

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**



**CIGA**  
CENTRO DE INVESTIGACIONES  
EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL

**CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL**

**POSGRADO EN GEOGRAFÍA**

**MANEJO INTEGRADO DEL PAISAJE**

***“Evaluación del potencial natural para la prestación de  
Servicios Ambientales Hídricos en Cerro Grande, Reserva de  
la Biósfera Sierra de Manantlán, Jalisco-Colima”.***

**Autora: Biól. Wendy Liliana Machuca Barbosa**

**Tesis para obtener el Título de Maestra en Geografía**

**Director: Dr. Ángel G. Priego Santander**

**MORELIA, MICHOACÁN**

**AGOSTO DE 2011**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

## AGRADECIMIENTOS

A nuestra Máxima Casa de Estudios por el apoyo otorgado al haberme aceptado en este programa de posgrado y mostrarme otra visión tan apasionante de la ciencia. En especial al Dr. Narciso Barrera Bassols, quien me acercó al CIGA y a la Sierra de Manantlán y me contagió su interés por el conocimiento y entendimiento de la Geografía, para resolver de una manera más integral y apropiada los problemas que atañen a nuestra sociedad actual.

A mi director de tesis el Dr. Ángel Priego Santander, por realizar un excelente trabajo como tutor, al demostrar un vasto conocimiento, particularmente en Geografía Física, tanto en la teoría como en la práctica, además de brindarme siempre su apoyo incondicional y amistad.

A mis sinodales: Dr. Gerardo Bocco Verdinelli, Dr. Manuel Mendoza Cantú, Dra. Patricia Balvanera Levy y M. en C. Enrique Jardel Peláez, por sus valiosos comentarios y sugerencias en torno a la revisión del manuscrito, lo que me permitió enriquecer de manera más general mi perspectiva sobre el tema en cuestión.

A Sergio Graf Montero y Enrique Jardel, por permitirnos realizar investigación dentro de la Reserva de Manantlán y sugerirnos encauzar el proyecto al área de Cerro Grande, proporcionándonos la información disponible de la zona. Asimismo, a Óscar Balcázar, Santiago Machado, Angélica Jiménez, Gerardo Vélica, Rubén Pérez Peña, Jesús Gutiérrez Cacique y Óscar Jurado, por ayudarme en la obtención de información sobre el área de estudio y las reglas de operación del programa ProÁrbol de la CONAFOR. Agradezco también a: Eduardo Isunza, Alberto Ortiz, Rigel Zaragoza, Alejandra Larrazábal, Antonio Navarrete, Rita Adame y Adriana Núñez, por todo el apoyo técnico proporcionado para la elaboración de los insumos generados en esta tesis; así como al personal bibliotecario del campus Morelia: Atzimba López y Hulda Sollano, por facilitarme el material solicitado en relación con mi tema de investigación.

A todos los ejidatarios de las comunidades de Cerro Grande que me permitieron trabajar en sus propiedades y conocer su riqueza natural y cultural. En especial agradezco el excelente trato que recibimos de Doña Verónica y Don José, así como de Don Lino, durante nuestra estancia en el ejido El Terrero, además de la interesante visita guiada que nos dieron en la meseta de Cerro Grande y el apoyo que, junto con mis compañeros Óscar Balcázar y Lenin Ríos, ofrecieron durante el trabajo de campo. Además agradezco al Sr. Julio Martínez de la Rosa y a Álvaro Martínez por darme información clave sobre los ejidos y ejidatarios.

A todos mis compañeros del posgrado y del campus Morelia, en especial a: Ana Mena, Violeta Rangel, Lenin Ríos, Beto Ortiz, Rigel Zaragoza, Rita Adame, Andrés Basante, Omar Hernández, Mabel Sánchez y Jocelyn Durán, quienes me manifestaron su amistad a lo largo de mi estancia y haber hecho de este proceso de aprendizaje una experiencia muy agradable. Agradezco también a mis amigos Miguel Ángel Reyes, Itzel Enciso, Yesica Silva, Marcela Villar, Nancy Hernández y Hugo Valdés, por todo su apoyo moral en los momentos más difíciles.

A todos los integrantes de mi familia, especialmente a mis padres Jesús Machuca Enciso y Josefina Barbosa Gloria y a mis hermanos Héctor, Adriana y Jesús, por ser para mí ejemplos de virtud, constancia, responsabilidad, solidaridad y entusiasmo; así como a mis sobrinos Isabel, Eduardo, Mónica y Alexmi, por sus auténticas muestras de cariño.

Al CONACYT por admitir el presente proyecto de investigación y otorgar el apoyo económico durante el periodo de duración del posgrado, así como al programa FOGRAD (Fomento a la Graduación) de la UNAM, por la extensión del apoyo económico.

## DEDICATORIA

*A mis ángeles celestiales:*

*Mi querido hermano Héctor Machuca, así como a mi estimado amigo Israel Quiroz, les dedico este modesto trabajo de tesis como una ofrenda a su memoria, en gratitud hacia sus enseñanzas de vida, tales como su gran fortaleza, energía y confianza en sí mismos, su gran creatividad y su irrefrenable espíritu emprendedor.*

*A mis ángeles terrenales:*

*Mis padres Jesús y Josefina, por todo su esfuerzo, dedicación y cariño manifestado a lo largo de los años, siempre en pro de la unidad familiar, así como por poseer día a día un gran ímpetu y tesón para salir adelante, a pesar de las adversidades. Asimismo, a mis hermanos Adriana y Jesús, por creer en mí y darme siempre su cariño y su confianza. A cada uno de ellos todo mi amor y admiración.*

*Mis sobrinos, Alexmi, Moni, Kas y Lalo, por ser esenciales en el crecimiento de mi familia y de mi persona, enseñándome a disfrutar y valorar los momentos que hemos compartido juntos. Especialmente a Kas y a Lalo les dedico este logro personal, esperando se convierta en una motivación para que sigan esforzándose por todo lo que realmente quieran hacer o ser y exploten todo su potencial heredado.*

*Mi cómplice de aventuras Miguel Ángel Reyes, por acompañarme a lo largo de mi estancia en Morelia, procurando alimentar tanto a mi mente como a mi cuerpo de forma sustancial.*

*Mi director de tesis Ángel Priego, por ser una persona de criterio amplio y transparente, el cual me ha ofrecido sus conocimientos, su apoyo, su confianza y sincera amistad.*

*“Los antiguos de esta tierra decían que los ríos todos salen de un lugar que se llama Tlalocan, que es como paraíso terrenal, el cual es de un dios que se llama Chalchihuitlicue; y los montes que están fundados sobre él, están llenos de agua, y por fuera son de tierra, como si fuesen vasos grandes de agua, como casas llenas de agua; y cuando fuere menester se romperán los montes, y saldrá el agua que dentro está y anegará la tierra; y de aquí acostumbraron a llamar a los pueblos donde vive la gente Altépetl, que quiere decir monte lleno de agua”.*

### **Cosmovisión Náhuatl**

*(Fray Bernardino de Sahagún, 1975; fragmento)*



## DÉCIMAS AL AGUA



*Quiero que tupa mi fronda  
y nos traiga la humedad  
bendita felicidad  
de la selva y de su sombra*

*La sangre es como los ríos  
que van tejiendo memoria,  
y así se tejó la historia  
de la sangre de los míos.*

*Del cerro hasta los bajíos  
se juntaron las corrientes,  
entre lluvias y torrentes  
entre montañas y llanos,  
se reunieron mis hermanos  
mis padres y mis parientes.*

*De niebla traigo el aliento  
y ojos con agua de mar,  
soy lágrima que al llorar  
se llueven de sentimiento.*

*Del árbol traigo el lamento  
cuando le arrancan la vida,  
soy la selva destruida  
soy el río vuelto desierto,  
y el llanto de un pueblo muerto  
por la ambición desmedida.*

*Soy la montaña y la mar  
y soy la niebla que viaja,  
agua que lloviendo baja  
y vuelve al mismo lugar.*

*Torrente que al reventar  
se desmenuza en rocío,  
soy el viento húmedo y frío  
que viene de la cascada,  
y soy la selva nublada  
que amanece junto al río.*

*Soy agua desde que estuve  
en el vientre de mi madre,  
soy la lluvia de la tarde  
que regresa envuelta en nube*

*Soy el sereno que sube  
temprano por la mañana,  
soy brisa de la sabana  
caricia de amanecer,  
soy la niebla al llover  
y el agua de esta jarana.*

*Ay Chalchihuitlicue agua diosa  
mujer de faldas de jade,  
humedad que el alma invade  
candelaria prodigiosa.*

*Con tu sabia milagrosa  
libranos de todo mal,  
con tu bendito caudal  
fertiliza la simiente,  
dale esperanza a mi gente  
patrona del aguazal.*

## ÍNDICE GENERAL

	<b>Página</b>
RESUMEN.....	1
I. INTRODUCCIÓN.....	2
II. ANTECEDENTES.....	8
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	15
III.1. Área de estudio.....	15
III.1.1. Ubicación geográfica.....	15
III.1.2. Caracterización geográfica.....	17
III.1.2.1. Características biofísicas.....	17
III.1.2.2. Características socioeconómicas.....	28
III.2. Fundamentos Teórico-Metodológicos.....	33
III.3. Diseño de la Investigación.....	35
III.4. Metodología de la Investigación.....	37
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	43
IV.1. Red hidrográfica de Cerro Grande.....	43
IV.2. Subcuencas Hidrográficas.....	46
IV.3. Zonas Funcionales Hidrográficas.....	52
IV.4. Disección Horizontal del Relieve.....	55
IV.5. Densidad del Drenaje por Zonas Funcionales Hidrográficas.....	59
IV.6. Potencial natural para la prestación de Servicios Ambientales Hídricos.....	65
IV.7. Elegibilidad para la Prestación de Servicios Ambientales Hídricos.....	78
V. CONCLUSIONES.....	89
VI. BIBLIOGRAFÍA.....	92
ANEXO 1. GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	107
ANEXO 2. BITÁCORA FOTOGRÁFICA.....	115

## ÍNDICE DE CUADROS

### Página

Cuadro 1. Eventos climáticos a lo largo del año, según pobladores del ejido El Terrero.....	25
Cuadro 2. Comunidades presentes en el área de Cerro Grande.....	29
Cuadro 3. Clasificación de la disección horizontal.....	39
Cuadro 4. Agrupación de la vegetación existente en Cerro Grande por clases, de acuerdo a su origen o estado de conservación.....	40
Cuadro 5. Distribución superficial de las Zonas Funcionales Hidrográficas en Cerro Grande, RBSM, Jalisco-Colima.....	53
Cuadro 6. Distribución en clases de la disección horizontal del relieve en el Cerro Grande de Manantlán, RBSM, Jalisco-Colima.....	56
Cuadro 7. Distribución superficial de la densidad de drenaje por zonas funcionales hidrográficas.....	59
Cuadro 8. Evaluación del potencial natural para la prestación de servicios ambientales hídricos en Cerro Grande, RBSM, Jalisco-Colima.....	65
Cuadro 9. Evaluación del potencial natural para la prestación de servicios ambientales hídricos en Cerro Grande, RBSM, Jalisco-Colima.....	82

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Página</b>
Figura 1. Localización del área de Cerro Grande en la RBSM.....	15
Figura 2. Esquema de la división municipal de la Reserva de Manantlán.....	16
Figura 3. El relieve kárstico de Cerro Grande.....	18
Figura 4. Ubicación de la cuenca del Río Ayuquila-Armería y de Cerro Grande dentro de la RBSM.....	20
Figura 5. Cuencas y subcuencas hidrológicas de la RBSM.....	21
Figura 6. Distribución y porcentaje de la tenencia de la tierra en Cerro Grande.....	31
Figura 7. Red de drenaje, dolinas kársticas y depresiones volcánicas en Cerro Grande, RBSM, Jalisco-Colima.....	44
Figura 8. Delimitación de subcuencas hidrográficas superficiales en Cerro Grande, RBSM, Jalisco-Colima.....	47
Figura 9. Zonificación Funcional Hidrográfica del Cerro Grande de Manantlán, RBSM, Jalisco-Colima.....	54
Figura 10. Disección horizontal del relieve en Cerro Grande, RBSM, Jalisco-Colima.....	57
Figura 11. Disección horizontal del relieve por zonas hidrográficas en Cerro Grande, RBSM, Jalisco-Colima.....	61
Figura 12. Evaluación del Potencial Natural para la prestación de Servicios Ambientales Hídricos en Cerro Grande, RBSM, Jalisco-Colima.....	66
Figura 13. Elegibilidad para la prestación de Servicios Ambientales Hídricos en Cerro Grande, RBSM, Jalisco-Colima.....	81

## RESUMEN

La presente investigación se desarrolló en el complejo kárstico de Cerro Grande (Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán) y su objetivo fundamental es evaluar el potencial natural que posee el territorio para proveer Servicios Ambientales Hídricos (SAH), considerando que el agua es un recurso estratégico en el área, sustento de poblaciones locales y extra-locales, principalmente para la zona urbano-industrial de Colima y Villa de Álvarez.

Siguiendo una metodología con enfoque físico-geográfico, se requirió de información hidrográfica para generar la cartografía de las subcuencas distinguibles a escala 1:50,000 y poder obtener la disección horizontal del relieve, así como la delimitación de las zonas funcionales hidrográficas de las cuencas superficiales, con el fin de evaluar su potencialidad natural para la prestación de Servicios Ambientales Hídricos, según los criterios establecidos por la CONAFOR a partir del uso de suelo. De acuerdo a la tenencia de la tierra existente en Cerro Grande, se evaluaron las zonas que se consideran elegibles para la prestación de SAH (potencial Alto y Muy Alto), y se cotejaron los resultados con los polígonos que actualmente son beneficiados por los programas PSAH que maneja la CONAFOR desde el 2005 al 2009 en Cerro Grande.

Se distinguieron 69 subcuencas hidrográficas al interior de Cerro Grande y para cada una de ellas, sus zonas funcionales hidrográficas (cabecera, captación-transporte, emisión y emisión-confinamiento). La evaluación hecha permitió conocer que más de 97 % del territorio está disponible para prestar servicios ambientales hídricos. El mapa final puede apoyar la toma de decisiones sobre el ordenamiento y conservación del área.

## I. INTRODUCCIÓN

El agua es el recurso natural que sustenta la mayoría de las actividades económicas humanas; sin embargo, actualmente su disponibilidad se encuentra en estado crítico, afectando directamente la capacidad de crecimiento económico y el bienestar humano (Muñoz, 2008). En México, se estima que la población alcanzará los 125 millones de habitantes para el año 2030 y la necesidad de agua será superior en 25% a la actual. La contrastante disponibilidad de agua en el país genera diferentes grados de sobreexplotación y de escasez, agravados por un consumo desmedido y una tecnología inadecuada que conlleva al desperdicio de una gran parte del recurso hídrico; lo que a su vez compromete la estabilidad social y la sustentabilidad ambiental (CONAGUA, 2006), a tal grado, que se pueden crear situaciones de ingobernabilidad (CONAGUA, 2011).

En el noroeste del país la disponibilidad natural de agua es baja debido al reducido escurrimiento total, conjugado con una alta concentración de la población; lo que conduce a una presión alta sobre el recurso, limitando el desarrollo económico de sus comunidades (Carabias y Landa, 2005). En la subregión Pacífico, la mayoría de las cuencas presentan condiciones de disponibilidad, e inclusive abundancia; la excepción es la cuenca del río Ayuquila-Armería, la cual presenta déficit en casi toda su superficie, debido a la elevada extracción de agua para el uso agrícola (CONAGUA, 2006), lo cual afecta a las poblaciones locales más pobres y marginadas (Rodríguez, 2006).

La Cuenca del Río Ayuquila-Armería representa un importante activo económico para los estados de Jalisco y Colima (Rodríguez, 2006), por ser uno de los 15 ríos prioritarios

en la vertiente del Pacífico y uno de los 43 más importantes a escala nacional por su biodiversidad, escurrimiento, población incluida en su cuenca, superficie de riego y presencia dentro de áreas protegidas, como la Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán (Gerritsen *et al.*, 2005; Martínez *et al.*, 2005; Rodríguez, 2006; CONABIO, 2008; Jiménez *et al.*, 2009).

Los recursos hídricos de la cuenca son particularmente estratégicos para el desarrollo regional de la Sierra de Manantlán, ya que el abastecimiento de agua para los asentamientos humanos del área y el sostenimiento de sus actividades productivas, dependen de la función protectora de los bosques del territorio (INE, 2000).

Los servicios ambientales son los beneficios que la sociedad obtiene de los procesos y funcionamiento de los ecosistemas: soporte de las condiciones de vida, regulación de las condiciones ambientales, provisión de recursos naturales y condiciones valoradas culturalmente (MEA, 2005a). En particular los servicios hidrológicos proveen al ser humano de agua en cantidad y calidad para cualquier uso; regulan los flujos hídricos, controlando la erosión y la contaminación; proporcionan servicios culturales como sitios de recreación o de belleza escénica, y de soporte, como el flujo de nutrientes o la dinámica del agua en los ecosistemas (Postel y Carpenter, 1997; Riegelhaupt *et al.*, 2005). Entre los servicios hidrológicos que prestan los bosques, se encuentra la protección del recurso hídrico en zonas montañosas, la regulación de los flujos de agua superficial y la provisión de agua de buena calidad para las comunidades (Williams-Linera *et al.*, 2002).

Por ello, las selvas y los bosques de México se consideran fundamentales en la provisión de servicios ambientales. Su presencia ayuda a minimizar las inundaciones y

sequías, prevenir deslaves, proteger y mantener los suelos y nutrientes, así como la calidad del agua (SEMARNAT y Hombre-Naturaleza, 2003; Rodríguez, 2006).

