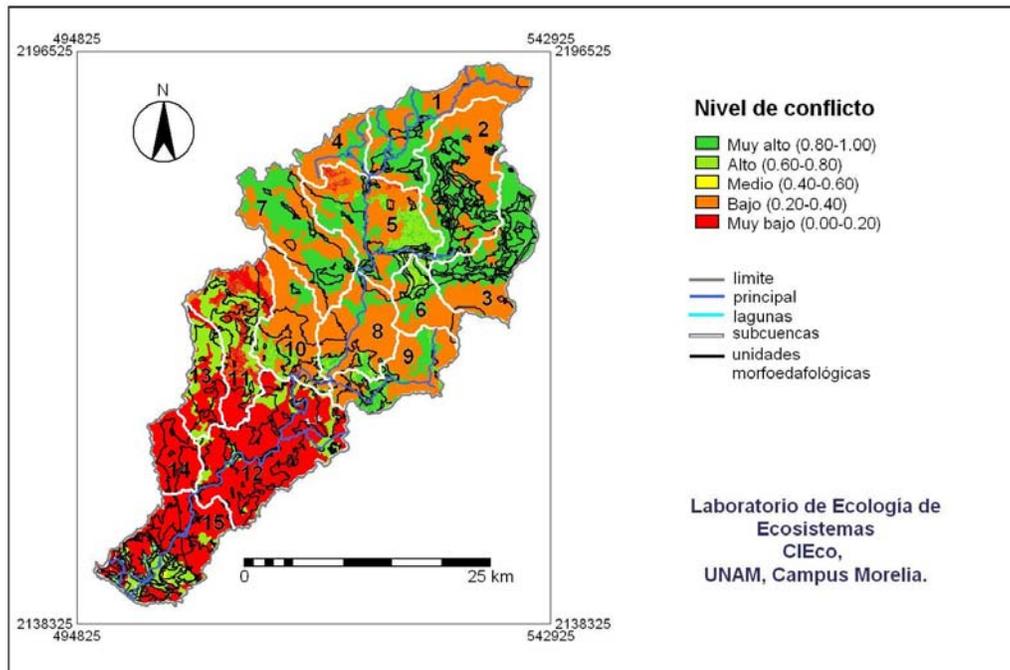


Figura IV.10. Contraprestación y nivel de conflicto entre objetivos de manejo (restauración y actividades productivas agropecuarias). La numeración corresponde a las subcuencas.

Cuadro IV.3. Unidades ambientales en las que se presentan niveles de conflictos muy altos y altos para cada subcuenca. La numeración corresponde a la empleada por Martínez (2007) para denominar a las unidades morfoedafológicas de la cuenca (ver Anexos IV y V).

Sub-cuenca	Unidades en las que se presenta conflicto	Coincidencia en unidades de conflicto del SE en infiltración superficial	Coincidencia en unidades de conflicto del SE en infiltración profunda	Coincidencia en unidades de conflicto del SE regulación de la erosión hídrica	Coincidencia en unidades propuestas para restauración asociadas al SE de infiltración.	Coincidencia en unidades propuestas para restauración asociadas al SE de regulación de la erosión hídrica
1	II, IX, XIII, VII	II, IX	XIII, VII	-----	II, IX	II, IX
2	II, IX, XV, XVIII, XIII, XXI	II, IX, XV	XVIII, XIII, XXI, XV, II	-----	II, IX, XV, XII y XXIII	II, IX
3	II, IX, XIX, VIII, XV, XIV, XXI, XXII, XXIV, XVIII, XIII, XXV	II, IX	XIX, XV, XIV, XXI, XXII, XXIV, XVIII, XIII, XXV, VIII	-----	II, XIX, XII, IX, XVIII, XXII, XIII, I, XXIV	II, IX
4	II, IX, VII	II y IX	VII	-----	II, IX	II, IX
5	II, V, VII, XIII, XVIII, XXI, XXIV	II	V, XII, VII, XIII, XVIII, XXI, XXIV	II, IX, V y XIII	II, V, XV, IX	II, V
6	II, XVIII, V, XVI, XVII y, VII, XIII, IX	II y IX	XVIII, V, VII, XIII	II	II, V, IX, XVI, XIII	II, V, IX
7	II, IX y V, XII, VII	II, IX, V	V, IX, XII, VII	II	II, V, IX, VII	V, II, IX
8	II y IX	II, IX	-----	II y IX	IX, II, III, XV	II
9	II y IX, XVIII	II, IX	XVIII	II y IX	IX, II, XV	II, IX
10	IX, II y III	IX, II	-----	IX	IX, III, II	-----
11	II, IX, XVIII	-----	XVIII	IX y II	II	-----
12	IX, II, XIII	-----	XIII	II	-----	-----
13	IX y II	-----	-----	II y IX	-----	-----
14	II y IX	-----	-----	-----	-----	-----
15	XXXIII, XXXVII, XXXII y XLIII, XLI	-----	XLIII, XXXIII, XXXVII, XLI	XLIII, XLI, XXXII, XXXIII, XXXVII	-----	-----

3. Contraprestación a nivel temporal

En la cuenca, el 37.3% de la población depende del agua subterránea (manantial o pozo), el resto aprovecha fuentes superficiales como el río y los arroyos. En el caso de la subcuenca 15, son 1,856 personas, el 90% de su población, las que hacen uso de agua subterránea. Le sigue la subcuenca 1 con el 52% de sus habitantes, lo que equivale a 324 personas. Después la subcuenca 2 con 265 personas que equivalen al 50% de su población, y por último, la subcuenca 13 con 210 habitantes que constituyen el 100% de su población. Las otras subcuencas sólo consumen agua de fuentes superficiales, o en el caso de las subcuencas 4 y 14 no presentan consumo alguno porque carecen de habitantes (ver Figura IV.11 y Cuadro IV.2)

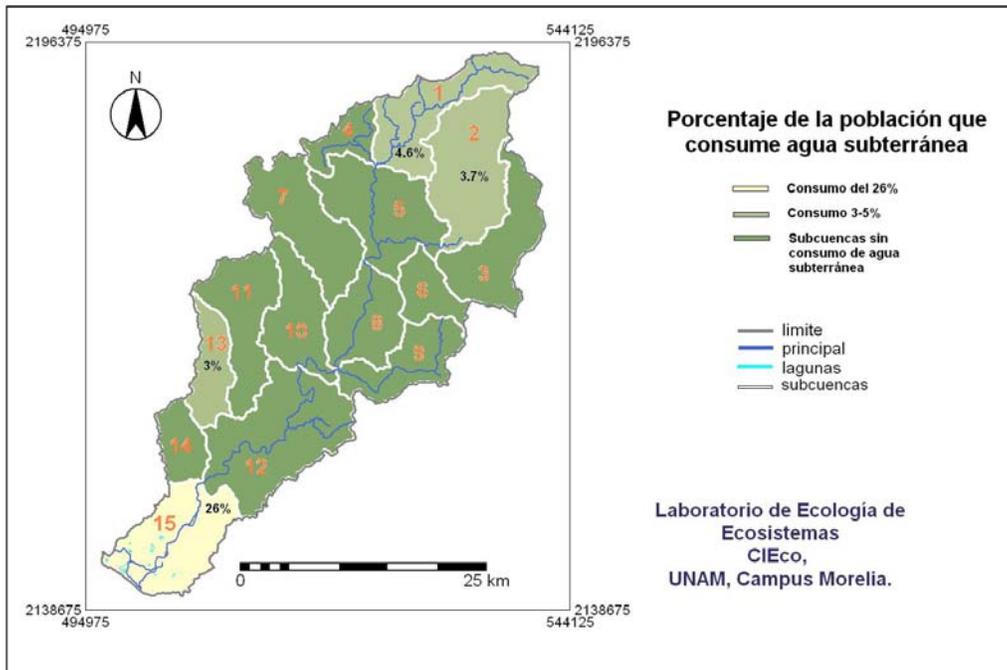


Figura IV.11. Mapa que muestra el porcentaje de la población total que depende del agua subterránea (manantial o pozo) en la cuenca. La numeración en color naranja corresponde a las subcuencas.