La Reserva de Manantlán se decretó con el fin de conservar la biodiversidad de ecosistemas forestales de montaña y la agrobiodiversidad asociada a sistemas de cultivos tradicionales, estableciéndose una de las tres zonas núcleo o de protección estricta, en la meseta de Cerro Grande, con el fin de conservar los relictos de bosque mesófilo de montaña que tienen gran importancia a nivel nacional, además de preservar ciertas especies de fauna en peligro de extinción. En dicha zona está estrictamente prohibido el aprovechamiento extractivo de los recursos naturales, lo cual generó conflictos permanentes con los propietarios forestales, al dejarlos sin su principal fuente de recursos económicos (INE, 2000; Jardel *et al.*, 2004; Graf *et al.*, 2008).

El programa de manejo de la Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán (RBSM), establece como una línea de acción para su gestión, el desarrollo de mecanismos compensatorios para el mantenimiento y conservación de los servicios ambientales que esta montaña genera (INE, 2000; Graf *et al.* 2003; Jardel *et al.*, 2004); ya que beneficia directamente a la Zona Conurbada de Colima y Villa de Álvarez (ZCCVA, la cual concentra más del 40% de la población total del Estado de Colima), principalmente en el abastecimiento de agua potable (MABIO, 2010).

Es así que desde el 2003, la CONAFOR incluyó a Cerro Grande dentro del programa de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH), estableciendo un contrato por 5 años con todas las comunidades agrarias de la montaña (Graf y Wynter, 2005), y renovándose en el 2008, con el fin de conservar durante los dos periodos (2003-2007 y 2008-2012), casi 10 mil hectáreas (México Forestal, 2010).

El macizo montañoso de Cerro Grande, no presenta cauces de agua superficiales, excepto por algunos arroyos intermitentes en las laderas bajas (INE, 2000). Dada su naturaleza kárstica, las líneas de parteaguas permiten captar importantes cantidades de agua, las cuales tienen un corto escurrimiento y se infiltran a través de numerosas depresiones (dolinas) hasta llegar a un drenaje subterráneo al pie del macizo, que surge a través de manantiales que alimentan a los ríos de la región (Lazcano, 1988); beneficiando a parte de la población de los estados de Jalisco y Colima (Graf *et al.*, 2008). Entre las resurgencias más importantes de Cerro Grande, se encuentra el manantial El Cóbano en Zacualpan, que arroja en promedio 2,300 litros de agua por segundo, de los cuales 1,000 litros se derivan para regular los procesos hidrológicos que abastecen de agua al 90% de los más de 200,000 habitantes de la ZCCVA (MABIO, 2010; Machado, 2010). No obstante, a pesar de que esta zona provee de agua a la capital del estado, no lo hace para sí misma, porque las dolinas por donde se escurre el agua no permiten que los habitantes locales de Cerro Grande puedan almacenar el vital líquido (México Forestal, 2010).

Es así como se ha iniciado el proceso de establecimiento de un mecanismo compensatorio de largo plazo que se basará en los servicios ambientales que Cerro Grande genera y que beneficia a los habitantes de la ciudad de Colima, principalmente, en lo que se refiere al abastecimiento de agua potable (Machado, 2010; México Forestal, 2010).

### ***Problema de la Investigación***

El impacto ecológico de las actividades económicas y de los asentamientos humanos, tanto en la zona montañosa como en los valles del río Ayuquila-Armería, ejercen una alta presión sobre el abastecimiento del recurso hídrico en el territorio (INE, 2000). A pesar de que la constante explotación forestal en el área de Cerro Grande debe haber transformado la capacidad de los bosques para retener el agua de lluvia, la principal problemática en relación al acceso del recurso hídrico radica en la naturaleza kárstica del substrato geológico de la meseta, donde el agua se infiltra en los resumideros y no hay corrientes superficiales, habiendo escasez de agua, lo cual limita las actividades agrícolas y domésticas de las comunidades al subsistir en un área con una importante riqueza forestal, pero aislada, restringida y sin disponibilidad de agua (Jardel, 1998).

Esta situación, generó que la CONAFOR en el año 2003, comenzara a implementar en el territorio el programa de pago por servicios ambientales (Graf y Wynter, 2005; Pérez-Maqueo *et al.*, 2006; Saldaña, 2010), como forma de mitigar el impacto creado por la imposibilidad de desarrollar actividades agropecuarias y forestales. Sin embargo, el área que actualmente se beneficia de dicho programa es mínima en comparación a la superficie de Cerro Grande e insuficiente en términos de los bosques que parecen cumplir con los requisitos necesarios para ser incluidos en el programa.

Los criterios utilizados por CONAFOR sobre la implementación del programa PSAH, se han enfatizado en la tenencia de la tierra y la presencia de bosques, pero no consideran de manera directa las propiedades geográficas de las cuencas hidrológicas. Esto implica la necesidad de combinar los criterios legales (predios) y los criterios técnicos provenientes de la información sustentada en las características hidrográficas del territorio (subcuencas), con el fin de evaluar más apropiadamente su potencial hídrico.

## **Objetivos**

### Objetivo General:

- ✓ Evaluar el potencial natural para la prestación de Servicios Ambientales Hídricos en Cerro Grande, dentro de la Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán en los estados de Jalisco y Colima.

### Objetivos específicos:

- Definir la zonificación funcional de cada una de las cuencas hidrográficas cartografiadas a escala 1:50 000.
- Conocer el potencial natural para la prestación de Servicios Ambientales Hídricos en el territorio.
- Conocer la elegibilidad para la prestación del Servicio Ambiental Hídrico según la propiedad de la tierra.

La importancia teórica de esta investigación radica en su contribución al conocimiento sobre la zonificación hidrográfica del área de estudio, así como de los potenciales naturales para la prestación de Servicios Ambientales Hídricos, a partir de un enfoque funcional que otorga ventajas al lograr una propuesta metodológica más precisa para evaluar las condiciones hidrográficas de un territorio, con fines de prestación de servicio ambiental hídrico.

Su importancia práctica es relevante al aportar elementos clave que pueden apoyar y mejorar los criterios de elegibilidad y la toma de decisiones sobre la implementación del programa de Pago por Servicios Ambientales Hídricos, en beneficio de la población local y de todos los usuarios actuales de los recursos hídricos de Cerro Grande.

## II. ANTECEDENTES

De manera global, se han realizado diversos análisis de los Servicios Ambientales en cuencas de América Latina (FAO, 2004; Pagiola *et al.*, 2004; Riegelhaupt *et al.*, 2005; Robertson y Wunder, 2005; PASOLAC, 2006; MAVDT, 2008) y la implementación del programa de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (MEA, 2005a; Fregoso, 2006; Wunder, 2007; Wünscher *et al.*, 2006; Santa María, 2010). En el trabajo de Fregoso (2006), se comparan seis estudios de caso a nivel internacional, donde se presenta la oferta y el pago de los servicios ambientales hídricos. A pesar de que todos ellos difieren en las definiciones y clasificaciones del servicio ambiental, en el marco conceptual y en los métodos empleados para la valoración del servicio, Fregoso (2006) considera que en estos estudios la cuenca es la unidad geográfica natural y funcional en donde se desarrollan iniciativas de Servicios Ambientales Hídricos, además que la cobertura forestal es un indicador garante de estos servicios.

A nivel nacional se hallaron diversos trabajos sobre el cambio de uso de suelo y la provisión de recursos hídricos en las cuencas (PLADEYRA, 2000; 2003; Villanueva, 2002; García-Coll *et al.*, 2004; Travieso, 2005; Gopar, 2008; Muñoz, 2008; Saldaña, 2008); el manejo sustentable del agua (Toledo y Solís, 2001; Reygadas y Zarco, 2005); la gestión integral de cuencas y el agua (Cotler, 2004; Carabias y Landa, 2005; RAISES, 2005; CONAGUA, 2006; BM, 2007; Cotler y Caire, 2009; Cotler, 2010); el potencial de México para la producción de servicios ambientales (Torres y Guevara, 2002; Paré *et al.*, 2008; Balvanera y Cotler, 2009; Sarukhán *et al.*, 2009); el programa

de PSAH (SEMARNAT y Hombre-naturaleza, 2003; DOF, 2004; 2009; INE, 2010; Saldaña, 2010; CONAFOR, 2011) y su evaluación (Pérez-Maqueo *et al.*, 2006; Graf e Iglesias, 2010).

Entre los trabajos más destacados de acuerdo a su relación con el tema de investigación, el de PLADEYRA (2000; 2003), planteó un ordenamiento y manejo de las cuencas hidrológicas de la cuenca del río Filobobos en Veracruz a escala 1:100 000 y en la cuenca Lerma-Chapala a escala 1:250 000, con el fin de conocer los paisajes hidrológicos que las conforman y obtener su balance hídrico; a partir de la metodología físico-geográfica que consiste en la división de la cuenca, tomando como base las características naturales que determinan los procesos hidrológicos. Así, se obtuvo la delimitación de las zonas hidrológico-funcionales, el tipo de red de drenaje y la disección horizontal del relieve; para que a partir de estos criterios se pondere la información y se generen mapas hidrológicos más confiables. La importancia de dichas investigaciones estriba en su metodología, la cual fue utilizada para los objetivos de esta tesis en la obtención de las zonas funcionales hidrográficas y la densidad de drenaje.

El trabajo de Villanueva (2002) se concentra en la importancia de la delimitación del territorio en microcuencas para su adecuada gestión, planteando las limitaciones y los logros existentes en las estrategias de manejo de cuencas y mostrando algunas experiencias en México. Considera ciertos criterios para el aprovechamiento y la conservación de los recursos naturales, la reordenación y el manejo apropiado de las microcuencas, las cuales permiten una política de desarrollo sustentable, tales como la planeación participativa y la agricultura conservacionista. La microcuenca no solo representa una unidad geográfica con características propias, sino una unidad

ecológica y productiva de interés humano, además de una estrategia de planeación en el aprovechamiento y conservación de los recursos naturales. Intenta relacionar a la comunidad, el sistema productivo y el predio, a un área y a unas características en las que se integran, dándoles verdadero sentido. Además considera importantes a las zonas funcionales hídricas en la ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas.

La compilación de Cotler (2004), aborda el Manejo Integral de Cuencas en México, a partir de ciertos estudios ambientales realizados en distintas cuencas del territorio nacional. Se analiza el paisaje y los procesos de cambio ecológicos y sociales que presentan las cuencas hidrográficas, como base para una eficiente gestión y política de conservación. Dentro de estos trabajos sobresale el de Cotler y Priego (2004), que al igual que en PLADEYRA (2003), analiza la cuenca Lerma-Chapala a partir de su división por zonas funcionales hidrográficas, su densidad de drenaje y su cobertura natural; con el fin de considerar su heterogeneidad espacial y caracterizar integralmente los componentes naturales de la cuenca. Dicha metodología paisajística (basada en un enfoque físico-geográfico), ofrece una visión integral y holística de todos sus componentes naturales en la superficie terrestre, al incluirlos en una perspectiva espacial que facilita el entendimiento de las propiedades del geosistema como un todo (Priego *et al.*, 2004). Así, la cartografía generada permite comprender la dinámica del uso del suelo en las cuencas hidrográficas.

El trabajo de Bocco (2004) reconoce la importancia de la representación de información cartográfica a través de Sistemas de Información Geográfica (SIG), para un adecuado manejo de cuencas. Todos los componentes de una cuenca pueden ser inventariados, analizados y cartografiados utilizando SIG y otras técnicas complementarias, para hacer

modelos hidrológicos, balances hídricos, planes de manejo de cuencas y definición de zonas prioritarias para la conservación del recurso.

En el estudio de García-Coll *et al.* (2004), se resalta la importancia de los beneficios que ofrecen los bosques como fuente de abastecimiento de agua, asociándose con diversos servicios ambientales a nivel de cuenca hidrológica. Esta relación bosque-agua es la base para establecer programas que promuevan la conservación de aquellas zonas montañosas caracterizadas por su fragilidad geocológica (que ofrecen altos beneficios hídricos y están sujetas a un alto riesgo de deforestación) y por la alta marginación de los habitantes. Es así como se delimitaron zonas prioritarias para ser beneficiadas por el programa PSA, considerándolo como un mecanismo estratégico del desarrollo sustentable que asegura la conservación de procesos naturales que benefician al ser humano.

Carabias y Landa (2005), abordan la gestión integral del agua en México, a partir de un enfoque de cuencas, considerándolas como unidades principales del territorio para la gestión de los recursos hídricos existentes. Hacen un análisis de la disponibilidad de agua y de las clasificaciones existentes basadas en la delimitación geográfica del territorio, como son las cuencas; permitiendo reconocer la falta de compatibilidad, congruencia e interés que manifiestan las instituciones que son responsables de la generación de información científica y confiable, para un adecuado manejo de los recursos. Recalcan el papel fundamental que juegan las ANP's en la conservación de las cuencas y sus ecosistemas, buscando unificar criterios para una adecuada delimitación y protección de las cuencas hidrográficas, con el fin de adecuar las políticas públicas a los diversos espacios geográficos.

Travieso (2005) hace una evaluación de la sustentabilidad de la ganadería bovina en Veracruz a nivel de paisaje, mediante indicadores ecológicos y socioeconómicos, entre los cuales utiliza el potencial natural y el conocimiento agroecológico, para la elaboración de propuestas de uso ganadero ambientalmente sustentables, aportando elementos para su ordenamiento ecológico.

Pérez-Maqueo *et al.* (2006), propusieron un marco conceptual para mejorar el diseño y la evaluación del programa de PSAH en México, considerando que los esquemas de PSA tienden a trabajar mejor cuando se basan en evidencia científica clara, que relaciona los usos de suelo y la provisión de servicios. Los modelos hidrológicos requieren variables físicas y biológicas para ser operados, y estos a su vez favorecen el entendimiento de los procesos ecológicos que generan servicios ambientales. Así, la generación y aplicación de modelos apoya la toma de decisión para el PSAH y el manejo de los recursos naturales.

En el estudio de Gopar (2008), se identificaron geográficamente en la cuenca del río Copalita, Oaxaca, los procesos de cambio en las coberturas y usos de suelo y sus implicaciones en la provisión de servicios hidrológicos (ocurridos en un periodo de 21 años). Se determinaron zonas con potencial para la prestación de SAH, ayudando así a tomar mejores decisiones sobre aquellas áreas que están en conflicto, con perspectivas de desarrollo, en recuperación o en conservación. En general se tomó dicho trabajo como referencia para la metodología de las zonas funcionales y la obtención de la disección horizontal del paisaje, así como del potencial natural.

A escala regional, se contemplaron diversos trabajos de investigación realizados sobre la cuenca del río Ayuquila-Armería y la Reserva de Manantlán, y que son elementales para entender el contexto en que se encuentra el área de estudio. Para el caso de la cuenca del río Ayuquila, se encontraron varios trabajos sobre la antropización y la provisión de recursos hídricos (Mercado, 2001; Gerritsen *et al.*, 2005; Rodríguez, 2006; Jiménez *et al.*, 2009), así como referentes a la gestión y manejo del agua en dicha cuenca (Lomelí *et al.*, 2003; Martínez *et al.*, 2005; Graf *et al.*, 2006; Salcido *et al.*, 2010). En cuanto a la Reserva, se consideraron principalmente sus características geocológicas y socioeconómicas (Hernández, 1991; Vázquez *et al.*, 1995), el manejo del ANP y de sus bosques (INE, 2000; Santiago *et al.*, 2002; Graf *et al.*, 2003; Jardel, 1992; 2008; Jardel *et al.*, 1993; 2004; 2006, Balcázar, 2011); la calidad de agua y sanidad en comunidades rurales (Sandoval, *et al.*, 2005); así como el cambio de cobertura/uso de suelo (Jardel, 1998; Farfán, 2009). El estudio de Farfán (2009) es básico para la realización de este trabajo, al cartografiar las coberturas vegetales de la Reserva de Manantlán mediante análisis espacio-temporal sobre la dinámica de cambio de cobertura/uso de suelo, e incluir la percepción social para entender, en función de la zonificación de la reserva, la gestión y conservación de los recursos naturales.

Específicamente en la zona de Cerro Grande, se realizaron los primeros trabajos sobre geomorfología de cavernas (Quintero, 1987; Lazcano, 1988), estudios locales de diagnóstico integral y plan comunitario de manejo de recursos (Jardel y Cruz, 2000; Robert *et al.*, 2001); dinámica de bosques (Figuroa y Olvera, 2000); turismo alternativo (Robert *et al.*, 2000; Robert y González, 2006) y mecanismos de PSAH (Graf y Wynter, 2005; Graf *et al.*, 2008; MABIO, 2010; Machado, 2010; México Forestal, 2010).

Estos últimos trabajos son muy importantes al dar a conocer la generación de incentivos que se ofrecen en Cerro Grande para compensar a los dueños de los recursos por el beneficio social que otorgan, creándose así una fuente de financiamiento para el desarrollo local. Como estos mecanismos de compensación todavía están a nivel de propuestas, lo que se espera finalmente es que los resultados del presente estudio, referidos a la importancia del enfoque de cuencas y sus zonas funcionales, sean tomados en cuenta para la delimitación de los polígonos que serán elegidos en el programa de PSAH que maneja la CONAFOR; asegurando así un mayor potencial natural para la prestación de servicios ambientales hídricos en dichas zonas.

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### III.1. Área de estudio

##### III.1.1. Ubicación geográfica

El área de Cerro Grande es una región montañosa entre Jalisco y Colima que forma parte de la Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán (RBSM) en su extremo sureste (ver Figura 1) y está delimitada por los paralelos 19° 18' y 19° 36' de latitud norte y los meridianos 103° 49' y 104° 05' de longitud oeste, aproximadamente (Lazcano, 1988). Fisiográficamente se localiza en la provincia de la Sierra Madre del Sur, en su extremo noroeste, a 55 km de la línea de costa según Vázquez *et al.* (1995). Específicamente para el área de estudio se consideró tanto el área delimitada por los parteaguas de las subcuencas (424.41 km<sup>2</sup>) como la superficie circunscrita a la RBSM (383.75 km<sup>2</sup>).

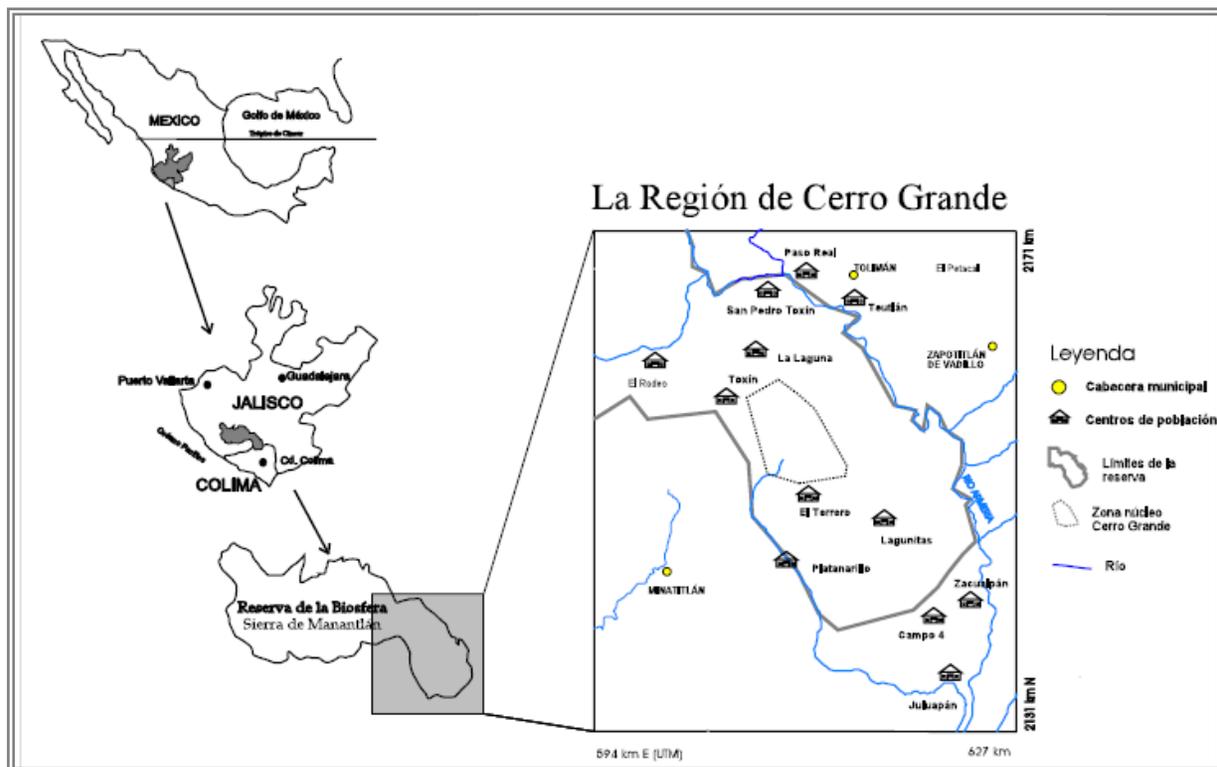


Fig. 1. Localización del área de Cerro Grande en la RBSM (Tomado de Robert *et al.*, 2000).

Desde el punto de vista de la conservación de la naturaleza, la RBSM es el área natural protegida más extensa y con mayor biodiversidad del Occidente de México (Hernández, 1991), de la cual aproximadamente un tercio de su superficie total está representada por Cerro Grande (Enrique Jardel, *com. pers.*, 2011).

El área de Cerro Grande tiene, político-administrativamente, su mitad norte en el estado de Jalisco dentro del municipio de Tolimán y su porción sur en el estado de Colima, entre los municipios de Minatitlán y Comala según Lazcano (1988). La Figura 2 ofrece la división municipal del área.



Fig. 2. Esquema que muestra la división municipal de la Reserva de Manantlán (los municipios correspondientes al estado de Colima se distinguen de los de Jalisco por el tono en gris, mientras que el área de la Reserva está delimitada por la línea negra punteada).

La región tiene tres accesos de terracería que comunican a los poblados: 1) Villa de Álvarez a Cerro Grande, 2) Ciudad Guzmán-Venustiano Carranza-San Pedro Toxín-Puerto de Toxín-Cerro Grande, 3) Minatitlán-Toxín-San Pedro Toxín (Lazcano, 1988). Las principales vías de comunicación a las partes altas de Cerro Grande son por la carretera Colima-Minatitlán, vía El Sauz-El Terrero o vía Campo Cuatro-Lagunitas (Vázquez *et al.*, 1995).

### **III.1.2. Caracterización Geográfica**

#### **III.1.2.1. Características biofísicas**

El origen de las rocas que conforman a la Sierra Madre del Sur durante el Cretácico (hace más de 60 millones de años), ocurrió a través de procesos de levantamiento de la corteza terrestre asociados a la deriva continental y particularmente, a la actividad de la Trinchera Mesoamericana, dando lugar tanto al afloramiento de las rocas ígneas intrusivas que forman actualmente la base de la Sierra de Manantlán, como al levantamiento de las rocas sedimentarias marinas que forman a Cerro Grande y Cerro de Enmedio. Durante el Terciario (60 a 1.5 millones de años antes del presente), la actividad volcánica provocó la formación de rocas extrusivas que cubren actualmente la mayor parte de la Sierra de Manantlán, mientras que los procesos erosivos dieron lugar a la formación de rocas sedimentarias, como las areniscas entre Cerro Grande y el río Ayuquila-Armería, y a los suelos aluviales de los valles, que son geológicamente los terrenos más jóvenes de la Sierra (INE, 2000).

Así, la porción oriental de la Sierra de Manantlán se conforma de dos montañas de origen calcáreo: la de menor extensión, el Cerro de Enmedio, va de los 700 m hasta los 2,300 m, entre el arroyo Cerro Blanco y el Paso Real o de Toxín; la de mayor extensión,

conocida como Cerro Grande, es una montaña media, que se eleva desde los 400-1000 m de altitud en su base, hasta los 2560 m, alineada en dirección noroeste-sureste (Jardel y Cruz, 2000).

Las partes más bajas de Cerro Grande están al sureste, donde se unen los ríos Armería y Juluapan a 430 m, mientras que en la meseta generalmente predominan altitudes entre 1800 y 2500 msnm. (Jardel *et al.*, 1995). Las laderas de Cerro Grande y del Cerro de Enmedio son de fuertes pendientes con una red paralela de barrancos; en el flanco oeste las laderas son rectas, muy empinadas, débilmente diseccionadas por cauces paralelos, mientras que el flanco oriental está fuertemente diseccionado por numerosos cauces, con cabeceras activas y grandes escarpes (Jardel y Cruz, 2000), como se puede apreciar en la Figura 3.

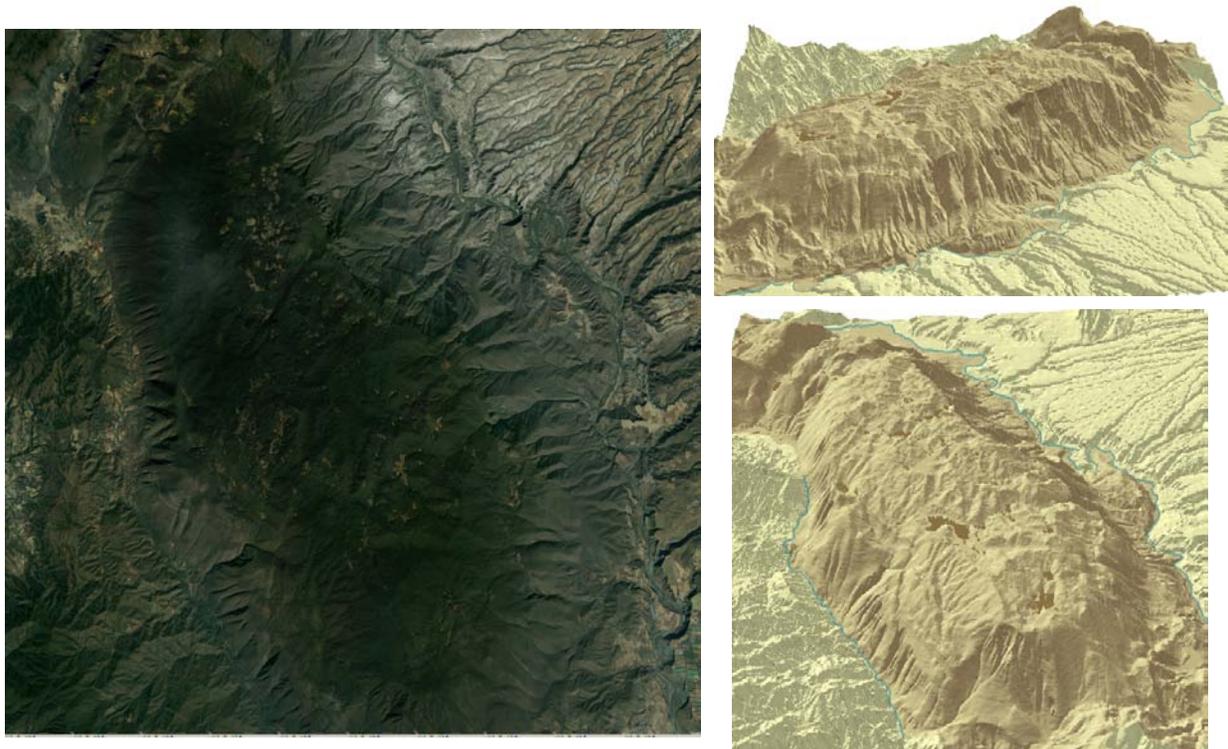


Figura 3. El relieve kárstico de Cerro Grande (imagen satelital NOAA obtenida de Google Earth Pro (versión 4.2, 2010), y vista tridimensional en ArcGIS versión 9.3 (ESRI, 2008)).

La morfología kárstica es consecuencia de la disolución de los materiales carbonatados por el agua de anhídrido carbónico. Comienza la karstificación a través de diaclasas o fracturas en las rocas, las cuales ensanchan y forman distintos tipos de cavidades, como las dolinas, uvalas y poljes que se crean en la superficie. La arcilla mezclada en la roca caliza, al ser indisoluble queda como residuo en el fondo de dichas depresiones y da origen a la *terra rosa*, sedimento muy fértil de color rojizo. Si el proceso de disolución sigue en profundidad, el fondo de las dolinas se desploma a lo largo de una fractura originando una sima. Al final de la sima aparece un caos de bloques con arcillas y formas de circulación subterránea que pueden continuar con el proceso a profundidad, descendiendo entonces la circulación a un nivel más bajo y abandonando el anterior, por lo que éste último queda libre y forma una caverna. En las paredes y techo de las cavidades, al existir diferencia de presión entre la roca y el aire, el proceso físico-químico se invierte y se producen precipitaciones de carbonatos, los cuales al cristalizarse producen estalactitas, estalagmitas, columnas y otras múltiples formas características del endokarst (Mateo, 1981; Romero y Belmonte, 2002).

Las mesetas en las partes altas de dichas montañas, presentan un fuerte desarrollo kárstico, con un relieve complejo formado por colinas, depresiones, resumideros e impresionantes cavernas (Lazcano, 1988), incluyendo a la quinta caverna vertical más profunda del continente (INE, 2000).

Hidrográficamente, la Sierra de Manantlán forma parte de dos grandes regiones integradas por las cuencas de los ríos Ayuquila-Armería, Purificación y Marabasco (Vázquez *et al.*, 1995). El río Ayuquila-Armería constituye 70 km de la frontera norte de la reserva y su cuenca cubre una extensión de 9 821 km<sup>2</sup> en los estados de Jalisco y Colima, abarcando aproximadamente 60% de la superficie de la Reserva (ver Figura 4).

Esta cuenca se considera una de las más importantes en la vertiente del Pacífico, la segunda para el estado de Jalisco y la primera en el estado de Colima; reconocida por la Comisión Nacional para el Uso y la Conservación de la Biodiversidad (CONABIO) como una de las cuencas prioritarias a conservar en el país (Graf *et al.*, 2003).

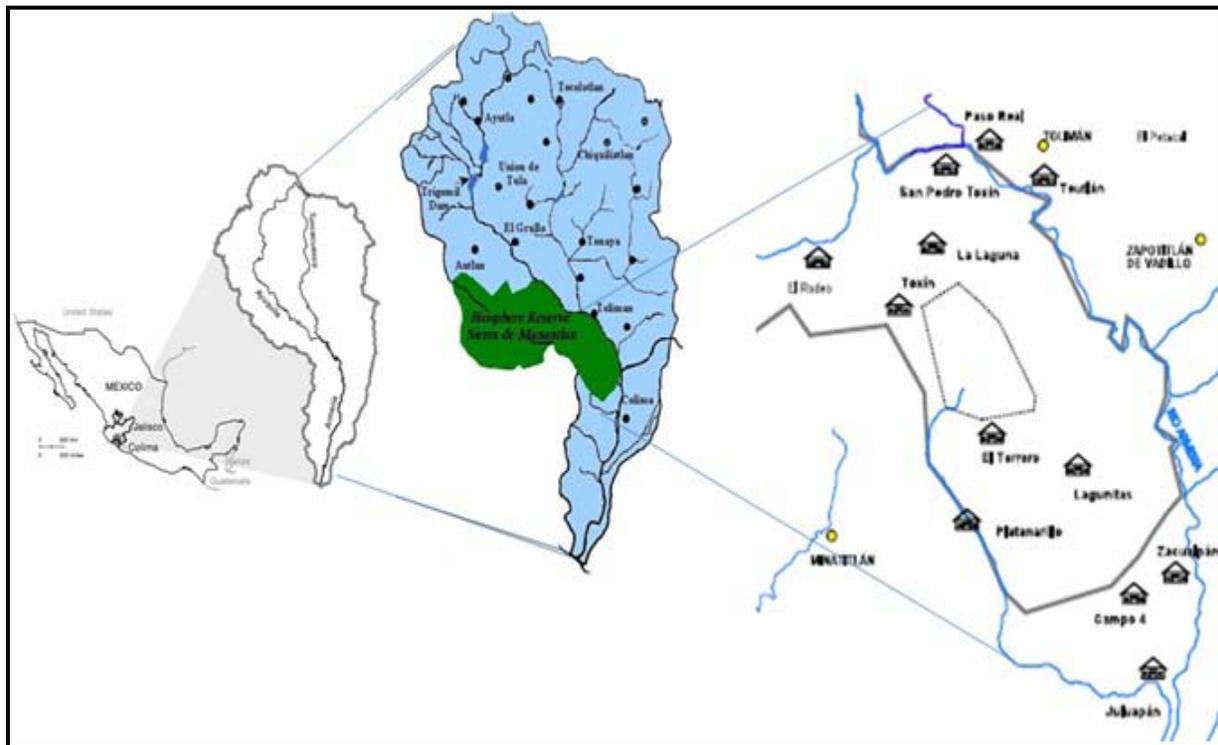


Fig. 4: Ubicación de la cuenca del Río Ayuquila-Armería y de Cerro Grande dentro de la RBSM (fuente: Robert, *et al.*, 2000; Graf *et al.*, 2006).

La red hidrológica de Cerro Grande está formada por un conjunto de corrientes pertenecientes a la cuenca hidrológica del río Ayuquila-Armería y a la cuenca del río Marabasco, que desembocan en el Pacífico (Graf *et al.*, 2008). Según Vázquez *et al.* (1995), el área de Cerro Grande se conforma por cuatro subcuencas: Toxín (a-5), Juluapan (a-6), Meseta Cerro Grande (a-7) y Zacualpan-Teutlán (a-8), como se puede apreciar en la Figura 5.

Mientras que las laderas vierten sus aguas al oeste en la subcuenca de Juluapan y al este en la subcuenca de Zacualpan-Teutlán (Jardel, 1992), las subcuencas de Toxín y de la Meseta Cerro Grande son endorreicas, vertiendo sus aguas al interior del macizo.

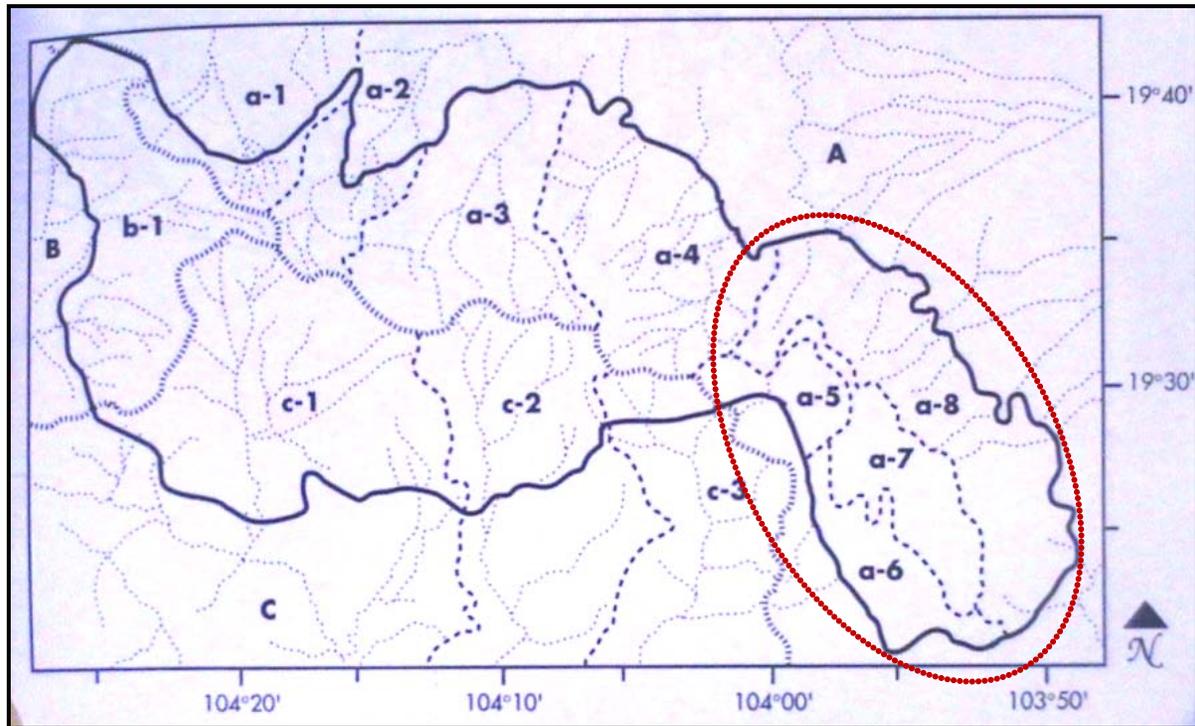


Fig. 5. Cuencas y subcuencas hidrológicas de la RBSM (esquema tomado de Jardel, 1992). La línea roja punteada delimita el área de Cerro Grande.