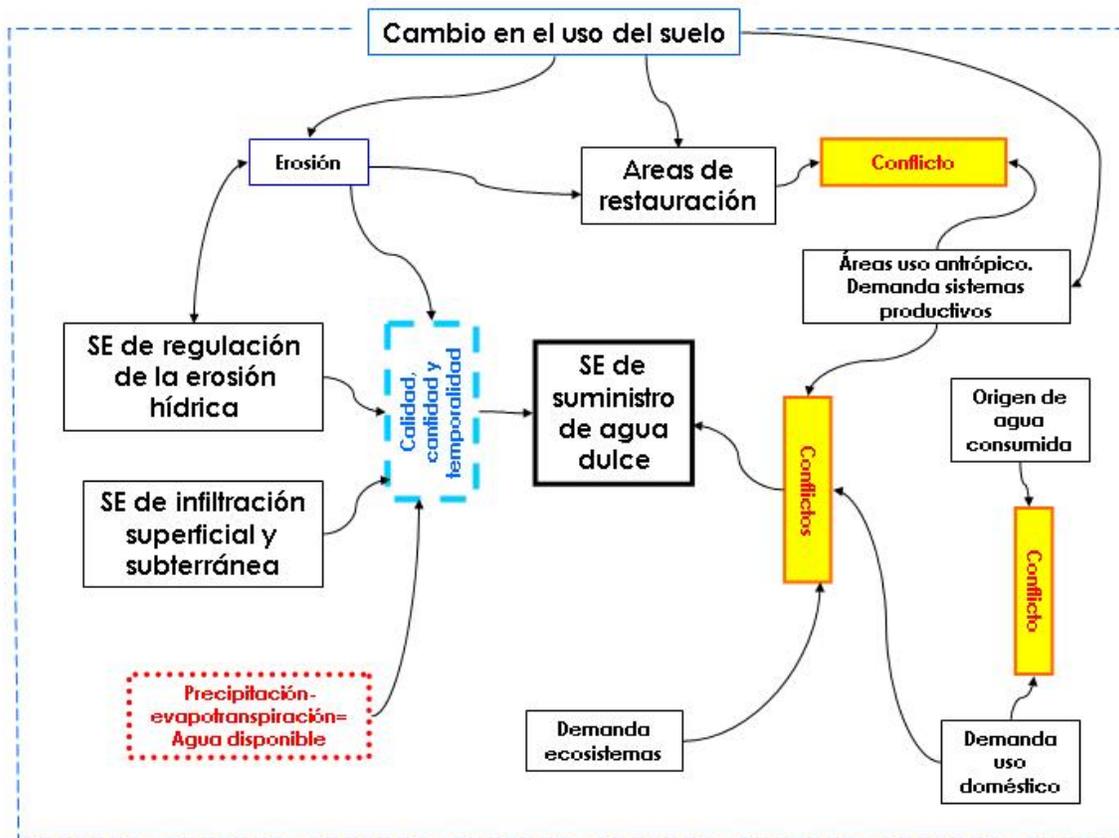


Figura IV.12. Esquema general de las relaciones en los SEs, contraprestaciones y los impulsores de cambio observados en la cuenca.

IV.V.- Discusión

Agua disponible: El SE de suministro de agua dulce se presenta principalmente en las subcuencas 1 y 2, debido a que reciben más precipitación que las subcuencas de la zona costera (Piña, 2006). Además, la altitud a la que se encuentran ambas subcuencas genera condiciones de temperatura y humedad que favorecen que la precipitación anual sea mayor a la evapotranspiración potencial (Piña, 2006). Este excedente drena a la parte baja de la cuenca, lo que permite una mayor disponibilidad de agua que en la parte baja (subcuencas 15, 14 y 13) en donde las condiciones son contrarias a las referidas para la parte alta (Barradas y Fanjul, 1985). Asimismo, la superficie en la que es posible la captación es considerablemente mayor a la de otras subcuencas (ver Cuadro IV.2).

1. Contraprestación entre el agua disponible y las demandas humanas.

a) doméstica:

El alto nivel de conflicto que registran las subcuencas 9 y 5 se explica, por un lado, a que en ellas se presenta un mayor número de habitantes que aprovecha el agua de fuentes superficiales y, por el otro, a que el agua disponible en ellas es relativamente bajo en comparación con el resto de la cuenca (ver Cuadro IV.2). Llama la atención el caso de las subcuencas 12 y 15; en la primera existe poca agua disponible, mientras que en la segunda no

la hay, no obstante en ambas la demanda de agua de fuentes superficiales que la población exige (también subterráneas aunque éstas no fueron consideradas para este análisis), explica el nivel de conflicto que presentan ambas subcuencas. Las subcuencas 1 y 2 registran la mayor cantidad de agua disponible en la cuenca y cuentan con una escasa población que utiliza las fuentes superficiales (ver Cuadro IV.2), por ello es que presentan un bajo nivel de conflicto en relación a las otras subcuencas. Las subcuencas 4 y 14 carecen de población, mientras que los habitantes de la 13 no hacen uso del agua superficial sino sólo de la subterránea, por estos motivos las 3 subcuencas mencionadas no presentan conflicto alguno para la contraprestación analizada.

Las subcuencas que no presentan conflicto derivado de esta contraprestación generan repercusiones hacia otras zonas de la cuenca, por ejemplo, el consumo que realizan los pobladores de la parte alta genera un excedente que puede ser aprovechado a través del río por los habitantes de cuenca abajo (Southern African M. A., 2004) Sin embargo, hay que recordar que las subcuencas 1, 2, 13 y 15 cubren parte o toda la demanda de agua a partir de fuentes subterráneas, hecho que contribuye a considerar una contraprestación de tipo temporal, especialmente en el caso de las cuencas 15 y 12 (Southern African M. A., 2004; Manuel Maass com. pers.) que no disponen de agua superficial proveniente del SE de suministro de agua dulce, por lo que no contribuyen a la recarga, salvo en la medida en que favorezcan que la recarga

se realice a partir del río cuya agua constituye el excedente mencionado cuenca arriba. Es importante señalar que al desconocerse, por el momento, el comportamiento de la cuenca hidrográfica, el análisis únicamente consideró la disponibilidad de agua superficial, así como la demanda de la misma que fue calculada mediante el índice de consumo mínimo por persona (WHO, 2002) para cada subcuenca, lo que aunque representa una aproximación útil, es probable que subestime las necesidades reales de la población de la cuenca.

b) agropecuaria:

En el caso de la contraprestación entre las áreas dedicadas a actividades agropecuarias y el agua disponible en la cuenca, el análisis admite que a pesar de que algunas subcuencas tengan una cobertura antrópica poco extensa en relación a su tamaño, como en el caso de la subcuenca 15, el conflicto presente puede ser muy alto, debido a que no existe agua disponible para esa unidad por parte del SE de suministro de agua dulce. Por el contrario, las subcuencas 1 y 2 en las cuales existe la mayor cantidad de agua disponible en la cuenca, presentan un nivel de conflicto menor pese a que el área antropizada es considerable. De acuerdo a los datos acerca de las fuentes de abastecimiento de agua para cada localidad (CETENAL, 1975), así como los datos de Solórzano (2007, en preparación) en cuanto al agua utilizada en las parcelas, hacen evidente que a lo largo de la cuenca, por ejemplo, en la subcuenca 15 más de la mitad o en la subcuenca 1, la cuarta parte del agua que se utiliza, proviene de pozo o manantial respectivamente. Por ello, el nivel

de conflicto que indica esta contraprestación puede considerarse como indicador de que, al menos en esas cuencas, existen necesidades muy concretas del recurso hídrico para la actividad agropecuaria y como no se tiene siempre de fuentes superficiales se recurre a la subterránea, hecho que implica de nuevo otra contraprestación, tipo de temporal e incluso intergeneracional. La importancia de considerar el nivel de conflicto de por las contraprestaciones relacionadas a las actividades agropecuarias, radica en que pese a que las condiciones climáticas regionales no sean las más adecuadas para satisfacer las necesidades hídricas de cultivos como el maíz (De Ita-Martínez y Barradas, 1986) o de hatos de ganado, se trata de actividades productivas que cuentan con gran aceptación en la zona, lo cual queda de manifiesto si se observa que poco más del 50% de la población ocupada de la cuenca se dedica al sector primario. Para lidiar con la ausencia de datos precisos, fue necesario considerar dentro de la cobertura antrópica a los usos de suelo agrícola y ganadero, asumiendo la variación que pudieran tener en sus requerimientos de agua. Aunque los resultados constituyan sólo una aproximación acerca de este tipo de contraprestación entre el SE de suministro de agua dulce y la demanda por parte de las actividades productivas, su importancia radica en que hace explícitas, en alguna medida, las repercusiones que tiene el cambio en el uso del suelo, como el impulsor de cambio más importante para la cuenca (Maass et al., 2005).

2. Contraprestación entre objetivos de manejo.

La importancia cultural de la que goza la producción pecuaria en la región (Castillo et al., 2006), así como el hecho de que este tipo de actividad, junto con la agrícola, ofrecen una rentabilidad económica mayor en el corto plazo que la que promete la conservación (Burgos, 1999), constituyen impulsores de cambio relevantes para la transformación de los ecosistemas en la cuenca. Asimismo contribuyen a elevar el nivel de conflicto derivado de la contraprestación existente entre las áreas propuestas para ser restauradas y aquéllas en las que se llevan acabo actividades agropecuarias, especialmente si se considera que parte de dichas áreas podrían aumentar la provisión de SEs, lo cual es muy claro en la parte alta de la cuenca. Mientras que en la parte media y baja de la cuenca, el conflicto hace evidente la competencia que ejerce el ser humano, a través de sus actividades productivas, con los ecosistemas naturales, ante la reducida provisión de agua que está disponible cada año en la cuenca (CONAF, 1997; Vörösmarty et al., 2005). Por todo ello, es que adquiere relevancia reconocer dicha contraprestación y considerarla para aumentar la factibilidad de cualquier acción de manejo que pretenda realizarse (ver Figura IV.12),. De igual manera, la realización de un programa de restauración en la cuenca aumentaría las posibilidades de que los ecosistemas continuaran proporcionando SEs, lo que permitiría que se cumplieran las metas propuestas por el desarrollo de la zona (Vörösmarty et al., 2005).