Los principales patrones de drenaje que se presentan en Cerro Grande son del tipo dendrítico y subdendrítico, (ramificaciones arborescentes en la que los tributarios se unen a las corrientes principales, formando ángulos agudos o casi agudos), con modificaciones de tipo pinado y radial-centrípeto-kárstico (Cruz, 1989 en Vázquez *et al.*, 1995), éstos últimos asociados generalmente a formas negativas del relieve y a zonas de subsidencia por la tectónica reciente, cráteres y depresiones kársticas (Vázquez *et al.*, 1995).

La zona de estudio se delimitó por las subcuencas que conforman la montaña de Cerro Grande. Los caudales que se forman de las líneas del parteaguas de Cerro Grande permiten captar grandes cantidades de agua; sin embargo, por su naturaleza kárstica, los únicos cauces de agua superficiales que se forman son algunos arroyos intermitentes en las laderas bajas. En la meseta los flujos de agua tienen un corto escurrimiento y se pierden, por la estructura fallada y por el sustrato de roca caliza drenado por conductos de disolución y resumideros (Jardel y Cruz, 2000), los cuales van formando un complejo sistema de drenaje subterráneo que infiltra el agua hasta grandes profundidades y surge al pie del macizo montañoso a través de numerosos manantiales como el de la Taza, el Reventón y Zacualpan. Dicho entramado fluvial alimenta a los ríos de la región: el Río Armería bordea todo el norte y oriente del área y tiene como único tributario de importancia en esta zona al Río Juluapan, que bordea la parte suroeste y sur del Cerro Grande (Lazcano, 1988).

La recarga acuífera del Río Ayuquila-Armería depende en gran parte del agua que se infiltra en Cerro Grande; y asimismo, varios centros de población de los municipios de Tolimán, Jalisco, y Comala, Minatitlán y Villa de Álvarez, Colima, dependen de los recursos hidráulicos que provee Cerro Grande, así como del abastecimiento de agua de la Ciudad de Colima por medio del manantial de Zacualpan, que produce más de 1000 l/s, considerándose como su fuente de agua más importante (Graf y Wynter, 2005). Por estas razones, Cerro Grande juega un papel de suma importancia en la hidrología de la porción oeste del Estado de Colima (Jardel y Cruz, 2000).

En cuanto a su litología, el macizo montañoso de Cerro Grande se compone de afloramientos de rocas sedimentarias del Cretácico (caliza y dolomita interestratificadas de la Formación Morelos). En Cerro Grande se presentan sierras bajas complejas,

escarpaduras y laderas de montañas medias, fuertemente diseccionadas, con pendientes fuertes a muy fuertes (50 a 100%), convexas o rectas, con suelos someros y afloramientos rocosos (Leptosoles) en las laderas de Cerro Grande y el Cerro de Enmedio, entremezclándose con pequeñas depresiones kársticas, pendientes moderadas a fuertes (10-50%) con suelos forestales pardos, porosos, ricos en materia orgánica (probablemente suelos calcimagnésicos muy húmicos; “Andosoles”), mezclados con Leptosoles en las cimas y parteaguas, y Luvisoles en las depresiones y valles, y pequeñas llanuras, con fuerte desarrollo kárstico (presencia de dolinas, “resumideros” y lapiez), con suelos forestales pardos calcáreos, de perfil diferenciado, (Luvisoles); así como lomeríos con suelos pedregosos o rocosos (Regosoles y Leptosoles) sobre arenisca-conglomerado correspondientes a las laderas bajas de Cerro Grande en los terrenos circundantes del río Ayuquila-Armería (INE, 2000).

De acuerdo a la geología superficial de Cerro Grande, se presentan dos tipos de formas de relieve: 1) laderas de montaña en el flanco occidental y oriental de la estructura montañosa cortada por una red paralela de barrancos, cuya disección vertical es de débil a intensa y es en general del orden de 40 a 150 m, y 2) zona montañosa con fuerte desarrollo kárstico en la mayor parte de la meseta de Cerro Grande, generalmente entre 1100 y 2200 msnm, afectada por gran cantidad de formas negativas kársticas cuyas dimensiones varían desde 150 m hasta 3 km de diámetro (Martínez y Ramírez, 1998).

Dentro del área de Cerro Grande, las condiciones climáticas son similares que para toda la región de Manantlán. En las partes altas de Cerro Grande, Cerro de Enmedio y Toxín (a más de 2000 m), se presenta el clima templado subhúmedo (con una temperatura media anual de 18-20°C y 1200-1500 mm de precipitación promedio

anual). A menor altitud (1000-2000 m) el clima cambia a semicálido subhúmedo (con un promedio de 22°C y 1000-1200mm de precipitación en la porción oriental de Cerro Grande y entre 1200-1500mm en la parte occidental). Entre los 1000-1500msnm se presenta en el flanco oriental el clima semicálido subhúmedo (menos húmedo que el anterior), marcado por una mayor temperatura media anual (22-24°C) y menor precipitación (1000mm). En las partes más bajas (500-1000 m.s.n.m.) se encuentran tres tipos de clima cálido subhúmedo: el más húmedo se presenta en el límite occidental (con temperaturas promedio de 22 °C y 1500 mm de precipitación), el intermedio (media anual de 22-24°C y 1000-1200mm) en la parte sur-occidente, y el clima cálido subhúmedo menos húmedo (24°C y 800-1000 mm) presente en el extremo oriental. Dicho clima se expresa debido a que Cerro Grande actúa como una barrera orográfica, reteniendo gran parte de la humedad de los vientos costeros, lo que le da una mayor diversidad climática: la zona occidental presenta mayor homogeneidad al existir altas precipitaciones, mientras que la parte oriental tiende a ser más seca por tener temperaturas más altas (Lazcano, 1988).

El clima en general presenta una estación seca y una estación lluviosa bien definidas a lo largo del año. Según datos de la Estación Meteorológica localizada en el Ejido El Terrero, la precipitación pluvial anual es de aproximadamente 1650 mm (Olvera y Figueroa, 2000). Dicho régimen de lluvias de verano presenta las mayores precipitaciones de junio a octubre. Al final de la temporada lluviosa, después de la canícula, suelen presentarse tormentas fuertes y ciclones. La temporada seca va desde finales de octubre hasta mayo o junio; durante el invierno pueden presentarse lluvias ocasionales y en la cima de la meseta se presentan heladas. Durante el período de marzo a principios de junio se presentan las condiciones más marcadas de sequía y por

lo tanto, es la época de mayor riesgo de incendios forestales. Por ello, tanto las heladas y sequías como los ciclones, son elementos importantes a considerarse en el manejo del bosque y en la agricultura, debido a que pueden afectar a los cultivos, la regeneración natural y la reforestación (Jardel, 1995).

El Cuadro 1 presenta una síntesis de la distribución anual de diferentes eventos hidrometeorológicos, según conocimiento empírico de la población local.

Cuadro 1. Eventos climáticos a lo largo del año, según pobladores del ejido El Terrero. (Tomado de Jardel y Cruz, 2000).

EVENTO	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Epoca de Frio	■	■	■									■
Tiempo de Lluvias						■	■	■	■	■		
Hay Nublados						■	■					
Hay Neblina					■	■	■					
Heladas (hasta 4 meses)	■	■	■									■
Sequías				■	■	■						
Mucha tierra suelta			■	■	■	■						
Floración silvestre										■	■	
Vientos (ciclones)								■	■			
Cabañuelas	■	■										
Calor				■	■							

En cuanto a composición florística, la Sierra de Manantlán se considera un área de alta diversidad, con un elevado número de especies raras, endémicas o amenazadas. Los elementos arbóreos más característicos y dominantes del área de estudio son los encinos (*Quercus*) con 8 especies (*Q. candicans*, *Q. castanea*, *Q. crassipes*, *Q. laurina*, *Q. obtusata*, *Q. rugosa*, *Q. scytophylla*, *Q. vicentensis*). Asociados con los encinos se encuentran 4 especies de pinos (*Pinus leiophylla*, *P. michoacana*, *P. montezumae*, *P. pseudostrobus*) (Cuevas y Nuñez 1988), el madroño (*Arbutus xalapensis*) y el aile (*Alnus jorullensis*). En algunas áreas, los pinabetes (*Abies religiosa* y *A. religiosa* var. *emarginata*) llegan a ser elementos importantes en la vegetación (Figuroa y Moreno, 1993 en Jardel y Cruz, 2000). El bosque mesófilo de montaña es la formación vegetal

con mayor diversidad florística en el área (Jardel, 1995), mientras que en las laderas se encuentran selvas bajas caducifolias, rodales de bambú u otate (*Otatea acuminata* ssp. *aztecorum*) y matorrales.

En la meseta de Cerro Grande se encuentra una de las tres zonas núcleo de la Reserva de Manantlán. Posee una superficie de 3,995 hectáreas destinadas estrictamente a la conservación, quedando restringido el aprovechamiento de recursos forestales, flora y fauna y el cambio de uso de suelo; lo cual afecta de manera significativa a la economía de algunas propiedades privadas y comunidades ejidales que cuentan con una porción importante de sus terrenos dentro de esta zona, como es el caso del 68 % del ejido Toxín y del 32 % de La Laguna (Graf *et al.*, 2008). Dicha zona núcleo se decretó con el fin de conservar los relictos de bosque mesófilo de montaña, que tienen gran valor a nivel nacional (INE, 2000); además de su importancia en términos de biodiversidad y de captación de agua (Graf *et al.*, 2008). Aparte de éste tipo de vegetación, según el estudio de Farfán (2009), el área montañosa de Cerro Grande se cubre espacialmente de bosques de encino, bosques mixtos de encino-pino, bosques de latifoliadas (como la selva baja caducifolia, selva mediana subcaducifolia), además de vegetación secundaria (como el matorral y pastizal) y zonas agrícolas.

En general, el estado de conservación de Cerro Grande es muy bueno, ya que su cobertura boscosa representa 91.7% de la superficie total, y sólo 8.3% corresponde a zonas abiertas a la agricultura. Por tales razones, la CONAFOR lo incluyó desde el 2003 como una de las 60 Montañas Prioritarias dentro del Programa Nacional de Manejo y Conservación de Ecosistemas de Montaña (Graf *et al.*, 2008); conformando también una de las Áreas de Importancia para la Conservación de las Aves (AICAS C64), una Región Terrestre Prioritaria (RTP-64: Volcán Colima-Manantlán) y una

Región Hidrológica Prioritaria (RHP-25: Ríos Purificación-Armería), de acuerdo a la clasificación de CONABIO (CONABIO, 2008; Carabias y Landa, 2005). Además, se localiza dentro de un APROMSA ó Área Promisoria para el Desarrollo de Mercados de Servicios Ambientales (Graf e Iglesias, 2010; Saldaña, 2010); todo lo cual le confiere una mayor relevancia para la provisión y conservación del agua, considerándose un territorio apto para prestar el servicio ambiental hídrico.

Por su ubicación geográfica, Cerro Grande es un área representativa de las características biológicas y ecológicas únicas de la zona de transición biogeográfica que se presenta entre los reinos Neártico y Neotropical en las montañas de Mesoamérica, conteniendo en sí una alta diversidad biológica (INE, 2000).

Es uno de los sitios más importantes para la conservación faunística, debido a la complejidad topográfica, edáfica, climática y de vegetación del área, que se manifiesta en una gran diversidad de hábitats distribuidos en un área relativamente reducida (Jardel y Cruz, 2000). Se han reportado para el territorio de Cerro Grande un total de 119 especies de aves (representando 11% de la avifauna del país y 30% de la avifauna potencial para el estado de Colima), 47 especies de mamíferos, 18 de reptiles y 3 de anfibios. A nivel del país el río Ayuquila es importante, ya que protege en sus aguas a 29 especies de peces (2 endémicas de la región) y 9 especies de crustáceos (1 endémica), además de ser el límite geográfico de distribución continental de tres familias de peces, siendo dos de ellas de afinidad neártica y una de afinidad neotropical, las cuales hacen migraciones durante sus períodos reproductivos, trasladándose desde el mar hasta más de 100 km aguas adentro del río (Robert *et al.*, 2000; Jardel y Cruz, 2000).

En cuanto al estado de conservación de la fauna, se encuentran 3 especies consideradas en peligro de extinción, la nutria neotropical (*Lutra longicaudis*), la guacamaya verde (*Ara militaris*) y el puma (*Puma concolor*); 19 especies son endémicas de México y 39 utilizadas por los pobladores de la región (INE, 2000; Jardel y Cruz, 2000; Graf *et al.*, 2003).

Cabe destacar que la mayoría de las especies de vertebrados del área de estudio están asociadas a bosques maduros con arbolado grande. Un segundo grupo de especies exhibe hábitos generalistas en selección de hábitat y un tercer grupo está asociado a la vegetación secundaria (Jardel y Cruz, 2000).

### **III.1.2.2. Características socioeconómicas**

La región de influencia de Cerro Grande está delimitada por la cuenca del río Ayuquila-Armería, e incluye municipios del estado de Jalisco (Tolimán y de manera apreciable Zapotitlán de Vadillo) y del estado de Colima (Comala, Minatitlán y considerablemente Colima y Villa de Álvarez). Para esta región, los bosques ubicados en el área de Cerro Grande son elementos fundamentales que contribuyen a la regulación ambiental y al abastecimiento de agua y otros recursos naturales (INE, 2000).

La población del interior y de los límites de la Reserva de Manantlán se estima en más de 32,000 habitantes (Vázquez *et al.*, 1995), ubicados la mayor parte en caseríos y poblados dispersos por debajo de los 1500 m.s.n.m., excepto en la meseta de Cerro Grande, donde habitan más de 1500 personas que viven en condiciones socioeconómicas de pobreza y marginación (Graf y Rosales 1996 en INE 2000). Mientras que para las ciudades de Colima, Villa de Álvarez y Comala, se espera un aumento poblacional de hasta 300,000 habitantes para el 2010 (INE, 2000), algunos ejidos y comunidades en los municipios de Tolimán, Minatitlán y Comala vieron

disminuir su población, perdiendo en conjunto una tercera parte de ésta (Graf y Rosales, 1995).

En el área de Cerro Grande existen comunidades de importancia, la mayoría de las cuales habita al pie de los macizos, debido a la escasez de agua que impera en las partes altas. Algunas localidades son: el Miscoate, Pueblo Nuevo y Juluapan (Villa de Álvarez), Zacualpan y Picachos (Comala), La Loma, Los Sauces, Rastrojito, Ranchitos y Platanarillos (Minatitlán) en Colima; y San Pedro Toxín, El Rodeo, La Primera Agua y La Lima (Tolimán) en Jalisco (Lazcano, 1988). En la meseta de Cerro Grande se encuentran ubicados los centros de población de El Terrero, Lagunitas, La Laguna y Campo Cuatro; mientras que Toxín, Platanarillos y la C. I. de Zacualpan están ubicadas en la parte baja (Graf *et al.*, 2008).

Circunscrito dentro de los límites político-administrativos de la Reserva de Manantlán, dicho territorio se compone de una comunidad indígena (Zacualpan), seis comunidades ejidales (Campo Cuatro, El Terrero, La Laguna, Lagunitas, Platanarillos y Toxín) y propiedades en litigio entre algunas comunidades agrarias. Es importante mencionar que para el presente estudio sólo se consideraron los predios localizados al interior de la Reserva (Cuadro 2), por lo que en algunos casos se redujo su área real.

Cuadro 2. Comunidades presentes en el área de Cerro Grande

ESTADO	MUNICIPIO	EJIDO
Colima	Comala	Campo Cuatro
		Lagunitas
		C.I. Zacualpan
	Minatitlán	El Terrero
		Platanarillos
Jalisco	Tolimán	La Laguna
		Toxín

Según INEGI (2000), en la zona de captación de Cerro Grande vive un total de 2,752 personas y todos los ejidos y comunidades tienen terrenos en dicha zona. En este sentido, los asentamientos humanos de toda el área pudieran tener un impacto importante sobre los servicios ambientales hidrológicos (Graf *et al.*, 2008).

La migración temporal o definitiva de Cerro Grande a las ciudades aledañas y a los Estados Unidos ha sido un factor importante que ha mitigado la presión demográfica sobre la zona montañosa y sus recursos, generando con ello un menor crecimiento poblacional y quedando marginadas en el proceso de desarrollo (Jardel 1992, 1998). Por ello, las 7 comunidades agrarias donde habitan alrededor de 3000 personas, se encuentran en condiciones de alta y muy alta marginación (Graf y Wynter, 2005; MABIO, 2010).

La tenencia de la tierra dentro de la reserva se distribuye así: 48.9% ejidal, 17.8% comunal y 33.3% pertenece a pequeños propietarios (Balcázar, 2011). Específicamente para el área de estudio, la mayor parte de la tenencia de la tierra pertenece a la propiedad privada (53%), mientras que la propiedad ejidal representa un 36% y la propiedad indígena se concentra en 9% del territorio (ver Figura 6). Sin embargo, 2% del territorio restante se considera en litigio, debido a una delimitación deficiente entre algunos predios, lo que ha generado problemas en su manejo.

Las comunidades que habitan el macizo montañoso y en especial en la meseta de Cerro Grande, son de tipo rural y su principal actividad económica es la agricultura (maíz, frijol, calabaza, zanahoria, papa, rábano, tomate, col, betabel, frutales de tierra fría, principalmente durazno y manzana, y algunas plantaciones de nopal tunero) y la explotación de sus recursos forestales (Lazcano, 1988), como madera en rollo, tablas, vigas, durmiente, tarimas, tableta para caja de empaque, morillos, latas, postes y

carbón. Además se dedican a la cacería, especialmente de venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*), ardillas (*Sciurus aureogaster*), jabalíes (*Tayassu tajacu*) y la gallinita de monte (*Dendrortix macroura*), así como al aprovechamiento de recursos silvestres como flor de tila o jazmincillo, laurel, zarzamora y hongos. (Jardel y Cruz, 2000).

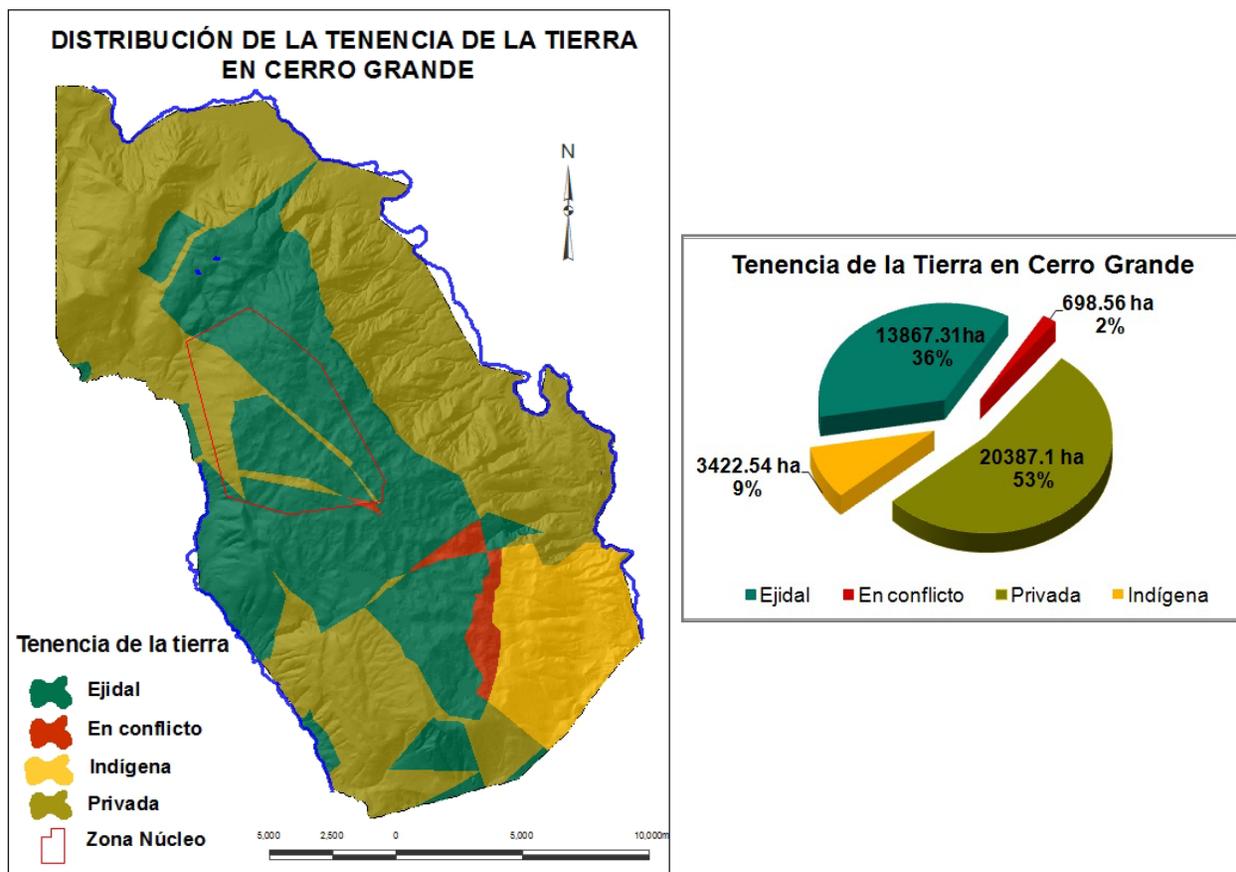


Figura 6: Distribución y porcentaje de la tenencia de la tierra en Cerro Grande. La información de los polígonos ejidales fue proporcionada por MABIO (2004) con proyección UTM datum WGS84, y transformado a NAD27 para su comparación.

El bosque lo utilizan también para la producción ganadera, principalmente de bovinos y equinos, y en menor número, de porcinos y caprinos, cuya alimentación es complementada con rastrojos de la agricultura (Jardel, 1995).

Los bosques de la sierra son una fuente potencial de materias primas, particularmente en recursos forestales tanto maderables como no maderables. Los bosques de Cerro Grande atrajeron la atención de los madereros desde principios del siglo XX. Al ser detenida la sobreexplotación maderera, hasta la década de los 80, los pobladores de Cerro Grande se enfrentaron a los problemas de subsistir en un área con una importante riqueza forestal, pero aislada y sin disponibilidad de agua.

Dada la naturaleza kárstica del substrato geológico, el agua se infiltra en los resumideros y no hay corrientes superficiales. A pesar de que el agua que surge en los manantiales de la base de la meseta es un importante recurso que abastece a poblaciones de más de 5,000 habitantes en los valles, arriba de la meseta el líquido es muy escaso; tanto que en ocasiones, la gente de Cerro Grande se ha visto obligada a vender madera a precios muy bajos a cambio de agua (Jardel, 1998).

Por tales características biofísicas y socioeconómicas, la Dirección y el Consejo Asesor de la RBSM impulsaron un programa de Pago por Servicios Ambientales, donde la SEMARNAT a través de la CONAFOR y la Dirección de la Reserva firmaron un contrato por 5 años con todos los ejidos de Cerro Grande por concepto de PSAH desde el 2003, para compensar a los propietarios de los bosques por el beneficio que dan a la población de Colima y Villa de Álvarez con la producción de agua y la conservación de un lugar para el esparcimiento de los habitantes de esta zona. No obstante, sin una estrategia clara de la comunidad, es importante revisar la manera en que se definen las zonas elegibles y se asignan los recursos (Graf y Wynter, 2005).

### **III.2. Fundamentos Teórico-Metodológicos**

La metodología utilizada para delimitar las zonas funcionales hidrográficas se sustenta en los trabajos realizados por PLAIDEYRA (2000; 2003) y Gopar (2008), donde en cada unidad hidrográfica, se pueden delimitar las zonas de funcionamiento hídrico de cabecera, de captación-transporte y de emisión, a partir de los tipos y categorías de drenaje clasificados por las corrientes de primer orden, segundo orden, tercer orden, etc., ya que éstas son el resultado directo de factores estructuro-genéticos dentro de cada sistema. Dichas zonas coinciden aproximadamente, con la caracterización del ambiente fluvial de Robertson (1992), quien define las zonas de un sistema fluvial generalizado como: zona alta (montañas y colinas), zona media (valle aluvial) y zona baja (delta). Para el área de estudio, se realizó la zonificación hidrográfica-funcional, definiéndose las tres zonas mencionadas anteriormente e incluyendo las zonas de emisión-confinamiento para las formas negativas del relieve encontradas en las subcuencas endorreicas.

Para la obtención de la disección horizontal, la metodología se basa en la propuesta de Spiridonov (1981) y además se observaron los resultados de PLAIDEYRA (2003), que utiliza dicho índice morfométrico (también denominado densidad de drenaje por Derruau (1989) y Summerfield (1991)), a partir de rangos de clasificación que van desde el muy bajo hasta el muy alto grado de disección horizontal.

La elaboración del mapa de evaluación del potencial natural para la prestación de Servicios Ambientales Hídricos (SAH) en Cerro Grande, se llevó a cabo (tomando como ejemplos los estudios de PLAIDEYRA (2003), Travieso (2005) y Gopar (2008)), mediante la superposición de los mapas temáticos de la Vegetación y uso de suelo en

la Reserva de Manantlán a escala 1:75,000, generado por Farfán (2009), y los mapas previamente obtenidos de las Zonas Funcionales Hidrográficas y de la Disección Horizontal de Cerro Grande. Dichos insumos se integraron con ayuda de la cartografía digitalizada, la interpretación de imágenes satelitales y el uso de Sistemas de Información Geográfica (ESRI, 2008). Los potenciales naturales para la prestación de SAH se definieron a partir de sistemas de matrices sucesivas, considerando los criterios de CONAFOR con respecto a la cobertura boscosa al interior de las zonas funcionales, o sea, los porcentajes de vegetación arbórea existentes en cada zona funcional. Para aquellas zonas que no cumplen con los criterios de elegibilidad de CONAFOR, se consideraron entonces los valores de disección horizontal, como forma de priorizar la incorporación a condiciones de elegibilidad o por el contrario, la conveniencia de mantener el aprovechamiento actual (uso actual del suelo). Además, se sugieren algunas recomendaciones según Bocco *et al.* 2010, de acuerdo a los valores de densidad de drenaje, para el manejo del área.

Dicho mapa se crea para beneficio de las comunidades locales y la conservación de los paisajes físico-geográficos que son afectados por aquellas dinámicas naturales y sociales relacionadas al abasto de agua en la región de influencia de Cerro Grande, pues ofrece información sobre la distribución de los potenciales naturales para la prestación de SAH. El Anexo 1 ofrece las definiciones básicas de la investigación.

Finalmente se creó un mapa de elegibilidad para la prestación de servicios ambientales hídricos en el área de estudio con base en los potenciales calculados, donde se resaltaron las zonas de elegibilidad y se sobrepusieron con los terrenos de las comunidades que están circunscritos al interior de la Reserva de Manantlán (insumos de MABIO, 2004), con el objetivo de conocer el área total de zonas elegibles para la

prestación de SAH por cada ejido o propietario de la tierra, así como considerar los diferentes manejos propuestos para las zonas que no son elegibles en la prestación de servicios ambientales hídricos. Dichos resultados se compararon con la información de los predios que se encuentran inscritos al programa de PSAH de la CONAFOR en Cerro Grande según CONAFOR (2005, 2006, 2007, 2008 y 2009), con el fin de entender las diferencias en los métodos de prelación para definir dichas áreas, y sugerir otros enfoques que consideren esencialmente a las cuencas y sus zonas funcionales hidrográficas como unidades básicas de análisis en la provisión del recurso hídrico.

### **III.3. Diseño de la Investigación:**

La investigación se realizó en varias fases:

- a)- Revisión bibliográfica y cartográfica (INEGI, CONAFOR, SEMARNAT, INE, CONAGUA, CONABIO, UNAM, UAG, CUCSUR, IMECBIO, MABIO A.C.)
- b)- Levantamiento completo de la red de drenaje y subcuencas a escala 1:50,000
- c)- Elaboración del mapa de zonas funcionales hidrográficas de Cerro Grande a escala 1:50,000
- d)- Obtención del mapa de la disección horizontal en Cerro Grande a escala 1:50,000
- e)- Elaboración del mapa de la disección horizontal por cada zona funcional de Cerro Grande a escala 1:50,000
- f)- Trabajo de campo para verificar la distribución de subcuencas, así como la presencia de formas kársticas como las dolinas y la cobertura de vegetación y uso del suelo

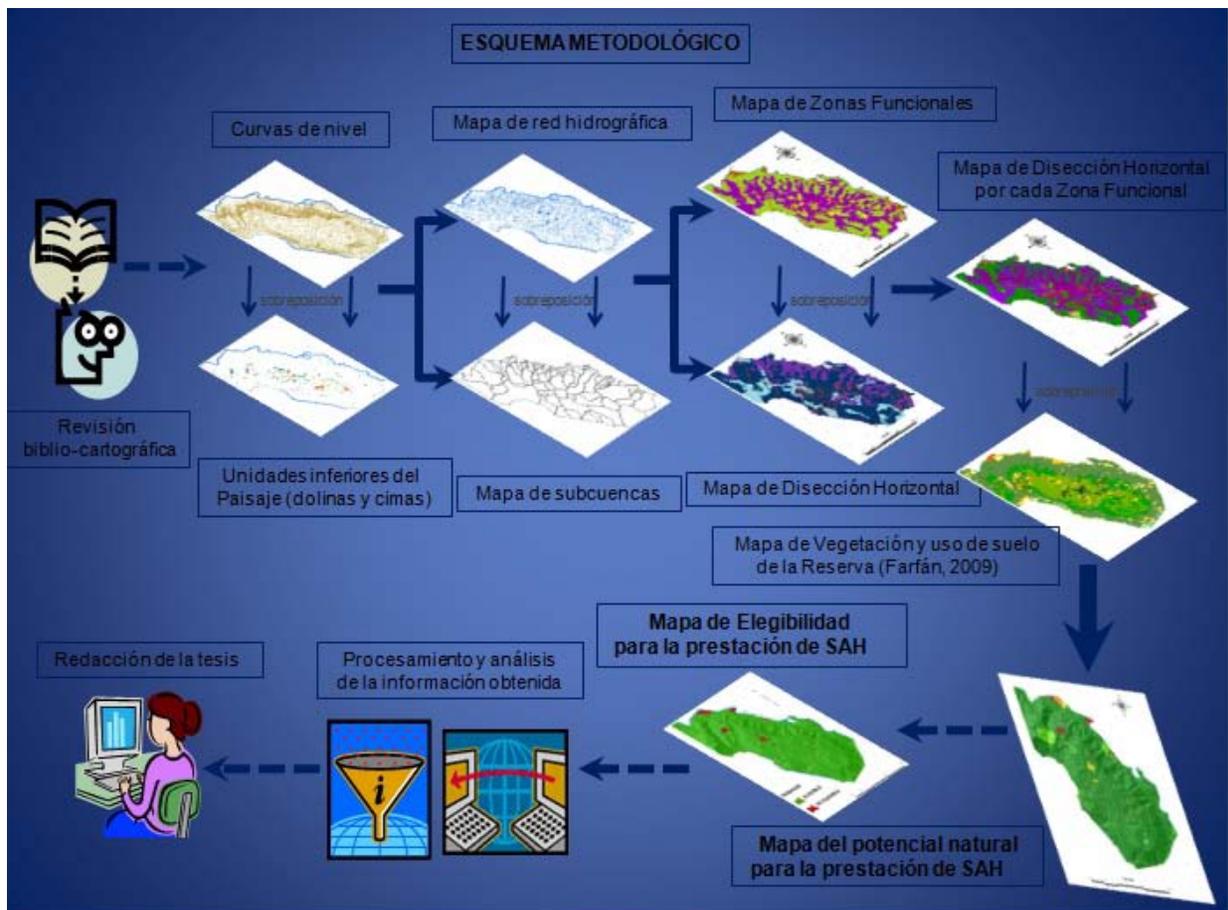
g)- Realización del mapa de evaluación del potencial natural para la prestación de servicios ambientales hídricos de Cerro Grande a escala 1:50,000

h)- Análisis de las zonas de elegibilidad para la prestación de servicios ambientales hídricos dentro de la distribución de la tenencia de la tierra en Cerro Grande

i) Comparación de las zonas de elegibilidad con los polígonos de los predios incluidos en el periodo 2005-2009, dentro del programa de PSAH de la CONAFOR

j)- Procesamiento y análisis de la información obtenida

k)- Redacción del documento de Tesis



### III.4. Metodología de la Investigación

El método utilizado se orientó al análisis de las cuencas hidrográficas, con el fin de evaluarlas como unidades de estudio, de manejo y de conservación.

Previamente se hizo una revisión bibliográfica y cartográfica exhaustiva del área de estudio, contemplando diferentes instituciones públicas y privadas, académicas y gubernamentales (INEGI, CONAFOR, SEMARNAT, INE, CONAGUA, CONANP, UNAM, UAG, CUCSUR, IMECBIO, MABIO A.C.), donde existiera información sobre el tema de investigación.

Posteriormente se recabó la información digital correspondiente al área de estudio a partir del conjunto de Datos Vectoriales de la carta topográfica versión 4 de INEGI, escala 1:50,000. DATUM: NAD27 México (1998); las cartas topográficas e13b23 “El Chante”, e13b24 “San Gabriel” y e13b34 “Comala” a escala 1:50,000 del INEGI (2000) y las imágenes satelitales NOAA proporcionadas por el programa Google Earth Pro (versión 4.2, 2010), para integrar los materiales en el Sistema de Información Geográfica a través del programa ArcGIS versión 9.3 (ESRI, 2008).

Para cada insumo generado en esta investigación, se presentan los mapas de ubicación de la zona de estudio, los cuales fueron tomados del trabajo de Robert *et al.* (2001).