3. Contraprestación a nivel temporal.

El déficit hídrico que se presenta casi todo el año, tanto en la cuenca del río Cuitzmala, como en la región Chamela (Barradas y Fanjul, 1985; Burgos, 1999), explica en alguna medida el por qué la tercera parte de la población de la cuenca hace uso del agua subterránea, especialmente en el caso de las subcuencas de la parte baja que son las que disponen de menos agua superficial al año (Piña, 2006). Mientras que en 2 de la subcuencas de la parte alta, no es clara la razón del por qué la mitad del consumo de agua dulce depende del agua subterránea, aún cuando éstas son las que disponen de más agua superficial al año. Sin embargo, aunque se desconoce el estado de explotación en el que se encuentra el acuífero del que dependen dichas subcuencas, no se considera que ejerzan un impacto considerable en esta contraprestación, debido al reducido número de pobladores que albergan. El caso de la subcuenca 15, la más poblada, es distinto en varios sentidos, pues aunque al año carece o cuenta con un reducido suministro de agua dulce de la precipitación, se beneficia de que el caudal principal del río acumule el agua proveniente cuenca arriba, así mismo, la demanda de la población se satisface casi por completo por agua subterránea. Todo ello dificulta que la población visualice que se favorece de un SE que es resultado de la cuenca como unidad funcional y que depende de una escala de tiempo que probablemente sea mayor a la anual, puesto que está determinada por el tiempo de recarga. Se trata de un SE que aunque es aprovechado en la actualidad se viene

generando tiempo atrás, y que probablemente haya sido favorecido por la conservación o el manejo que llevaron a cabo los pobladores de la zona (Manuel Maass com. pers.), lo que establece una contraprestación entre los usuarios presentes y los pasados. De igual manera, el hecho de que en la actualidad la población haga uso de las fuentes subterráneas, no asegura la disponibilidad futura del recurso hídrico, lo que da origen a otra contraprestación temporal que involucra tanto a la generación de usuarios actual como a las futuras (Southern African M. A., 2004).

La cuenca del río Cuitzmala, al igual que la región Chamela, se encuentran en el centro de distintos intereses y objetivos de desarrollo (ver Figura IV.12), por ello y pese a que las contraprestaciones sean un componente inevitable de las interacciones entre el ser humano y los recursos hidrológicos (Vörösmarty et al., 2005), es necesario aceptarlas e incorporarlas dentro de los esquemas de planificación, especialmente en una región cuya limitante principal para el desarrollo es el agua disponible (De Ita-Martínez y Barradas, 1986; Maass et al., 2005, Maass, 2007).

IV.VI.- Conclusiones y recomendaciones

La representación espacialmente explícita del nivel de conflicto de las contraprestaciones asociadas a los SEs hidrológicos que fueron evaluadas, es relevante en términos de su efecto en el SE de suministro de agua dulce y para ser consideradas por las acciones de manejo o restauración que puedan realizarse en la cuenca.

Las contraprestaciones entre el agua disponible y la demanda humana, pusieron de manifiesto que existe una mayor competencia por el agua para el uso doméstico en la parte media y baja de la cuenca, mientras que la competencia que ejercen las actividades agropecuarias se encuentra generalizada a casi toda la cuenca.

El 38% del área de la cuenca presenta un alto nivel de conflicto derivado de la contraprestación entre los objetivos de manejo de la restauración y las actividades agropecuarias.

Considerando a la cuenca como unidad funcional, se observó que la contraprestación que genera el uso del agua subterránea, especialmente en la parte baja, compromete el abasto del SE de suministro de agua dulce entre generaciones.

El presente trabajo fue realizado dentro de un contexto en el que existe una enorme riqueza de información científica en la región resultado de más de 20 años de investigación ecológica a largo plazo llevada a cabo por la UNAM, sin embargo, a nivel de la cuenca la información detallada aún es escasa. Por ello, la utilización del enfoque multicriterio y el juicio experto fueron importantes para lograr los resultados expuestos, lo cuales pese a no ser precisos, sí constituyen una aproximación útil para mejorar la comprensión sobre el estado de los SEs hidrológicos y la problemática que les es propia en este sitio de estudio en particular. Dentro de una lógica de manejo adaptativo, el valor de este trabajo radica en que contribuye, en alguna medida, a la construcción del conocimiento sobre la cuenca.

En este mismo sentido parece necesario continuar el trabajo para generar datos de campo que permitan entender mejor las contraprestaciones, así como las preferencias, intereses y juicios de valor del amplio rango de actores (beneficiarios, tomadores de decisiones, inversionistas, expertos locales y científicos) que tienen influencia sobre los SEs, por ejemplo, dentro del marco de referencia de la planificación participativa.

IV.VII.- Bibliografía citada

Barradas, V., y L. Fanjul. 1985. Equilibrio hídrico y evapotranspiración en una selva baja caducifolia de la costa de Jalisco, México. *Biótica* 10:2.

Bosque, J. S. 2001. Planificación y gestión del territorio. De los SIG a los sistemas de ayuda a la decisión espacial (SADE). En: *El Campo de las Ciencias y las Artes*, Madrid, España, No. 138:137-174.

Burgos, Tornadu, Ana Laura. 1999. Dinámica hidrológica del bosque tropical seco en Chamela, Jalisco, México. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. 130 pp.

Castillo, A. M.A. Magaña, A. Pujadas, L. Martínez y C. Godínez. 2005. Understanding rural people interaction with ecosystems: a case study in a tropical dry forest of Mexico. *Ecosystems* 8: 630-643

Castillo, A., A. Pujadas, M. A. Magaña, L. Martínez y C. Godínez. 2006. Comunicación para la conservación: análisis y propuestas para la Reserva de la Biósfera Chamela-Cuixmala, Jalisco. En: Barahona A. y L. Almeida (Eds). *Educación para la Conservación*. Facultad de Ciencias y Programa Universitario de Medio Ambiente UNAM: Pp:93-109

Challenger, A. 1998. Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México. Pasado, presente y futuro. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Universidad Nacional Autónoma de México, Agrupación Sierra Madre del Sur, S. C, México, D.F.

CONAF. 1997. Economía ambiental y su aplicación a la gestión de cuencas hidrográficas. *Environmental Resources Management*, Departament for Internacional Development, CONAF, Ministerio de Agricultura Gobierno de Chile.

Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R., Paruelo, J., Raskin, R., Sutton, P., van den Belt, M., 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387 (15), 253–260.

De Groot R. S., M. A. Wilson y R. Boumans. 2002. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. Special issue: The Dynamics and Value of Ecosystem Services: Integrating Economic and Ecological Perspectives. *Ecological Economics* 41:393–408.

De Ita-Martínez, C. y V. Barradas. 1986. El clima y los patrones de producción agrícola en una selva baja caducifolia de la costa de Jalisco, México. *Biótica* 11: 237-245.

Huth, A., M. Drechsler, P. Koehler. Multicriteria evaluation of simulated logging scenarios in a tropical rain forest. *Journal of Environmental Management* 71:321–333

INE, SEMARNAT e Instituto de Geografía, UNAM. 2000. Uso de Suelo y Vegetación, escala 1:250,000. Cobertura preparada para el análisis de cambio de uso del suelo del Inventario Nacional Forestal, 2000. INE, México D.F.

INEGI 2000. XII Censo Nacional de Población y Vivienda. INEGI, México.

CETENAL. 1975. Cartas de uso del suelo 1:50,000. E13B 11, 12, 21, 22 y 31

García-Oliva, F., R. Martínez-Lugo y J. M. Maass. 1995. Long-term net soil erosion as determined by ¹³⁷Cs redistribution in an undisturbed and perturbed tropical deciduous forest ecosystem. *Geoderma* 68:135-147.

Janetos, A. C., R. Kasperson, T. Agardy, J. Alder, N. Ash, R. De Fries y G. Nelson. 2005. Condition and trends in systems and services, Trade-offs for human well-being, and implications for the future. En: B. Huntley y R. Norgaard (Eds.). *Ecosystems and human well-being: current state and trends. Findings of the Condition and Trends Working Group. Millennium Ecosystem Assessment Series.* Island Press.

Kerr, J. 2003. Los beneficios compartidos del manejo de la cuenca hidrológica de Sukhomajri, India. En S. Pagiola, J. Bishop y N. Landell-Mills (Eds.): *La venta de servicios ambientales forestales. Mecanismos basados en el mercado para la conservación y el desarrollo.* Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT.

Maass, J. M., C. Jordan, and J. Sarukhán. 1988. Soil erosion and nutrient losses in a seasonal tropical agroecosystems under various management techniques. *Journal Applied of Ecology* 25:595-607.