Partiendo de la idea de que mediante un Modelo Digital del Terreno (MDT) de una cuenca se puede derivar el trazado de cauces y parteaguas (Bocco, 2004); a partir de las curvas de nivel, se comenzó por trazar algunas unidades morfológicas del relieve (dolinas y cimas) para comprender el sistema kárstico. La sobreposición de ambas capas de información fue requerida para completar el levantamiento de la red

hidrográfica de Cerro Grande (trazando todas las corrientes que cumplieran con un área mínima cartografiada mayor o igual a 2 mm, de acuerdo a la escala utilizada). De igual manera, fueron ocupados los insumos anteriores para trazar los parteaguas principales y delimitar las subcuencas existentes dentro de Cerro Grande a escala 1:50,000.

Para realizar la zonificación funcional de Cerro Grande, se requirió sobreponer el mapa de las subcuencas con la red hidrográfica completa, y analizar detenidamente las corrientes de acuerdo a su orden. La delimitación de las zonas funcionales en Cerro Grande considera: a) las zonas de cabecera desde el parteaguas hasta donde se unen dos corrientes de orden 1; b) las zonas de captación-transporte desde la unión de las corrientes de orden 1 hasta la última ramificación previa a la zona de descarga; c) las zonas de emisión desde la última ramificación hasta la zona de descarga del río permanente, y d) las zonas de emisión-confinamiento desde la última ramificación hasta la zona de confinamiento (resumideros, cuerpos de agua).

El mapa de Disección Horizontal en Cerro Grande, se pudo realizar indistintamente con la sobreposición de la información previamente creada (red hidrográfica y delimitación de subcuencas). Tomando como unidad de área a las subcuencas, se calculó la longitud total de drenaje (km) que pertenece a éstas, a partir de la sumatoria de todas de las corrientes que componen a cada subcuenca. El cálculo del índice de disección horizontal se realiza con la fórmula:

$$DH = S I / A \quad \text{donde:}$$

DH: disección horizontal del relieve

S I: longitud total de la red hídrica (en km)

A: área de la superficie (en km<sup>2</sup>)

Se lograron diferenciar hasta nueve rangos de disección horizontal (<0.3; 0.3-1; 1-2; 2-3; 3-4; 4-5; 5-6; 6-7 y > 7 km/km<sup>2</sup>), los cuales fueron agrupados en cinco clases, según análisis del histograma de frecuencia, como se puede apreciar en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Clasificación de la disección horizontal

<b>Rangos (km/km<sup>2</sup>)</b>	<b>Disección Horizontal</b>
<b>DH ≤ 0.3</b>	Muy Baja
<b>0.3 « DH ≤ 1</b>	Baja
<b>1 « DH ≤ 3</b>	Media
<b>3 « DH ≤ 5</b>	Alta
<b>DH » 5</b>	Muy Alta

Cuando la Disección horizontal tiende a ser alta, indica una alta disponibilidad o captación de agua en dicha unidad de área y viceversa, teniendo en cuenta la relativa homogeneidad litológica y climática. A partir de la clasificación por rangos de la disección horizontal, es más fácil determinar cuáles subcuencas tienen un mayor aporte de agua en sus territorios y con ello promover la conservación de tales espacios.

Para conocer la densidad de drenaje contenida en cada zona funcional como unidad de área específica, se elaboró el mapa de la disección horizontal por zona funcional en Cerro Grande, a escala 1:50,000, generado del cruce de los insumos previamente creados. En este mapa se presentan 14 combinaciones provenientes de los cuatro tipos de zonas funcionales y de las cinco clases de disección horizontal. Las seis clases que no ocurren permanecen como hipótesis para el área de estudio. Se elaboraron gráficos que se muestran en el mapa e indican las relaciones entre las variables y su proporción en el territorio.

Para la realización del mapa de evaluación del potencial natural para la prestación de servicios ambientales hídricos en Cerro Grande a escala 1:50,000, fueron necesarios

los insumos de las zonas funcionales, la densidad de drenaje superficial y la cobertura vegetal. Éste último se basó en la cartografía generada previamente por Farfán (2009) sobre la Vegetación y uso de suelo de la Reserva de Manantlán a escala 1:75,000. Considerando que en la zona se localizan 11 tipos diferentes de vegetación, se agruparon en tres clases, de acuerdo a su origen, como se muestra en el Cuadro 4. El énfasis de este mapa radica en proteger las zonas con mayor potencial natural para la prestación de servicios ambientales hídricos, principalmente donde predomina la vegetación natural como bosques y selvas.

Cuadro 4. Agrupación de la vegetación existente en Cerro Grande por clases, de acuerdo a su origen o estado de conservación

<b>Tipo de Vegetación</b>	<b>Clase</b>
Bosque mesófilo de montaña	<b>Vegetación Natural</b>
Bosque de encino	
Bosque mixto de encino y pino	
Bosque mixto de pino y encino	
Bosque mixto de encino y otras latifoliadas	
Selva baja caducifolia	
Selva mediana subcaducifolia	
Matorral	<b>Vegetación Secundaria</b>
Pastizal inducido	
Agricultura de riego	<b>Vegetación Cultural</b>
Agricultura de temporal	

En este sentido, se calculó el área y porcentaje de la cobertura vegetal arbórea por cada zona hidrográfica funcional, con el fin de reconocer aquellas áreas con una masa forestal boscosa en la mayoría o todo su territorio ( $\geq 50\%$ ), para considerarlas como parte de los criterios técnicos de prelación ante el programa de servicios ambientales hidrológicos.

Se contempló en primer lugar el mayor grado de cobertura vegetal natural en su extensión territorial, correspondiendo las clases uno y dos a las zonas funcionales con una cobertura forestal del 50 al 100 %. En segundo lugar se consideraron las zonas hidrográficas funcionales, por lo que aunque las clases tres y cuatro agrupan zonas con una cubierta natural forestal de 40 a menos del 50 % de su extensión, la clase tres prioriza a las zonas de cabecera y emisión para iniciar procesos de restauración ecológica, en comparación con la clase cuatro que toma a las zonas de captación-transporte como favorables para la el aprovechamiento agrosilvícola limitado. En tercer lugar se tomó en cuenta la disección horizontal o densidad de drenaje. Las clases cinco y seis poseen coberturas naturales menores de 40%, sólo que la clase cinco da preferencia a las zonas hidrográficas funcionales de emisión o emisión-confinamiento y una disección horizontal media a muy baja, con el fin de tener un aprovechamiento agrícola y ganadero controlado en estas áreas. En cambio, la clase seis toma indistintamente las zonas funcionales y una densidad de drenaje alta a muy alta para implementar urgentemente proyectos de restauración ecológica en esos terrenos. Se calculó el total de kilómetros cuadrados (km<sup>2</sup>) por cada clase y su porcentaje ocupado para el área de estudio.

Para una información más detallada, se unieron las clases uno y dos como una sola característica (elegible), para contemplar las zonas que están potencialmente habilitadas para la prestación de servicios ambientales hídricos en Cerro Grande; las clases restantes (tres a seis) se tomaron como la otra característica excluyente (no elegible), creándose con ello un mapa práctico de elegibilidad de zonas prioritarias para la prestación de servicios ambientales hídricos. A partir de dicho insumo generado, se realizó una comparación de las zonas elegibles para la prestación de servicios

ambientales hídricos propuestas en esta investigación, con aquellas contempladas por la CONAFOR dentro del programa de PSAH en Cerro Grande (insumos generados por CONAFOR (2005, 2006, 2007, 2008 y 2009)), y proponer criterios más acertados basados en características hídricas fundamentales, como son las zonas funcionales de las cuencas y la densidad de drenaje, entre otros.

Finalmente, para definir la situación de las zonas elegibles para la prestación de SAH, se realizó una tabla comparativa a partir de la distribución de la tenencia de la tierra, para obtener información detallada del área total elegible y no elegible por cada propietario (ejidatario, indígena, privado o en conflicto) y sus respectivos porcentajes.

Con el procesamiento y análisis de toda la información obtenida (socioeconómica y biofísica), se cotejaron los mapas generados con el previo conocimiento bibliocartográfico-cultural de la zona de estudio, para poder tomar las mejores decisiones en el planteamiento y manejo de políticas económicas, sociales y ambientales de los recursos hídricos de Cerro Grande.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### IV.1. Red Hidrográfica de Cerro Grande

La delimitación de las Zonas Funcionales Hidrográficas (ZFH) del área de estudio, exigió en primer término el levantamiento detallado de la red de drenaje del territorio. En la Figura 7 se muestran los resultados obtenidos, donde además se cartografiaron las dolinas kársticas y depresiones volcánicas, por ser zonas colectoras de las aguas corrientes superficiales.

Como resultado del levantamiento de la red de drenaje, aumentaron las polilíneas en un total de 3160, adicionándose más de 68% de las líneas de drenaje ya consideradas. En cuanto a las dolinas, además de las 94 que reporta INEGI en el área de estudio, fue necesario delimitar 39 polígonos más y una depresión volcánica (encontrada como resultado de las interpretaciones de este trabajo), complementando la información generada en un 43%.

Se hace énfasis en la importancia del conocimiento espacial sobre el trabajo realizado del levantamiento completo de la red de drenaje y los sumideros existentes en Cerro Grande, ya que dicha zona se considera un excelente ejemplo de los paisajes kársticos, los cuales ocupan en conjunto el 10% de la superficie de la Tierra y se estima que albergan aproximadamente el 25% del agua necesaria para la supervivencia humana (González y Hernández, 1998). En este contexto, es preciso apoyar su conservación por el servicio ecológico que prestan las dolinas existentes, ya que son una fuente primordial para surtir de agua a la región urbana.

## RED HIDROGRÁFICA DE CERRO GRANDE, RBSM, JALISCO-COLIMA

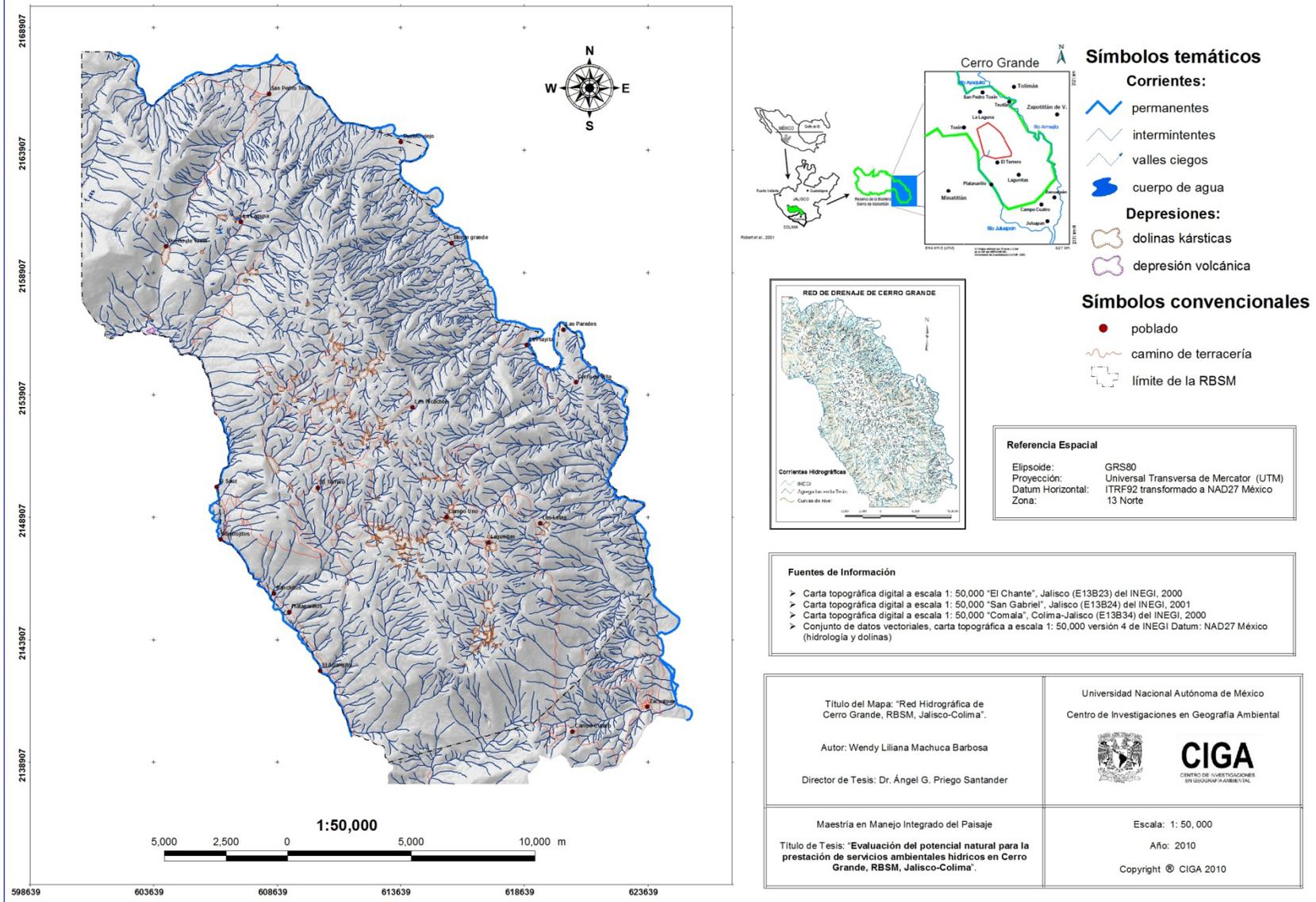


Figura 7. Red de drenaje, dolinas kársticas y depresiones volcánicas en Cerro Grande, RBSM, Jalisco-Colima.

Si los paisajes kársticos presentan hundimientos activos, se convierten en ambientes geológicos más vulnerables. Debido a factores y condiciones desfavorables, pueden dañar desde construcciones, caminos y cultivos, hasta afectar la calidad de las aguas subterráneas (cualquier acción negativa llevada a cabo en la superficie de la tierra, es transferida con todo su potencial peligroso aguas abajo, trayendo serias consecuencias de contaminación y deterioro en la calidad del agua). En este sentido, la conectividad entre los escenarios superficial y subsuperficial en un ambiente kárstico, representa la principal dificultad para resguardarlo (Parise y Pascali, 2003); sin embargo, la designación de dichos paisajes kársticos como áreas protegidas, es fundamental para conservar estos territorios degradados que satisfacen nuestras necesidades ecológicas e hidrológicas (Urich *et al.*, 2001).

Este primer mapa esclarece con mayor precisión el conocimiento sobre el relieve y las direcciones en los flujos que el agua toma en la superficie de Cerro Grande, lo que de manera indirecta lleva a suponer una relación con la disponibilidad de agua en el territorio, característica básica para considerar un cambio favorable en el uso de suelo o su extrema conservación.

Finalmente, lo que se busca es reconocer el valor del agua como un factor clave para entender la existencia de culturas del agua que se han apoyado en principios de sustentabilidad social y ambiental en el pasado y el presente (Ávila, 1996 en BM, 2007). Por ello es necesario tener en consideración las características kársticas del paisaje que limitan las formas en las cuales la tierra puede ser aprovechada o protegida (Taminskas y Marcinkevicius, 2002).

## IV.2. Subcuencas Hidrográficas

La Figura 8 ofrece los resultados del levantamiento y cartografía de las subcuencas del área de estudio. Se lograron delimitar un total de 69 subcuencas hidrográficas superficiales: 53 de ellas, con un área de 323.7986 km<sup>2</sup> (76.29%) corresponden a cuencas exorreicas, mientras que 100.6178 km<sup>2</sup> de las 16 restantes (23.71%) pertenecen a cuencas endorreicas.

Bien es sabido que la delimitación de las subcuencas está dada por la organización de los cauces, no así por las demás características del terreno (Bocco, 2004). Tales cuencas hidrográficas son definidas por los parteaguas y por tanto, especifican miles de territorios de cuenca de diferentes jerarquías (Chávez, 2004).

Es necesario señalar que en algunos casos, fue necesario generalizar varias subcuencas en una sola, debido a que la red de drenaje posible de levantar a la escala 1:50 000, no era suficiente para lograr la delimitación de las zonas funcionales y como consecuencia de ello, estas subcuencas resultarían con zonas funcionales indeterminadas, señalando la necesidad de aumentar la escala de trabajo para algunas porciones del territorio debido a su complejidad hidrográfica.

Un caso similar a éste se tiene en la investigación de Priego-Santander *et al.* (2008), donde a causa de las limitaciones de la escala, muchas pequeñas cuencas resultaron indeterminadas en cuanto a la distinción de sus zonas funcionales, porque la red de drenaje no ofrecía el detalle necesario debido a la inexistencia de curvas de nivel, siendo en algunos casos imposible separar las zonas de captación-transporte de las zonas de emisión.

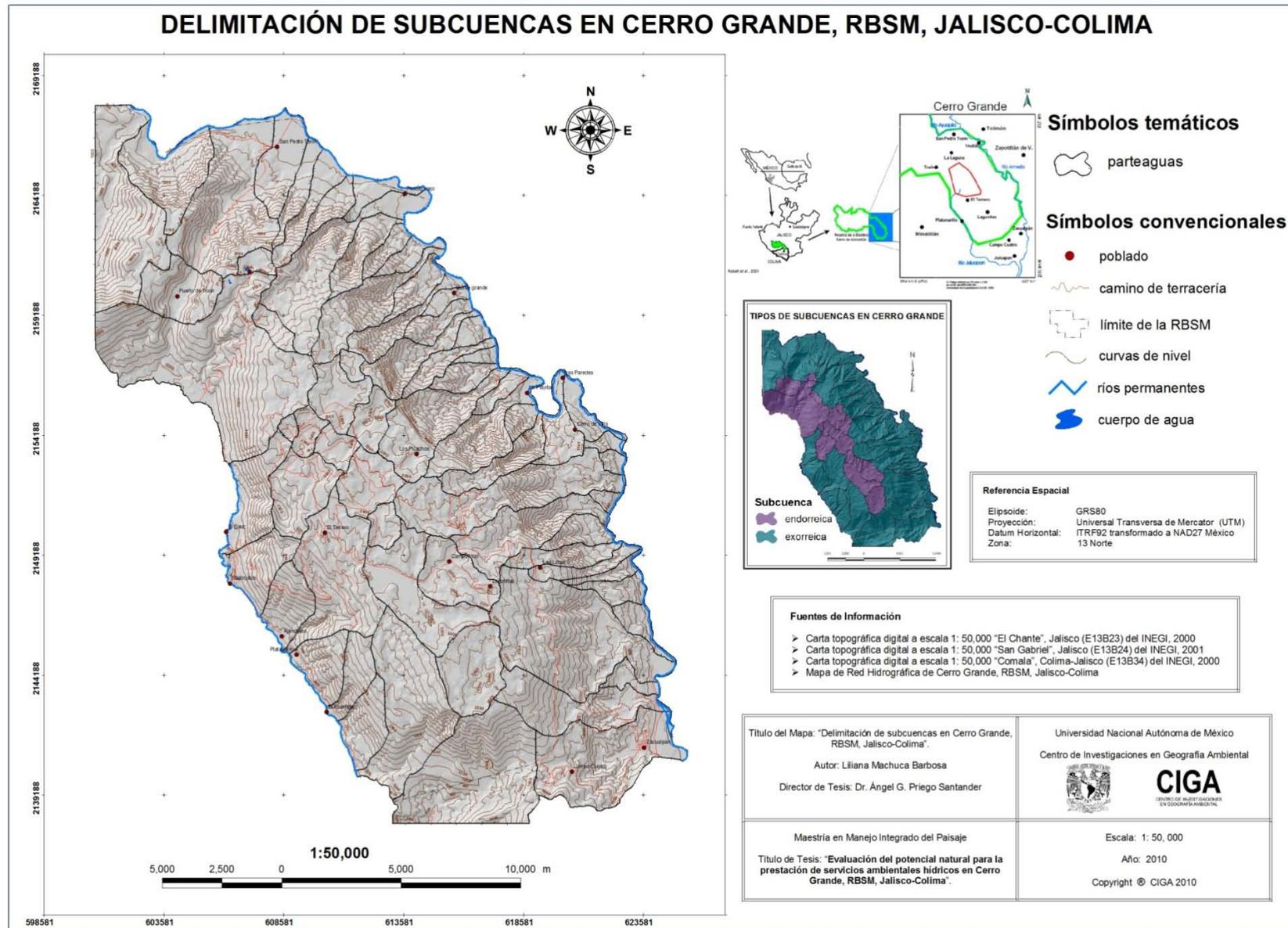


Figura 8. Delimitación de subcuencas hidrográficas superficiales en Cerro Grande, RBSM, Jalisco-Colima.

La cuenca reúne condiciones de unidad geográfica natural muy específica y propia: su carácter de independencia relativa, por sus límites naturales bien definidos, su dinámica funcional integrada, dada fundamentalmente por intercambios de sustancias y energía que vienen del clima y del agua, su principal fuente. El uso de su superficie debe ser muy bien estudiado para que las interferencias o modificaciones en su ciclo hidrológico sean mínimas, sobre todo en lo referente al proceso de infiltración (González, 2004).

Entendiendo que es en los territorios de las cuencas donde se produce la interrelación e interdependencia entre los sistemas físico-bióticos y el sistema socioeconómico formado por los usuarios de las cuencas, sean habitantes o interventores externos (PLADEYRA 2003); es preciso considerar dentro de ellas varios aspectos, como la altitud (por los cambios en precipitación y temperatura), formas del relieve y suelos, cambios de uso del suelo y su organización social y política para el manejo de recursos, a efecto de poder manejar o gestionar el recurso agua en forma eficiente en las subcuencas (Bocco, 2004).

La particularidad e importancia estratégica de la cuenca hidrológica superficial, radica fundamentalmente en que es reconocida como la unidad territorial más adecuada para la gestión integrada de los recursos hídricos; por lo que funciona como unidad de planificación donde se concretan las políticas de desarrollo socioeconómico y medioambiental (González, 2004). Sin embargo, dado que la división político administrativa no coincide con los límites territoriales de las cuencas, la mayoría de las decisiones que afectan el ciclo hidrológico y el aprovechamiento del agua, no consideran las interrelaciones que ocurren en la totalidad de este sistema integrado (Dourojeanni *et al.*, 2002), por lo que si no aceptan la necesidad de coordinarse para

administrar estos espacios compartidos, seguirán siendo meros obstáculos (Dourojeanni, 2004).

En general, el enfoque de cuencas es lo que este mapa de Subcuencas de Cerro Grande pretende fortalecer, ya que a través de ellas se puede estudiar y evaluar aquellos procesos biogeoquímicos vinculados a la regulación hidrológica, y además, entender la relación entre los impactos de las actividades humanas y sus efectos en los procesos ecosistémicos (Fregoso, 2006).

En el territorio predominan claramente las subcuencas exorreicas, como se puede apreciar en el esquema correspondiente al interior de la Figura 8. No obstante, es importante destacar que la zona cumbral de Cerro Grande está en su inmensa mayoría ocupada por subcuencas endorreicas que drenan casi todas hacia dolinas existentes en la meseta central, lo cual es debido a la naturaleza kárstica del área, formada en gran parte por rocas calizas intensamente karstificadas.

Como peculiaridad del karst en Cerro Grande, se puede señalar que la zona cumbral, a diferencia de las laderas del cerro, está cubierta por potentes espesores de cenizas volcánicas, al parecer provenientes de edificios cercanos hoy inactivos, pero que han dado como resultado un karst cubierto, acelerando quizás los procesos de disolución, debido a la naturaleza ácida de los depósitos de caída.

Esto ha condicionado entre otras cosas, la fuerte escasez de agua superficial en la zona cumbral, ya que la inmensa mayoría se infiltra, y se convierte al unísono en un factor que aumenta la fragilidad hidro-ecológica del área, pues actúa al mismo tiempo en dos direcciones: por una parte la presencia de las cenizas volcánicas ha generado en la formación de suelos peculiares y poco comunes como los Andosoles hapli-calcáricos, los cuales según opinión de la población local, son excelentes para el desarrollo de las

actividades agropecuarias y forestales, pero al mismo tiempo, este desarrollo agrícola (aunque sea de agricultura tradicional) aumenta la demanda y el consumo de agua, y por otro, la presencia de estas cenizas acelera los procesos de disolución kárstica, debido a la fuerte acidez de su composición químico-mineralógica.

Estos resultados obtenidos del análisis visual y en campo sobre el relieve de Cerro Grande, constatan el conocimiento previo sobre sus resumideros, también llamados dolinas, por medio de los cuales el agua de lluvia escurre y resurge en grandes manantiales en la parte baja de la montaña: el de La Taza, en San Pedro Toxín, Agua Fría en Campo Cuatro y el Cóbano en la comunidad indígena de Zacualpan; de ésta última resurgencia, el agua es llevada hacia la ciudad de Colima y Villa de Álvarez a razón de mil metros cúbicos por segundo, proveyéndoles de 80% del recurso hídrico que requieren (México Forestal, 2010).

Ante la inexistencia de ojos de agua en la montaña, la única forma que tenían los habitantes de obtener el recurso, previo a la declaración de la Reserva de la Biósfera, era extraer madera para intercambiarla por agua (Jardel, 1998).

En la actualidad lo que se busca es almacenarla a partir de ollas de captación de agua de lluvia en sitios estratégicos (México Forestal, 2010), además de una mayor implementación de otras técnicas agrosilvícolas de retención de suelos y agua, como las zanjas trinchera, anillos de captación, jagüeyes, bordos, terrazas, parcelas agroforestales, barreras vivas y represas realizadas en trabajos previos de implementación de PSAH o de manejo de cuencas (PASOLAC, 2006; Paré *et al.*, 2008).

Por tales razones, resulta claro e irónico que a pesar de que Cerro Grande sea la principal zona proveedora de agua de la capital del estado de Colima, no lo hace para

sí misma, porque las dolinas por donde se escurre el agua no permiten el almacenamiento del vital líquido para los habitantes del macizo kárstico. Esta condición es reafirmada por Caire (2004), la cual plantea que la conformación propia de la cuenca y sus recursos naturales, crean una relación lógica de desigualdad en el acceso y disponibilidad del agua entre las partes altas y bajas, lo que se manifiesta principalmente en los problemas de distribución del líquido y en la necesidad urgente de establecer mecanismos de corresponsabilidad en el aprovechamiento eficiente del mismo.

Por ello, desde una perspectiva de cuenca se busca promover la valoración de la población de la sierra, por el papel que juega en la conservación de su territorio y, como única manera de garantizar el abastecimiento de agua para las futuras generaciones, tanto del campo como de la ciudad (CODESUVER, 2005). Concebida así como unidad de gestión, la cuenca es un instrumento para la negociación entre sus partes, proveedores y usuarios de la cuenca alta, media y baja, y un escenario clave dentro de su contexto más amplio (GAIA, 2005).

Además de ser los territorios donde se verifica el ciclo hidrológico, las cuencas son espacios geográficos donde las comunidades comparten identidades, tradiciones y cultura, y en donde los seres humanos socializan y trabajan en función de su disponibilidad de recursos renovables y no renovables. En las cuencas, la naturaleza obliga a reconocer necesidades, problemas, situaciones y riesgos hídricos comunes, por lo que en este espacio se deben definir en consenso las prioridades, objetivos y metas que permitan la corresponsabilidad y solidaridad en el cuidado y preservación de los recursos naturales (Morales y Rodríguez, 2007).

En síntesis, como consideran Cotler y Priego (2004), las cuencas hídricas constituyen un marco apropiado para el análisis de los procesos ambientales generados como consecuencia de las decisiones en materia de uso y manejo de los recursos suelo, agua y vegetación. Asimismo, la delimitación de subcuencas en Cerro Grande es necesaria para obtener una caracterización adecuada de las zonas funcionales hidrográficas (cabecera, captación-transporte, emisión y emisión-confinamiento), lo cual es esencial para comprender la dinámica del uso del suelo en las cuencas hidrográficas.

### **IV.3. Zonas Funcionales Hidrográficas**

La Figura 9 ofrece la cartografía de la delimitación de las Zonas Funcionales Hidrográficas, esto es, la definición espacial de zonas de cabecera, captación-transporte y emisión de las cuencas superficiales. Adicionalmente, algunas zonas de emisión se clasificaron como de “emisión-confinamiento”, para destacar el carácter endorreico de estas subcuencas, que no drenan a un sistema superficial adyacente, sino, al interior del macizo kárstico.

Como se puede apreciar, predominan ampliamente las zonas de cabecera y captación-transporte, pues entre ambas abarcan 94 % del territorio (aproximadamente 400 km<sup>2</sup>), mientras que las zonas de emisión y emisión-confinamiento solo cubren algo más de 25 km<sup>2</sup> (6 % del territorio aproximadamente).

Las zonas de cabecera ocupan las áreas hipsométricamente más altas del territorio, correspondiendo con los complejos cumbrales y los parteaguas secundarios. Por su parte, la zona de captación-transporte abarca los complejos de laderas y barrancos, caracterizados por la fuerte inclinación de las pendientes. Las zonas de emisión se

distribuyen exclusivamente en los límites del área, coincidiendo con la frontera del macizo kárstico en los valles de los ríos Armería y Juluapan, mientras que las zonas de emisión-confinamiento se pueden encontrar en la meseta central del cerro y su disposición espacial es “atomizada”, es decir, muy fragmentada en polígonos relativamente pequeños, de acuerdo a la distribución de las dolinas.

La fuerte desproporción espacial entre las áreas de cabecera y captación-transporte, en relación con las áreas de emisión y emisión-confinamiento (ver Cuadro 5), manifiesta la alta energía del relieve del territorio, tratándose de paisajes muy fuertemente diseccionados, tanto vertical como horizontalmente, esto es, morfométricamente deben predominar las montañas y lomeríos y la densidad de drenaje debe ser muy elevada, lo cual denota relevancia para la prestación de servicios ambientales hídricos.

Cuadro 5. Distribución superficial de las Zonas Funcionales Hidrográficas en Cerro Grande, RBSM, Jalisco-Colima.

Zona Funcional Hidrográfica	Área	
	km <sup>2</sup>	%
Cabecera	196.96	46
Captación-Transporte	201.79	48
Emisión	21.59	5
Emisión-Confinamiento	4.06	1
<b>Total</b>	<b>424.41</b>	<b>100</b>

Además, lo restringido de las zonas de emisión y emisión-cofinamiento, así como la particular distribución de las zonas de emisión-confinamiento en la parte más alta del macizo, sugieren la presencia de un acuífero anisotrópico (en congruencia con el predominio de rocas carbonatadas), lo cual revela una elevada fragilidad en el funcionamiento hidroecológico.

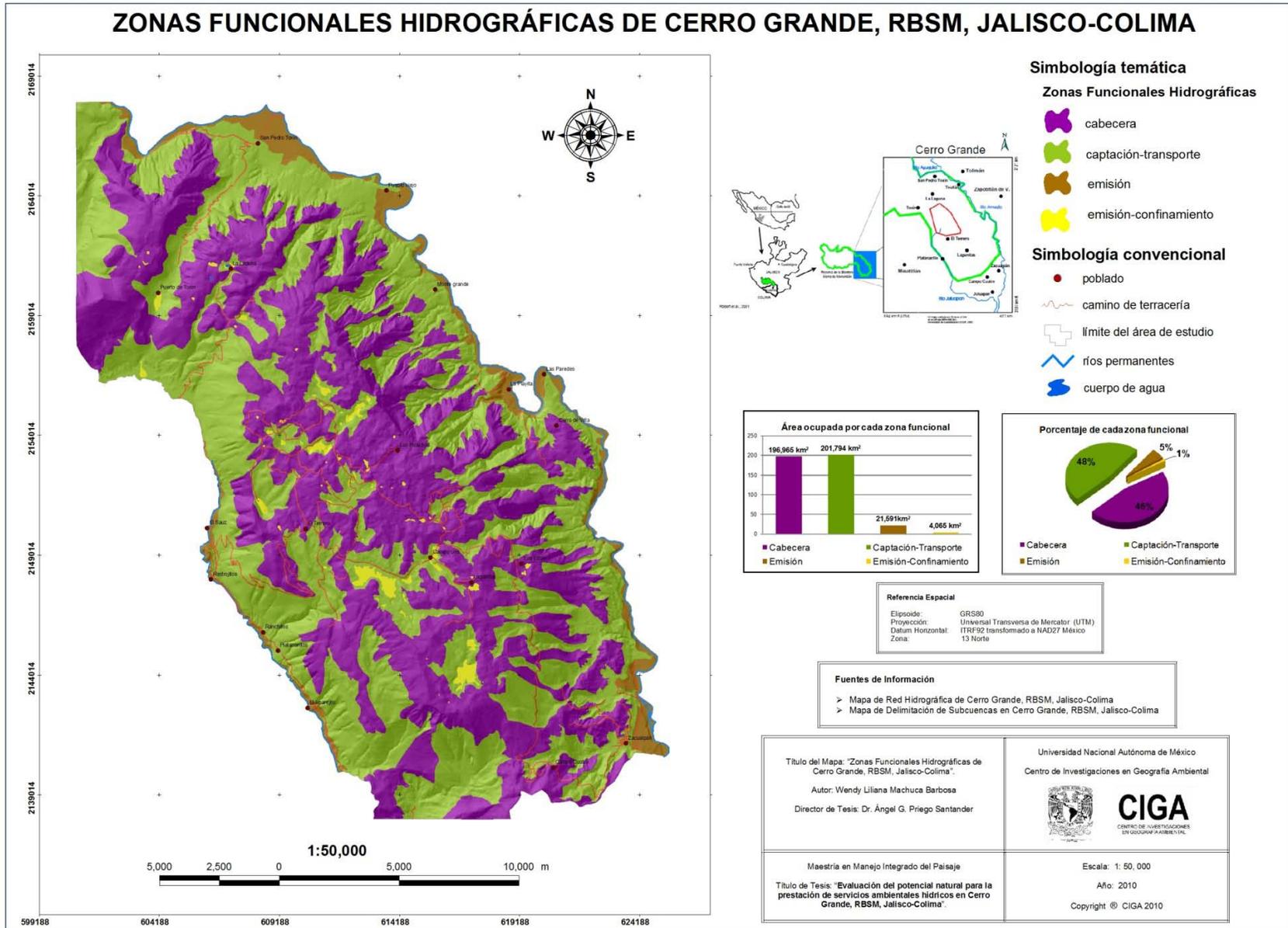


Figura 9. Zonificación Funcional Hidrográfica del Cerro Grande de Manantlán, RBSM, Jalisco-Colima.

Como se menciona en el trabajo de Cotler y Priego (2004), la distribución de las Zonas Funcionales de una cuenca nos permite inferir el valor de cada una de ellas para la obtención de Servicios Ambientales, tales como la recarga de agua. Cada una de estas zonas juega un papel específico en el funcionamiento hidro-ecológico de la cuenca y presenta un grado de fragilidad diferente.

Todas las Zonas Funcionales Hídricas son de vital importancia para el buen funcionamiento de la cuenca; sin embargo, en Cerro Grande es menester priorizar la conservación de aquellas que se consideran con mayor fragilidad hidrológica: la zona de Cabecera, por ser la primera captadora de las aguas pluviales, y la zona de Emisión, por llevar toda el agua recaudada de las corrientes de las subcuencas al torrente principal, en este caso, de los ríos Armería en la vertiente oriental y Juluapan en la poniente. Igualmente significativa es la zona de Emisión-Confinamiento, por los resumideros que concentran el agua hacia el interior del macizo kárstico.

#### **IV.4. Disección Horizontal del Relieve**

La Figura 10 ofrece la información sobre la densidad de drenaje superficial del territorio y en el Cuadro 6 aparece la distribución por clases.