Maass, J.M., V.J. Jaramillo, A. Martínez-Yrizar, F. García-Oliva, A. Pérez-Jiménez y J. Sarukhán. 2002. Aspectos funcionales del ecosistema de Selva Baja Caducifolia en Chamela, Jalisco. En: F. A. Noguera, J.H. Vega, A. N. García-Aldrete y Quesada, M. (Eds.). *Historia Natural de Chamela, Instituto de Biología, UNAM.* Pp: 525-542.

Maass, J., P. Balvanera, A. Castillo, G. C. Daily, H. A. Mooney, P. Ehrlich, M. Quesada, A. Miranda, V. J. Jaramillo, F. García-Oliva, A. Martínez-Yrizar, H. Cotler, J. López-Blanco, A. Pérez-Jiménez, A. Búrquez, C. Tinoco, G. Ceballos, L. Barraza, R. Ayala, and J. Sarukhán. 2005. Ecosystem services of tropical dry forests: insights from long-term ecological and social research on the Pacific Coast of Mexico. *Ecology and Society* 10(1):17.

Maass, J. M. 2003. Principios generales sobre manejo de ecosistemas. En: Ó. Sánchez, E. Vega, E. Peters y O. Monroy-Vilchis (Eds). *Conservación de ecosistemas templados de montaña en México* INE, México..

M.A. 2003. *Ecosystems and human well-being: a framework for assessment*. Millennium Ecosystem Assessment Island Press, Washington, D.C., USA.

Mendoza, G.A., P. Macoun, R. Prabhu, D. Sukadri, H. Purnomo y H. Hartanto. 1999. Guidelines for applying multi-criteria analysis to the assessment of criteria and indicators. The Criteria & Indicators Toolbox Series. Center for International Forestry Research, Jakarta.

Pagiola, S. 2003. Pago por servicios hidrológicos en Centroamérica: enseñanzas de Costa Rica. En: S. Pagiola, J. Bishop y N. Landell-Mills (Eds.) *La venta de servicios ambientales forestales. Mecanismos basados en el mercado para la conservación y el desarrollo*. Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT.

Palacio-Prieto, J.L. , M.T. Sánchez-Salazar, J.M. Casado, E. Propin, J. Delgado , A. Velázquez, L. Chias , M.I. Ortiz, J. González, G. Negrete, J. Gabriel, R. Márquez, T. Nieda, R. Jiménez, E. Muñoz, D. Ocaña, E. Juárez, C. Anzaldo, J.C. Hernández, K. Valderrama, J. Rodríguez, J.M. Campos, H. Vera y C.G. Camacho. 2004. *Indicadores para la caracterización y el ordenamiento territorial*. Secretaría de Desarrollo Social, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.

Piña Poujol Pablo César. 2006. *Regionalización Eco-Hidrológica de la Cuenca del Río Cuitzmala, Jalisco, México*. Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas. Posgrado en Ciencias Biológicas. Centro de Investigaciones en Ecosistemas, UNAM.

Rojas, M. y B. Aylward. 2003. *What are we learning from experiences with markets for environmental services in Costa Rica? A review and critique of the literature*. International Institute for Environment and Development, London.

Sharifi, M.A. y V. Retsios. 2004..Site selection for waste disposal through spatial multiple criteria decision analysis. *Journal of Telecommunications and Information Technology* 3/2004.

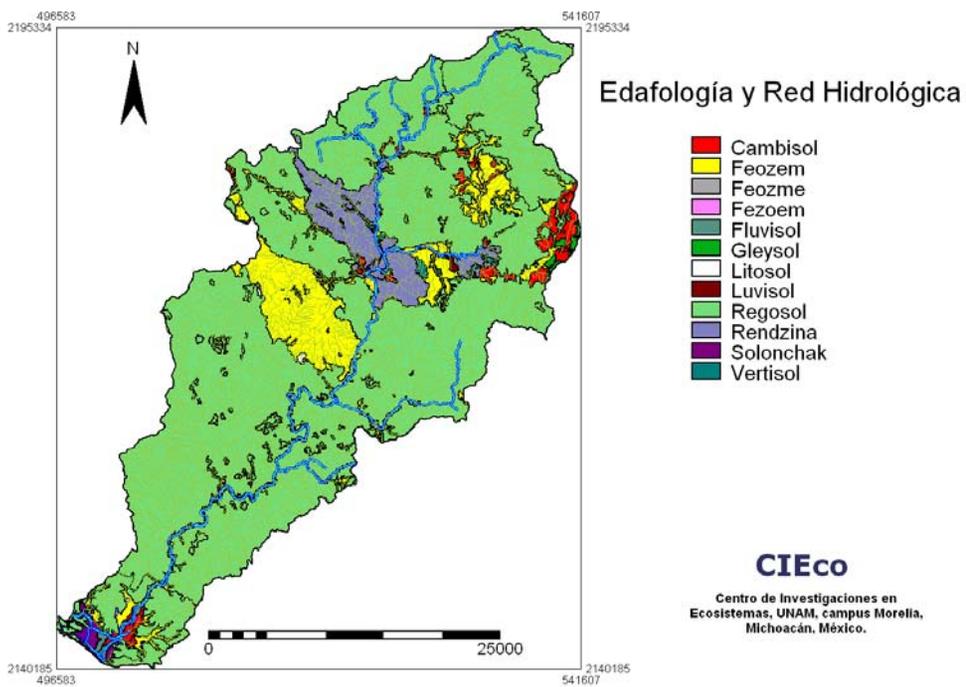
Solorzano, L., S. 2007, en preparación. Percepciones sobre servicios ecosistémicos relacionados con el agua en comunidades rurales de la cuenca del río Cuitzamala, Jalisco. Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas. Posgrado en Ciencias Biológicas. Centro de Investigaciones en Ecosistemas, UNAM.

Southern African Millennium Ecosystem Assessment. 2004. Ecosystem services in the Gariep Basin. E. Bohensky, B. Reyers, A. van Jaarsveld y C. Fabricius (Eds). Sun Press, Stellenbosch University.

Vörösmarty, C. J., C. Le´ve`que, C. Revenga, R. Bos, C. Caudill, J. Chilton, E. M. Douglas, M. Meybeck, D. Prager, P. Balvanera, S. Barker, M. Maass, C. Nilsson, T. Oki, y C. A. Reidy. 2005. Freshwater ecosystem services. F. Rijsberman, R. Costanza and P. Jacobi (Eds.). En: Ecosystems and human well-being: Current state and trends. Findings of the Condition and Trends Working Group. Millennium Ecosystem Assessment Series. Island Press.

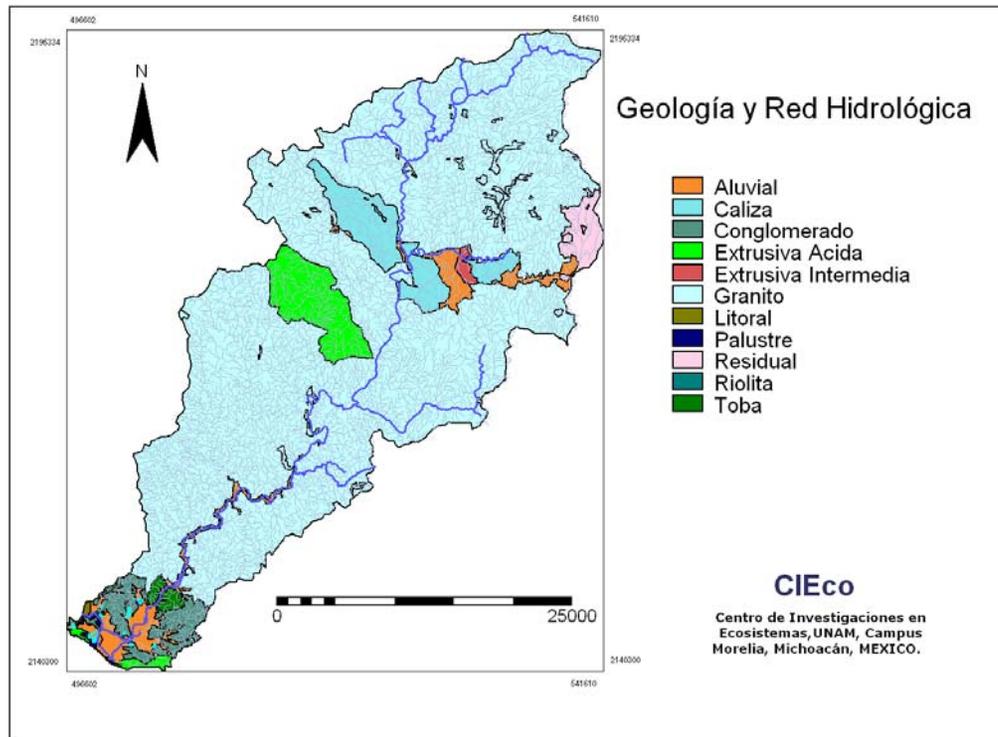
WHO. 2002. The world health report 2002-Reducing Risks, Promoting Healthy life. World Health Organization, Switzerland.

ANEXO I



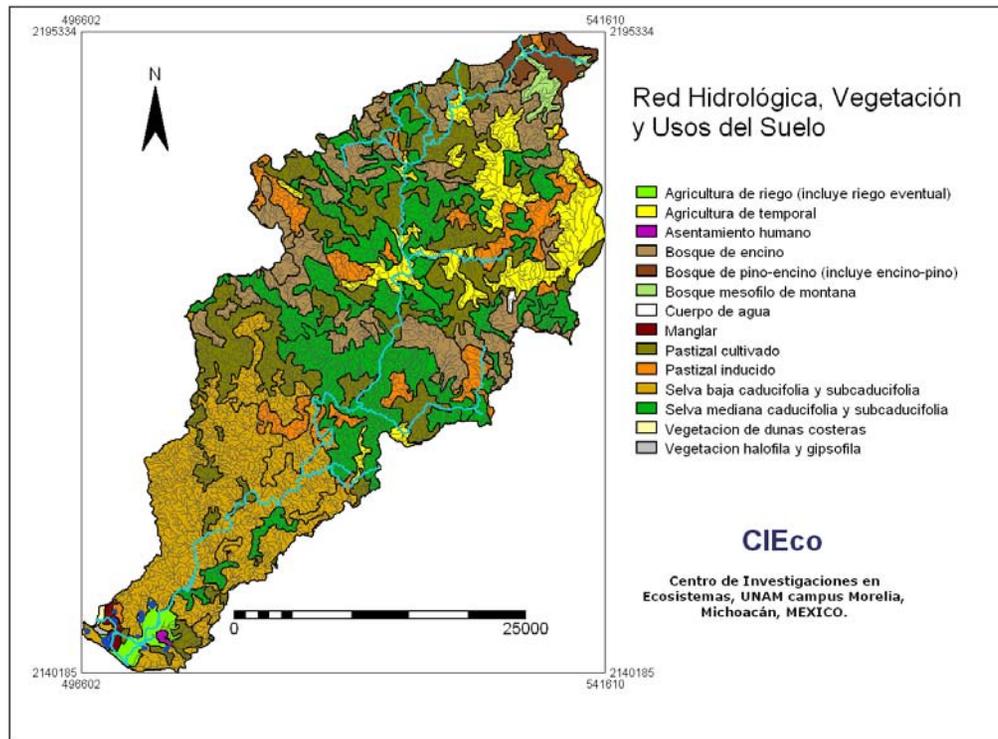
Mapa edafológico. Elaborado a partir de información vectorial del INE (2004) y CETENAL (1975). Recientemente el tipo de suelo Rendzina fue reclasificado como Leptosol.

ANEXO II



Mapa geológico. Elaborado a partir de información vectorial del INE (2004) y CETENAL (1975).

ANEXO III

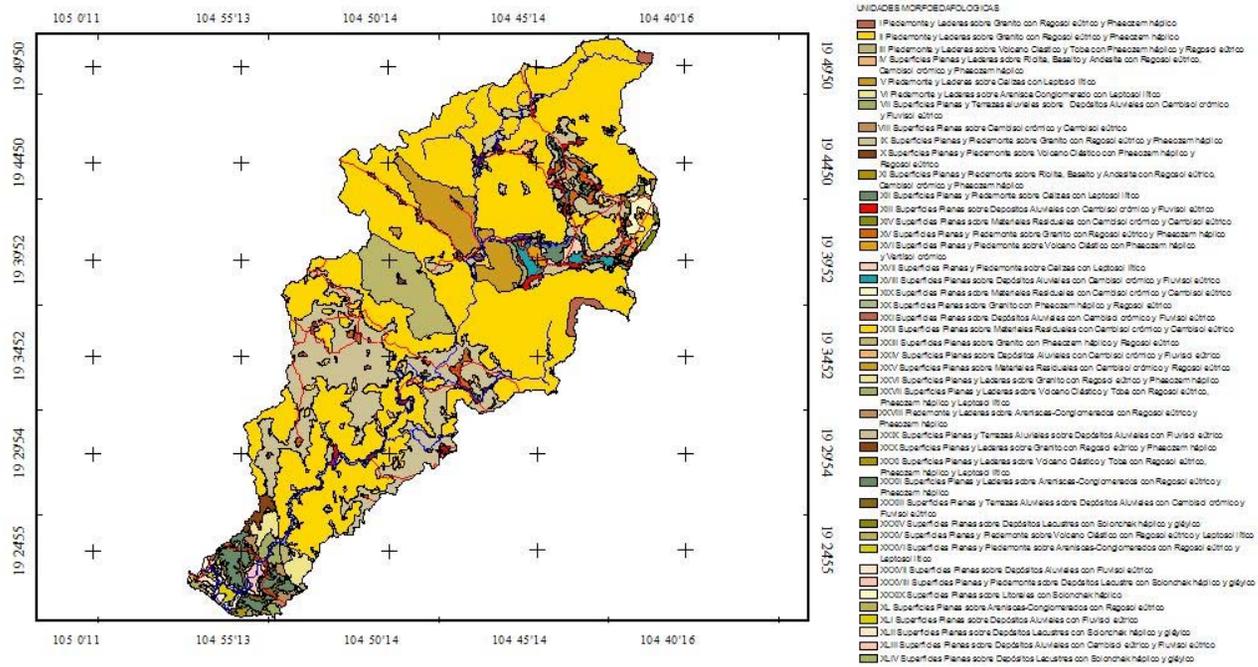


Mapa de vegetación y usos del suelo. Elaborado a partir de información vectorial del INE, 2004 e INE et al., 2000.

ANEXO IV



. MAPA MORFOEDAFOLOGICO DE LA CUENCA DE CUIXMALA



Mapa Morfo-edafológico (Martínez, 2007).

ANEXO V.

Leyenda del Mapa Morfo-Edafológico (Martínez, 2007).

Cuadro 2. Leyenda del Mapa Morfo-Edafológico				
Sistema Morfoclimático	Sistema Morfogénico	Unidades Morfo-edafológicas	Pendientes Principales	Vegetación Natural y Uso del Suelo
A. Montañas con Clima Semicálido Subhúmedo	I. Montañas formadas por granitos.	Piedemonte y Laderas con Regosol eútrico y Phaeozem háplico.	6°-15° 15°-35°	Bosque de Encino y Pino.
B. Montañas, Lomeríos, Colinas y Llanuras con Clima Cálido Húmedo a Subhúmedo	II. Montañas formadas por granitos.	Piedemonte y Laderas con Regosol eútrico y Phaeozem háplico.	6°-15° 15°-35°	Bosque de Encino. Pastizal Inducido. Selva Baja Caducifolia. Selva Mediana Sub-Caducifolia.
	III. Montañas formadas por rocas volcano clástico y toba.	Piedemonte y Laderas con Phaeozem háplico y Regosol eútrico.	6°-15° 15°-35°	Bosque de Encino. Selva Mediana Sub-Caducifolia.
	IV. Montañas formadas por riolita, basalto y andesita.	Superficies Planas y Laderas con Regosol eútrico, Cambisol crómico y Phaeozem háplico.	< 1° 15°-35°	Pastizal Inducido. Selva Baja Caducifolia.
	V. Montañas formadas por calizas.	Piedemonte y Laderas con Leptosol lítico.	6°-15° 15°-35°	Pastizal Inducido. Selva Mediana Sub-Caducifolia.
	VI. Montañas formadas por arenisca-conglomerado.	Piedemonte y Laderas con Regosol eútrico y Phaeozem háplico.	6-15° 15°-35°	Selva Baja Caducifolia.
	VII. Montañas formadas por depósitos aluviales.	Superficies Planas y Terrazas Aluviales con Cambisol crómico y Fluvisol eútrico.	< 1° 3°-6°	Pastizal Inducido. Selva Baja Caducifolia. Selva Mediana Sub-Caducifolia.
	VIII. Montañas formadas por materiales residuales.	Superficies Planas con Cambisol crómico y Cambisol eútrico.	1°-3°	Agricultura de Riego y Temporal. Pastizal Inducido.

	IX. Lomeríos formados por granitos.	Superficies Planas y Piedemonte con Regosol eútrico y Phaeozem háplico.	< 1° 6°-15°	Agricultura de Riego y Temporal. Pastizal Inducido. Selva Baja Caducifolia. Selva Mediana Sub-Caducifolia.
	X. Lomeríos formados por rocas volcano clástico.	Superficies Planas y Piedemonte con Phaeozem háplico y Regosol eútrico.	< 1° 6°-15°	Bosque de Encino. Selva Mediana Sub-Caducifolia.
	XI. Lomeríos formados por riolita, basalto y andesita.	Superficies Planas y Piedemonte con Regosol eútrico, Cambisol crómico y Phaeozem háplico.	< 1° 6°-15°	Selva Baja Caducifolia. Selva Mediana Sub-Caducifolia.
	XII. Lomeríos formados por calizas.	Superficies Planas y Piedemonte con Leptosol lítico.	< 1° 6°-15°	Pastizal Inducido. Selva Mediana Sub-Caducifolia.
	XIII. Lomeríos formados por depósitos aluviales.	Superficies Planas con Cambisol crómico y Fluvisol eútrico.	1°-3°	Agricultura de Riego y Temporal. Pastizal Inducido. Selva Mediana Sub-Caducifolia.
	XIV. Lomeríos formados por materiales residuales.	Superficies Planas con Cambisol crómico y Cambisol eútrico.	1°-3°	Agricultura de Riego y Temporal. Pastizal Cultivado e Inducido. Selva Mediana Sub-Caducifolia.
	XV. Colinas formadas por granitos.	Superficies Planas y Piedemonte con Regosol eútrico y Phaeozem háplico.	< 1° 3°-6°	Agricultura de Riego y Temporal. Pastizal Inducido. Selva Mediana Sub-Caducifolia.
	XVI. Colinas formadas por volcano clástico.	Superficies Planas y Piedemonte con Phaeozem háplico y Vertisol crómico.	< 1° 6°-15°	Pastizal Inducido. Selva Mediana Sub-Caducifolia.
	XVII. Colinas formadas por calizas.	Superficies Planas y Piedemonte con Leptosol lítico.	< 1° 3°-6°	Pastizal Inducido. Selva Mediana Sub-Caducifolia.

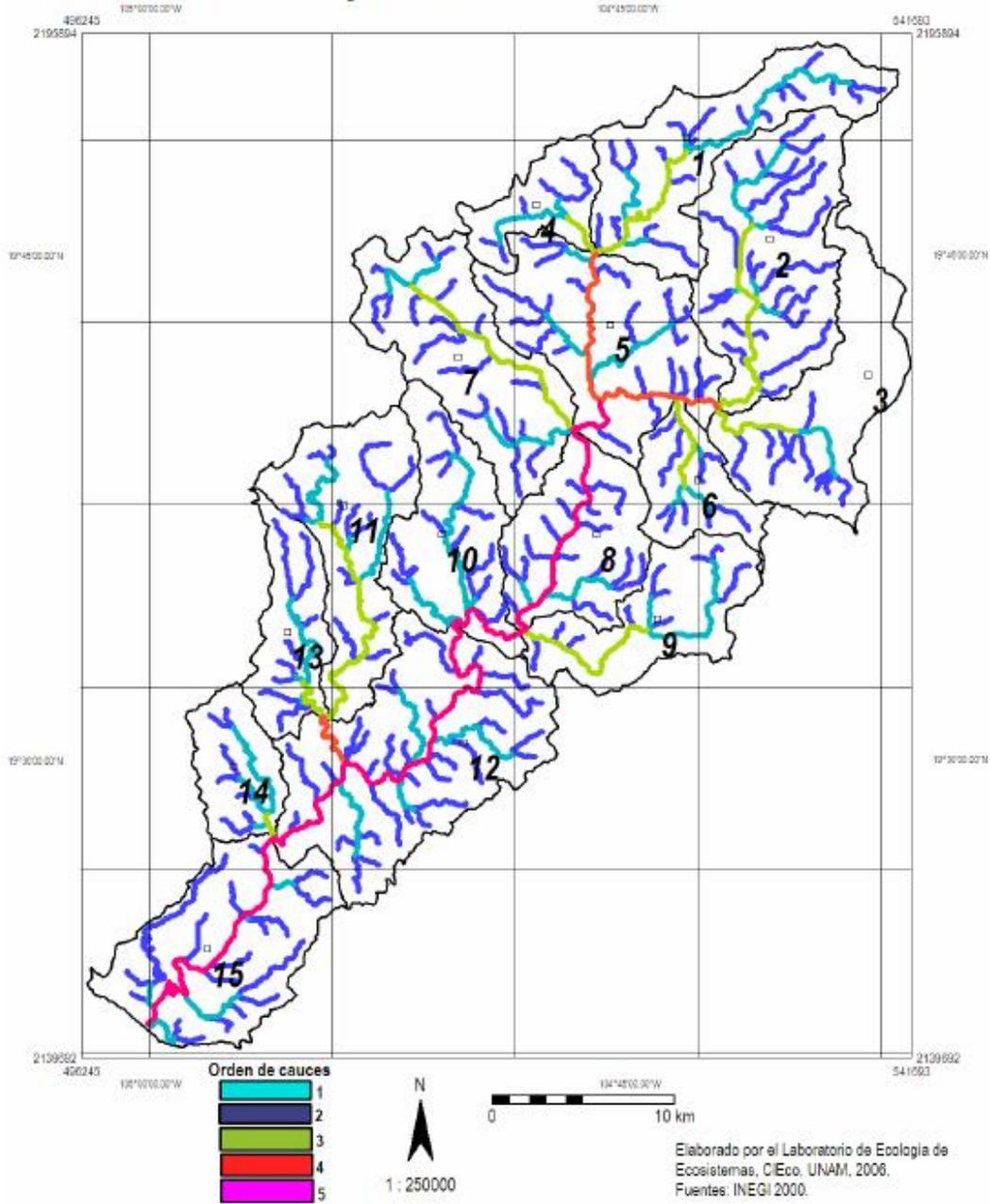
	XVIII. Colinas formadas por depósitos aluviales.	Superficies Planas con Cambisol crómico y Fluvisol eútrico.	1°-3°	Agricultura de Riego y Temporal. Pastizal Cultivado e Inducido. Selva Mediana Sub-Caducifolia.
	XIX. Colinas formadas por materiales residuales.	Superficies Planas con Cambisol crómico y Cambisol eútrico.	1°-3°	Agricultura de Riego y Temporal. Pastizal Cultivado e Inducido. Selva Mediana Sub-Caducifolia.
	XX. Llanuras formadas por granito.	Superficies Planas con Phaeozem háplico y Regosol eútrico.	1°-3°	Pastizal Inducido. Selva Mediana Sub-Caducifolia.
	XXI. Llanuras formadas por depósitos aluviales	Superficies Planas con Cambisol crómico y Fluvisol eútrico.	< 1°	Agricultura de Riego y Temporal. Pastizal Inducido. Selva Mediana Sub-Caducifolia.
	XXII. Llanuras formadas por materiales residuales.	Superficies Planas con Cambisol crómico y Cambisol eútrico.	1°-3°	Agricultura de Riego y Temporal. Pastizal Cultivado e Inducido. Selva Mediana Sub-Caducifolia.
	XXIII. Planicies formadas por granito.	Superficies Planas con Phaeozem háplico y Regosol eútrico.	< 1°	Agricultura de Riego y Temporal Pastizal Inducido. Selva Mediana Sub-Caducifolia.
	XXIV. Planicies formadas por depósitos aluviales.	Superficies Planas con Cambisol crómico y Fluvisol eútrico.	< 1°	Agricultura de Riego y Temporal. Pastizal Inducido. Selva Mediana Sub-Caducifolia.
	XXV. Planicies formadas por materiales residuales.	Superficies Planas con Cambisol crómico y Regosol eútrico.	< 1°	Pastizal Inducido. Selva Mediana Sub-Caducifolia.

C. Montañas, Lomeríos, Colinas y Llanuras con Clima Semiárido Calido	XXVI. Montañas formadas por granito.	Superficies Planas y Laderas con Regosol eútrico y Phaeozem háplico.	< 1° 15°-35°	Selva Baja Caducifolia.
	XXVII. Montañas formadas por volcano clástico y toba.	Superficies Planas y Laderas con Regosol eútrico, Phaeozem háplico y Leptosol lítico.	< 1° 15°-35°	Selva Baja Caducifolia.
	XXVIII. Montañas formadas por areniscas-conglomerados.	Piedemonte y Laderas con Regosol eútrico y Phaeozem háplico.	6-15° 15°-35°	Selva Baja Caducifolia.
	XXIX. Montañas formadas por depósitos aluviales.	Superficies Planas y Terrazas Aluviales con Fluvisol eútrico.	< 1° 3°-6°	Agricultura de Temporal. Pastizal Inducido. Selva Baja Caducifolia.
	XXX. Lomeríos formados por granito.	Superficies Planas y Laderas con Regosol eútrico y Phaeozem háplico.	< 1° 15°-35°	Selva Baja Caducifolia.
	XXXI. Lomeríos formados por rocas volcano clástico y toba.	Superficies Planas y Laderas con Regosol eútrico, Phaeozem háplico y Leptosol lítico.	< 1° 15°-35°	Selva Baja Caducifolia.
	XXXII. Lomeríos formados por areniscas-conglomerados.	Superficies Planas y Laderas con Regosol eútrico y Phaeozem háplico.	< 1° 15°-35°	Pastizal Inducido. Selva Baja Caducifolia.
	XXXIII. Lomeríos formados por depósitos aluviales.	Superficies Planas y Terrazas Aluviales con Cambisol crómico y Fluvisol eútrico.	< 1° 3°-6°	Agricultura de Temporal. Pastizal Inducido. Selva Baja Caducifolia.
	XXXIV. Lomeríos formados por depósitos lacustres.	Superficies Planas con Solonchak háplico y gléyico.	<1°	Tular.
	XXXV. Colinas formadas por rocas volcano clástico.	Superficies Planas y Piedemonte con Regosol eútrico y Leptosol lítico.	<1° 3°-6°	Selva Baja Caducifolia.
	XXXVI. Colinas formadas por areniscas-conglomerados.	Superficies Planas y Piedemonte con Regosol eútrico y Leptosol lítico.	<1° 6°-15°	Pastizal Inducido. Selva Baja Caducifolia.
	XXXVII. Colinas formadas por depósitos aluviales.	Superficies Planas con Fluvisol eútrico, Solonchak háplico y Solonchak gléyico.	1°-3°	Agricultura de Temporal. Pastizal Inducido. Selva Baja Caducifolia.
	XXXVIII. Colinas formadas por depósito lacustre.	Superficies Planas y Piedemonte con Solonchak háplico y gléyico.	< 1° 3°-6°	Tular.
	XXXIX. Colinas conformadas por litorales.	Superficies Planas con Solonchak háplico.	1°-3°	Vegetación de Dunas Costeras.
XL. Llanuras formadas por areniscas-conglomerados.	Superficies Planas con Regosol eútrico.	< 1°	Selva Baja Caducifolia.	

	XXI. Llanuras formadas por depósitos aluviales.	Superficies Planas con Fluvisol eútrico, Solonchak háplico y Solonchak gléyico.	< 1°	Agricultura de Temporal. Selva Baja Caducifolia.
	XXII. Llanuras formadas por depósitos lacustres.	Superficies Planas con Solonchak háplico y gléyico.	< 1°	Tular Vegetación Halofila.
	XXIII. Planicies formadas por depósitos aluviales.	Superficies Planas con Cambisol eútrico y Fluvisol eútrico.	< 1°	Agricultura de Temporal. Selva Baja Caducifolia.
	XXIV. Planicies formadas por depósito lacustre.	Superficies Planas con Solonchak háplico y gléyico.	< 1°	Tular Vegetación Halofila.

ANEXO VI

Orden de Cauces y Subcuencas del río Cuitzmala



Mapa de unidades de respuesta hidrológica en la cuenca del río Cuitzmala (Piña, 2006).

Anexo VIIa

Guía de entrevista para la consulta a expertos para definir los servicios ecosistémicos de corte hidrológico de la cuenca del río Cuitzmala.

Introducción

La presente tiene por objeto, conocer su opinión acerca de una serie de variables que se han propuesto para definir de manera cualitativa cada uno de los servicios ecosistémicos de corte hidrológico que fueron identificados en la cuenca del río Cuitzmala por Maass *et al.* 2005; utilizando la tipología propuesta por el Millennium Ecosystem Assessment (2003):

- I. Los **servicios de provisión** son bienes tangibles, recursos finitos, aunque renovables, de apropiación directa que se pueden medir, cuantificar y fiscaliza, tales como: los alimentos, los combustibles, las fibras, el agua pura y los recursos genéticos.
- II. Los **servicios de regulación** son propiedades emergentes del ecosistema que benefician al entorno en el que se desarrolla la población, tales como: amortiguamiento y control de los procesos de los ecosistemas, entre los que se incluye el mantenimiento de la calidad del aire, la regulación del clima, el control de la erosión, la regulación de las enfermedades humanas y la purificación del agua.
- III. Los **servicios culturales** son los bienes intangibles cuya importancia surge de la percepción individual o colectiva de su existencia. Son fuentes de inspiración para el espíritu humano y fuertemente dependientes del contexto cultural, tales como: una cascada, un árbol milenario, un puma, etc.
- IV. Los **servicios de soporte** son procesos ecológicos básicos que mantiene al ecosistema. No necesariamente tienen un beneficio directo para la sociedad, sino que son procesos necesarios para la producción de todos los otros servicios de los ecosistemas. Tal es el caso del mantenimiento de la dinámica hidrológica (precipitación, infiltración, percolación e infiltración profunda), la retención en los acuíferos, el transporte de nutrientes y materiales, y el acarreo de suelo y nutrientes a las zonas aluviales.

Dado que definir los servicios ecosistémicos, así como las variables que los pueden explicar es un problema complejo, solicitamos de su colaboración y experiencia para la verificación o corrección de las variables propuestas. El objetivo de este ejercicio es que la información de las variables propuestas será ponderada y combinada con la proporcionada por las unidades de evaluación que han sido definidas para obtener una distribución y capacidad de provisión de los servicios ecosistémicos presentes en la cuenca. El fin último de este ejercicio será plantear directrices generales para la conservación, manejo y restauración de los servicios ecosistémicos de la cuenca.

Instructivo para responder

A continuación se presenta una serie de tablas, cada una dedicada a un servicio de corte hidrológico en particular. Cada tabla enlista **el tipo de servicio**, en la siguiente columna se presentan **las variables que han sido propuestas para definir a ese servicio** en específico.

Las siguientes cuatro columnas corresponden a los siguientes planteamientos:

- 1) Si considera que alguna de las variables debe ser suprimida por **favor tache las variables que desee suprimir.**

- 2) Defina el **orden de importancia** que tiene cada variable. 1 corresponde a la más importante y 4 a la menos.
- 3) **Estime el %** del servicio que es explicado por cada una de las variables. El 100% debe repartirse entre las variables consideradas.
- 4) Si tiene sugerencias acerca de cómo expresar la variable, indíquelas, escribiendo en el recuadro.

Al final del cuadro se presenta la frase “Variable adicional sugerida y fuente de datos:_____” . En caso de que considere que alguna otra variable sea relevante para definir el servicio ecosistémico por favor anótela en la línea, así como la fuente de información de la que se puede obtener. Antes de responder a esta pregunta le sugerimos revisar los siguientes “Criterios propuestos para la identificación de variables” que definen cada servicio ecosistémico, que la variable:

- explique en parte la existencia del servicio ecosistémico en la cuenca.
- sea relevante a la escala 1:250,000
- sea espacialmente representada o que a partir de puntos puedan localizarse o en su caso extrapolarse a un área.
- cada variable puede aportar distintos tipos de información: índice, superficies, segmentos y puntos, rangos de valores, clases, porcentaje, importancia relativa, etc.
- pueda ser obtenida a partir de información preexistente como por ejemplo mapas, bibliografía, juicio experto y bases de datos.
-

Lista de opciones para la expresión de variables:

- índice,
- superficies,
- segmentos
- puntos,
- rangos de valores,
- clases,
- porcentaje,
- importancia relativa, etc.

Referencias:

Maass, J., P. Balvanera, A. Castillo, G. C. Daily, H. A. Mooney, P. Ehrlich, M. Quesada, A. Miranda, V. J. Jaramillo, F. García-Oliva, A. Martínez-Yrizar, H. Cotler, J. López-Blanco, A. Pérez-Jiménez, A. Búrquez, C. Tinoco, G. Ceballos, L. Barraza, R. Ayala, and J. Sarukhán. 2005. Ecosystem services of tropical dry forests: insights from long-term ecological and social research on the Pacific Coast of Mexico. *Ecology and Society* 10(1): 17. [online] URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol10/iss1/art17/>

Cuadro 4: Matriz para registrar las respuestas de la consulta a expertos para definir los servicios ecosistémicos de corte hidrológico de la cuenca del río Cuitzmala.

Tipo de servicio ecosistémico	<p style="text-align: center;">S. de soporte</p> <p style="text-align: center;">Variables que definen al servicio</p>	a) Tache las variables que desee suprimir .	b) Defina el orden de importancia que tiene cada variable. 1 corresponde a la más importante y 4 a la menos.	c) Estime el % del servicio que es explicado por cada una las variables. El 100% debe repartirse entre las variables consideradas.	d) Indique la forma en que expresaría la variable, (ver lista de opciones).	e) Indique los procesos que están involucrados en la relación de esta variable con la existencia del servicio.
Infiltración	<ul style="list-style-type: none"> • Permeabilidad suelos 					
	<ul style="list-style-type: none"> • Angulo de la pendiente 					
	<ul style="list-style-type: none"> • Diferencia entre precipitación y evapotranspiración 					
	<ul style="list-style-type: none"> • Cobertura 					

Variable(s) adicional(es) sugerida(s) y fuente de datos: _____

Anexo VIIb

Especialistas que fueron consultados para la realización de este trabajo:

Servicio ecosistémico de infiltración:

Dr. Manuel Maass

Dra. Patricia Balvanera

Dra. Angelina Martínez-Yrizar

M en G. Jesús Fuentes

Regulación de la erosión hídrica:

Dr. Manuel Maass Moreno

Dra. Helena Cotler

Dr. Gerardo Bocco

Dra. Patricia Balvanera

Dra. Angelina Martínez-Yrizar

M en G. Jesús Fuentes

Dr. Felipe García Oliva

Suministro de agua dulce

Dr. Manuel Maass

Dra. Alicia Castillo

Dra. Ana Burgos

Dra. Patricia Ávila

Dra. Patricia Balvanera

Anexo VIII

Valores y clases de los tipos de suelo en cuanto a permeabilidad, profundidad y erodabilidad.

Tipo de suelo	Clase textural	Clase de permeabilidad*	Profundidad**	Erodabilidad***	Clase de erodabilidad
Cambisol	Media- gruesa	Medio-alto	4.2	0.4	Medio
Feozem	Media	Medio	3.9	0.4	Medio
Fluvisol	Media- gruesa	Medio -alto	4.6	0.3	Bajo
Gleysol	Fina	Bajo	2.4	0.5	Alto
Luvisol	Fina	Bajo	3.3	0.3	Bajo
Regosol	Gruesa	Alto	3.0	0.3	Bajo
Leptosol	Fina	Bajo	2.0	0.6	Muy alto
Solonchak	Media- gruesa	Medio -alto	4.0	0.6	Muy alto
Vertisol	Fina	Bajo	4.0	0.4	Medio

*Permeabilidad relativa para los tipos de suelo de la cuenca del río Cuitzmala. Información a partir de Meléndez (1999) y de la información sobre clases de textura para cada tipo de suelo en la zona (INEGI, 2006). Las clases de textura corresponden gruesa (menos del 18 % de arcilla , mas del 65% de arena), media (menos del 35 de arcilla y menos del 65 de arena) y fina (más del 35 % de arcilla).

**Profundidad: Promedio de los datos por tipo de suelo a partir de datos INEGI (2006).

*** Erodabilidad: Promedio de la calculada mediante el nomograma a partir de datos INEGI (2006).

Anexo IX

Cuadro 6: Datos de balance de balance hídrico anual por subcuenca calculado por Piña (2006) para la cuenca del río Cuitzmala. La columna "agua disponible" resulta de la diferencia entre las dos primeras columnas y se refiere al agua disponible para escorrentía (l/m^2).

Subcuencas	Precipitación Anual	Evapotranspiración actual	Diferencia (Precipitación –Evapotranspiración).
1	1665	794	871
2	1504	909	595
3	1631	991	640
4	1667	792	875
5	1239	816	422
6	1358	882	476
7	1461	810	651
8	1342	876	467
9	1379	909	469
10	1284	825	458
11	1109	801	308
12	859	775	84
13	768	763	5
14	762	762	0
15	754	754	0

Anexo X

Estimación relativa de la eficiencia de cobertura por tipo de vegetación para la cuenca del río Cuitzmala. Datos obtenidos a partir del juicio experto.

Tipo de vegetación y subcomunidad vegetal.	Valor de eficiencia de la cobertura	Clase respecto a la eficiencia de la cobertura	Deterioro cobertura	Clase para el deterioro cobertura
Agricultura de riego	4	Bajo	10	Muy alta
Agricultura de temporal	2	Extremadamente bajo	10	Muy alta
Asentamiento humano	3	Muy bajo	0	No aplica
Bosque de encino con veg. primaria y veg. secundaria arbórea.	9	Muy alto	1	Sin necesidad
Bosque de encino con veg. secundaria arbustiva y herbácea.	7	Medio alto	4	Moderada
Bosque de pino-encino (incluye encino-pino) con veg. primaria y veg. secundaria arbórea.	8	Alto	1	Sin necesidad
Bosque de pino-encino (incluye encino-pino) con veg. secundaria arbustiva y herbácea.	6	Medio	4	Moderada
Bosque mesófilo de montaña con veg. primaria y veg. secundaria arbórea.	10	Extremadamente alto	1	Sin necesidad
Manglar	9	Muy alto	1	Sin necesidad
Pastizal cultivado	4	Bajo	8	Alta
Pastizal inducido	4	Bajo	8	Alta
Selva baja caducifolia y subcaducifolia con veg. primaria y veg. secundaria arbórea.	7	Medio alto	1	Sin necesidad
Selva baja caducifolia y subcaducifolia con veg. secundaria arbustiva y herbácea.	5	Medio bajo	4	Moderada
Selva mediana caducifolia y subcaducifolia con veg. secundaria arbustiva y herbácea.	7	Medio alto	4	Moderada
Selva mediana caducifolia y subcaducifolia con veg. primaria y vegetación secundaria arbórea.	9	Muy alto	1	Sin necesidad
Vegetación de dunas costeras.	5	Medio bajo	1	Sin necesidad
Vegetación halófila y gipsófila.	7	Medio alto	1	Sin necesidad

Anexo XI

Cuadro 8. Clases de pendiente existentes para la cuenca del río Cuitzmala. Fuente INE, 2003.

Tipo de pendiente	Clase infiltración	Valor infiltración	Clases riesgo de erosión	Valor riesgo de erosión
Pendiente plana (< 1°)	Extremadamente alto	7	Extremadamente bajo	1
Pendiente muy suavemente inclinada (1° - 3°)	Muy alto	6	Muy bajo	2
Pendiente suavemente inclinada (3° - 5°)	Alto	5	Bajo	3
Pendiente ligeramente inclinada (5° - 10°)	Medio	4	Medio	4
Pendiente ligera a medianamente inclinada (10° - 15°)	Bajo	3	Alto	5
Pendiente medianamente inclinada (15° - 20°)	Muy bajo	2	Muy alto	6
Pendiente fuertemente inclinada (20° - 30°)	Extremadamente bajo	1	Extremadamente alto	7

Anexo XII

Cuadro 9. Permeabilidad relativa para los tipos de roca de la cuenca del río Cuitzmala. Datos obtenidos a partir de Cortés (2001) y carta hidrología de aguas subterráneas (Secretaría de programación y presupuesto, 1981).

Tipo de roca		Valor de permeabilidad
At	Ignea Extrusiva, Andesita	Alto
Bt	Ignea Extrusiva Basalto	Alto
K(Gr)	Ignea Intrusiva Granito	Bajo
Ki(cz)	Sedimentaria Caliza	Medio
Ki(zc)	Sedimentaria Caliza	Medio alto
Ks(Vc)	Ignea Volcano Extrusiva Clastico	Bajo
Q(al)	Suelo Aluvial	Alto
Q(la)	Suelo Lacustre	Alto
Q(li)	Suelo Litoral	Alto
Re	Suelo Residual	Alto
Rt	Ignea Extrusiva Riolita	Bajo
Tb	Ignea Toba	Bajo
Ts(ar-cg)	Arenisca- Sedimentaria Conglomerado	Bajo

Anexo XIII



Ejemplo de matriz de evaluación multicriterio

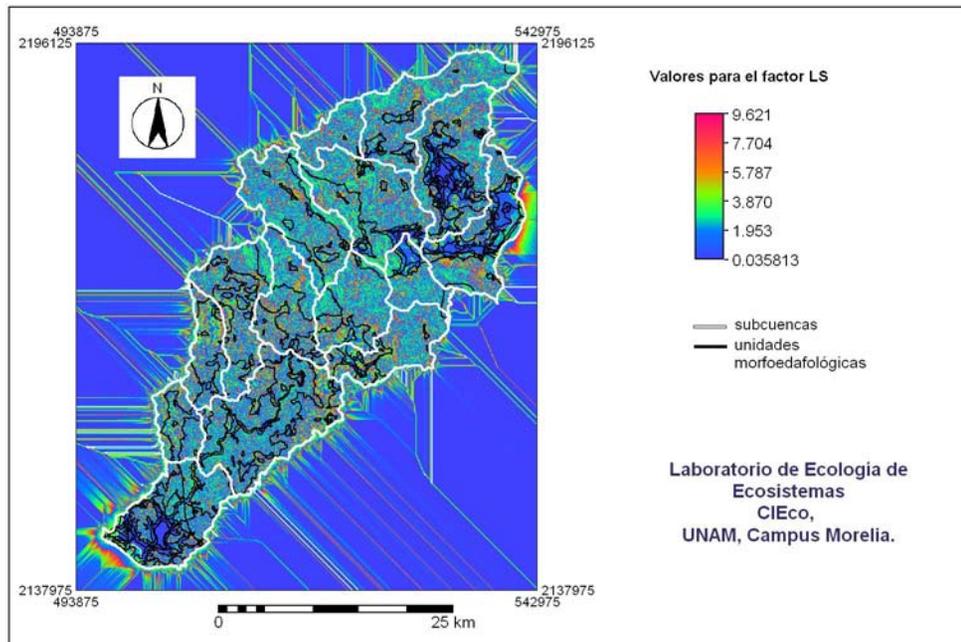
Anexo XIV

Valores de erosividad calculados para cada subcuenca mediante el Índice Modificado de Fournier

Subcuenca	Índice Modificado de Fournier	Clase
1	308.5	Muy alto
2	287.21	Muy alto
3	313.7	Muy alto
4	307.97	Muy alto
5	227.39	Alto
6	254.31	Muy alto
7	267.48	Muy alto
8	251.22	Alto
9	259.89	Muy alto
10	235.67	Alto
11	199.94	Alto
12	153.35	medio
13	137.09	medio
14	135.92	medio
15	133.73	medio

ESCALA	Clases
0-63	muy bajo
64-126	Bajo
127-189	medio
190-252	Alto
252-315	Muy alto

Anexo XV



Mapa acerca del factor de la pendiente (LS).