Como se puede apreciar en la Figura 10, predominan ampliamente las superficies con Alta, Muy Alta y Media densidad de drenaje, las cuales ocupan más de 98 % del área de estudio. Además, se observa una zonificación muy peculiar; en la macrovertiente de exposición Este, coincidiendo con la mayor inclinación de las pendientes, estas clases ocupan la casi totalidad del territorio, mientras que en la macrovertiente de exposición Oeste, el predominio espacial es de las clases Media y Alta.

Cuadro 6. Distribución en clases de la disección horizontal del relieve en el Cerro Grande de Manantlán, RBSM, Jalisco-Colima.

Densidad de Drenaje	Disección Horizontal (DH) (km/km <sup>2</sup> )	Área	
		km <sup>2</sup>	%
Muy Baja	DH ≤ 0.30	0.466	0.11
Baja	0.31 < DH < 1.00	1.211	0.28
Media	1.01 < DH < 3.00	66.801	15.74
Alta	3.01 < DH < 5.00	252.970	59.61
Muy Alta	DH ≥ 5.01	102.968	24.26
<b>Total</b>		<b>424.4166</b>	<b>100</b>

En contraste con lo anterior, las categorías de Baja y Muy Baja densidad de drenaje aparecen dispersas y principalmente en áreas de la meseta central, ocupando entre ambas menos de 2 % del territorio.

Considerando que la clase de Media disección horizontal se refiere a superficies que poseen 1-3 km/km<sup>2</sup> de densidad de drenaje, se puede inferir que estamos en presencia de un área con fuerte potencial erosivo por escurrimiento superficial, a pesar de la naturaleza intensamente karsificada del Cerro Grande de Manantlán.

Como afirman Cotler y Priego (2004), las formas del relieve, a pesar de estar condicionadas por el clima, constituyen los componentes más estables del paisaje, en comparación con los más dinámicos, como la cobertura vegetal.

El grado de intercepción de escorrentías en una cuenca está determinado por una serie de condicionantes ambientales, como la calidad de la vegetación natural, los suelos, la pendiente, la precipitación y la captación de agua. Cuando la capacidad de infiltración es excedida por el clima, la topografía misma y la calidad de la vegetación, se van generando los escurrimientos superficiales y sub-superficiales (Boege, 2008).

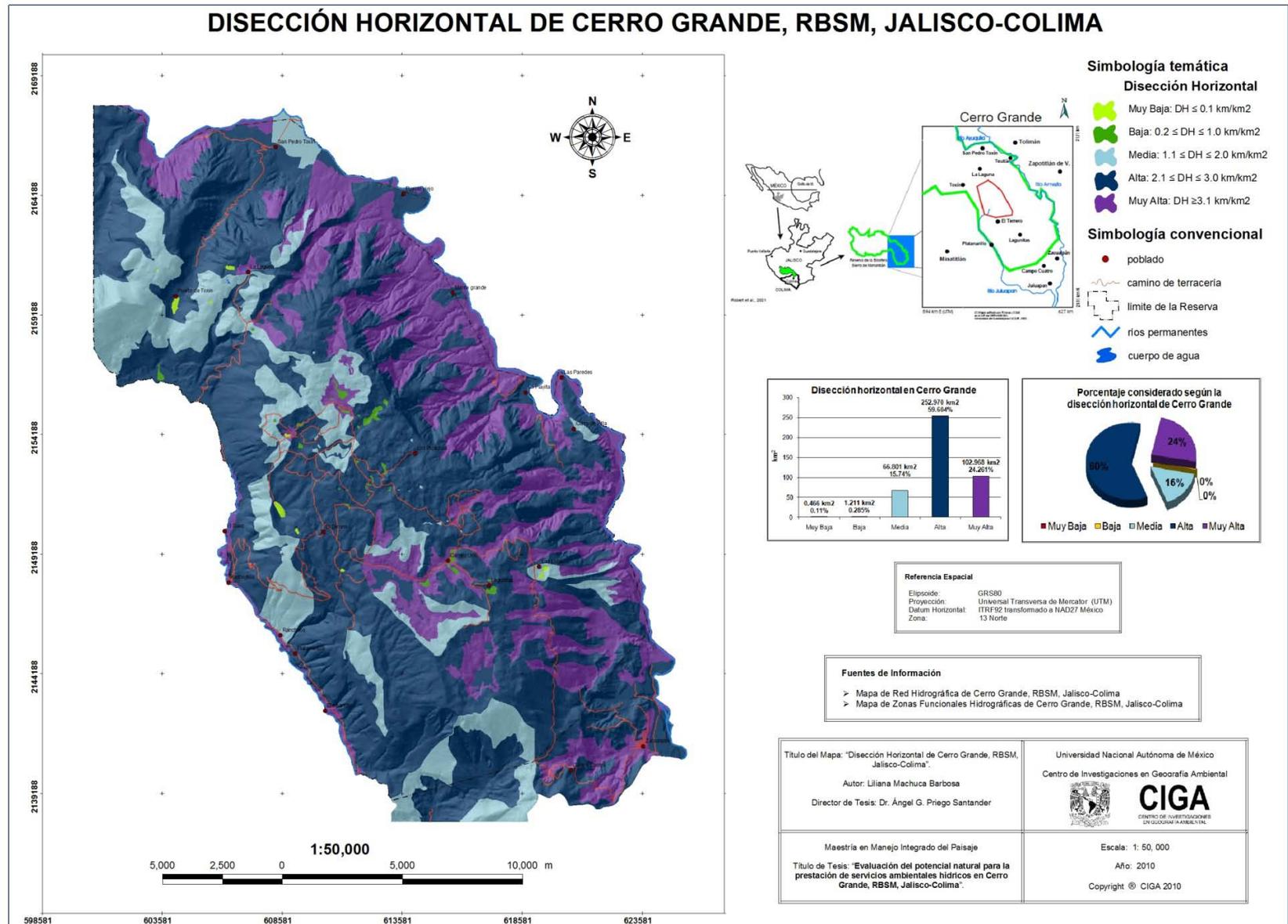


Figura 10. Disección horizontal del relieve en Cerro Grande, RBSM, Jalisco-Colima.

La montaña de Cerro Grande al ser de origen kárstico, es influenciada por diversos factores biogénicos que promueven el desarrollo del karst, tal como la vegetación. Las zonas boscosas, como menciona Mateo (1981), impiden el escurrimiento rápido del agua, implicando una menor evaporación del suelo y una mayor infiltración, lo que se refleja en un aporte extra de agua, además de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}^+$  y otros agentes. Al mismo tiempo, las raíces de muchos árboles penetran en las grietas, ensanchándolas por acción mecánica y proporcionando vías accesibles al agua de lluvia, constituyendo zonas de fuerte intensidad de la disolución (debido a los agresivos agentes suministrados por el sistema radicular) que favorecen el desarrollo kárstico.

La infiltración depende de las condiciones del suelo y su capacidad de retención y absorción: si la cubierta vegetal es buena, los suelos tienen suficiente porosidad para poder generar de manera óptima la infiltración. Por tales razones, la calidad de captación de agua depende del carácter montañoso e inclinación de las laderas, así como de la cubierta vegetal (Boege, 2008).

En este sentido, lo que refleja principalmente la densidad de drenaje o disección horizontal, es el grado de erosión que presenta el relieve. En consecuencia, como se afirma en el trabajo de PLADEYRA (2003), a medida que se agudiza la densidad de drenaje, también se pierde la estabilidad del ciclo hidrológico en esta fase, dando como resultado una mayor fragilidad en las zonas más diseccionadas.

Para el caso de Cerro Grande, a pesar de que la mayoría del territorio posee una alta y muy alta disección horizontal (principalmente en la vertiente oriental), que podría indicarnos una elevada disponibilidad de agua; el hecho de ser kárstico, le confiere una mayor fragilidad hidrológica, provocada por la fuerza erosiva del agua hacia el relieve,

la cual acelera los procesos de disolución de la roca y desestabiliza los flujos superficiales.

#### IV.5. Densidad de Drenaje por Zonas Funcionales Hidrográficas

Al evaluar la distribución de la densidad de drenaje por Zonas Funcionales Hidrográficas, se puede apreciar el amplio predominio de elevados valores de disección horizontal en todo el territorio, lo cual señala la importancia de la protección de estos paisajes, debido al fuerte potencial erosivo natural de los mismos por escurrimiento superficial.

El Cuadro 7 presenta la distribución superficial de la disección horizontal por Zonas Funcionales. Como es notable, en todas las zonas funcionales predominan ampliamente las densidades de drenaje de Media a Muy Alta.

Cuadro 7. Distribución superficial de la densidad de drenaje por zonas funcionales hidrográficas.

Zonas Funcionales Hidrográficas	Densidad de Drenaje (km/km <sup>2</sup> )									
	Muy Baja		Baja		Media		Alta		Muy Alta	
	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%
Cabecera	0	0	0	0	60.05	14.15	132.88	31.31	4.03	0.95
Captación- Transporte	0	0	0	0	3.55	0.84	112.17	26.43	86.08	20.28
Emisión	0	0	0	0	2.77	0.65	6.012	1.42	12.80	3.01
Emisión- Confinamiento	0.47	0.11	1.21	0.28	0.42	0.10	1.90	0.45	0.06	0.01

Nota: Algunos valores totales pueden no ser exactos debido al redondeo. Superficies absolutas y relativas referidas al área total de estudio.

Conforme se observa en la Figura 11, en las zonas de cabecera predomina la Alta disección horizontal del relieve y en segundo término, la clase Media. Resulta

significativo que a pesar de ocupar los complejos cumbrales y por ende, con relativamente escasa superficie para el desarrollo de la red de drenaje, las zonas de cabecera presenten tan elevados valores de densidad de drenaje superficial.

Según Casillas (2004), en las zonas de captación de los acuíferos se presentan simultáneamente diversos factores adversos que promueven la erosión: deforestación, precipitaciones intensas de corta duración, suelos frágiles, topografía accidentada, agricultura de laderas con cultivos en surcos y sobrepastoreo, que propician escurrimientos sin control, los cuales desequilibran el sistema fluvial y provocan un fuerte proceso de erosión en los cauces, con el consecuente azolvamiento de la infraestructura hidroagrícola construida.

Así, los procesos de erosión hídrica superficial son dominantes en la zona de cabecera, donde el cambio del uso de suelo en fuertes pendientes, aumenta la susceptibilidad del suelo ante el impacto de las gotas de lluvia.

Un ejemplo similar de degradación se presenta en la cuenca del río Lerma, donde el azolvamiento de las presas, originado en gran parte por el intenso cambio de uso del suelo y los procesos de erosión hídrica en su zona de cabecera y de captación, coadyuvaron a los desbordamientos de varios ríos (Cotler y Priego, 2004).

Por otro lado, el desarrollo de procesos erosivos con tan elevados valores de disección horizontal, puede propiciar la colmatación de las líneas de drenaje situadas aguas abajo y actuar como catalizador del sellaje superficial de los sistemas de sumideros existentes en las dolinas del área de estudio.

# DISECCIÓN HORIZONTAL POR ZONA HIDROGRÁFICA FUNCIONAL EN CERRO GRANDE, RBSM, JALISCO-COLIMA

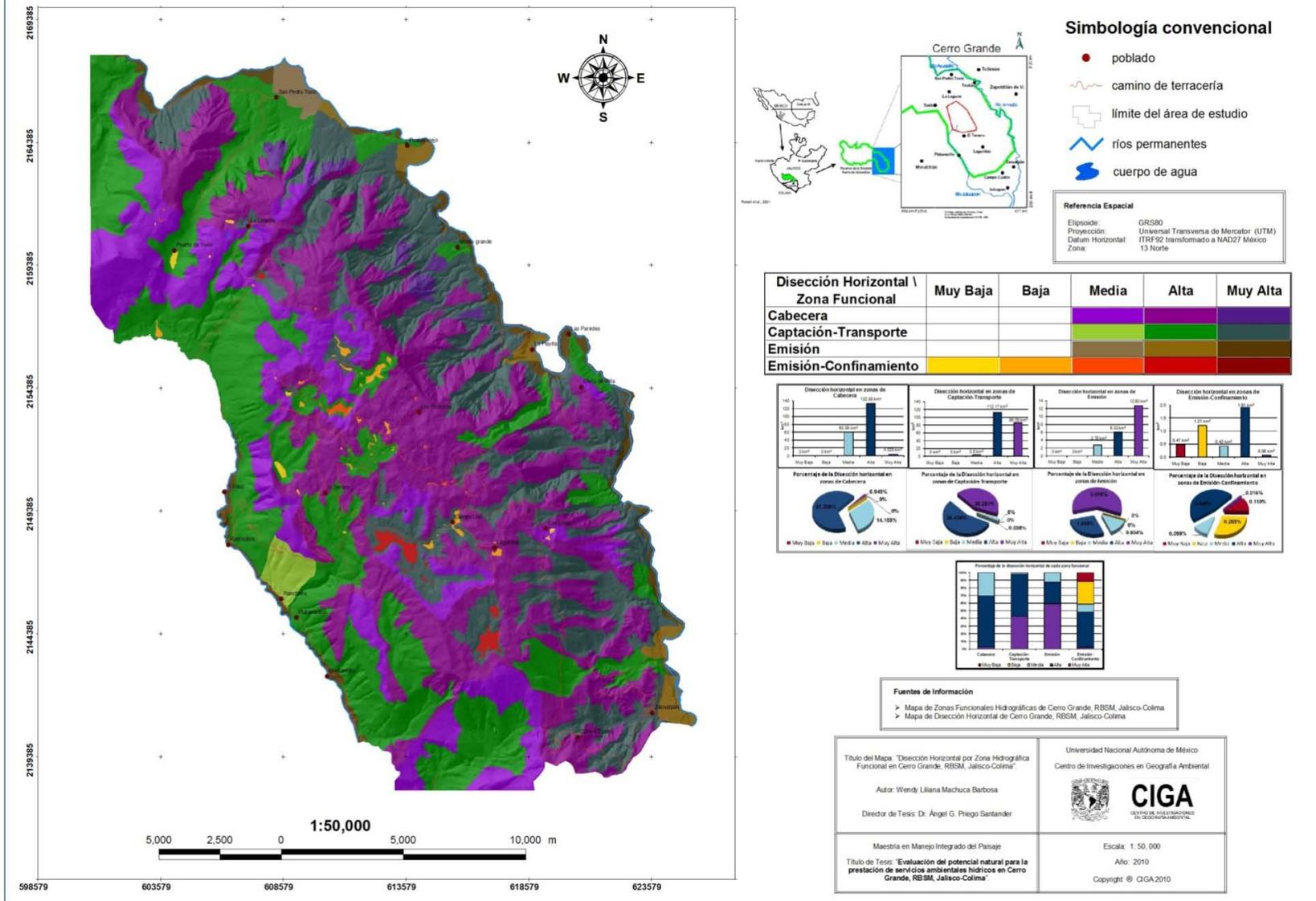


Figura 11. Disección horizontal del relieve por zonas hidrográficas en Cerro Grande, RBSM, Jalisco-Colima.

Lo anterior señala una prioridad a la conservación de la cubierta vegetal en esta zona, pues posibles alteraciones pondrían en riesgo la función hidrográfica fundamental de estas áreas, que es, garantizar el escurrimiento subsuperficial hacia las zonas adyacentes en la época de estiaje.

En las zonas de captación-transporte se observa una clara dominancia espacial de las clases Alta y muy Alta de disección horizontal. Ello significa que en la mayoría de las mismas encontramos más de 3 km de red de drenaje por km<sup>2</sup> (el cual puede incrementarse hasta más de 5 km/km<sup>2</sup>). Se trata de valores muy elevados, considerando el amplio predominio de las rocas carbonatadas y la intensidad de los procesos kársticos en el área.

Como su nombre lo indica, las funciones básicas de estas zonas son captar y transportar el recurso hídrico hacia la zona de emisión. Esta área, además, recibe todo el escurrimiento superficial y subsuperficial de la zona de cabecera. Como se aprecia en el Cuadro 7 y en la Figura 11, más de 47 % del territorio estudiado se encuentra en dicha zona y casi la totalidad posee densidad de drenaje Alta o muy Alta.

Siendo la unidad funcional con la mayor cantidad de cauces bien definidos y con fuertes pendientes, aumenta la probabilidad de que se presenten procesos de ladera como derrumbes, deslizamientos de bloques, soliflucción, etc., producto del intemperismo (PLADEYRA, 2003). Esto significa que es necesario prestar especial atención al manejo de esta zona funcional, pues su potencial erosivo es muy elevado, siendo al unísono, la zona de mayor superficie espacial.

De acuerdo con los criterios de Bocco *et al.* (2010) y al menos considerando la disección horizontal del relieve, estas áreas no poseen potencial para el desarrollo de actividades productivas o éste es muy limitado. Ello indica entonces la necesidad de

establecer políticas de manejo que garanticen la conservación del paisaje, sobre todo, la protección de las líneas de drenaje superficial, en aras de evitar la proliferación de procesos erosivos que pongan en riesgo el recurso agua.

La zona de emisión, referida a las subcuencas exorreicas, posee más de la mitad de su área total en la clase de Muy Alta disección horizontal del relieve. El hecho de que esta zona funcional observe este comportamiento poco común (ver PLADEYRA 2003), nuevamente señala la elevada fragilidad hidrográfica del territorio, pues la zona de emisión es típica de escasa densidad de drenaje.

La escasa densidad de drenaje en la zona de emisión debería manifestarse, ya que a medida que el ángulo de las pendientes va disminuyendo hacia dicha zona, el proceso de erosión hídrica superficial también disminuye (Cotler y Priego, 2004).

En esta área aflora el escurrimiento subsuperficial de las subcuencas para unirse al superficial, siendo el territorio hipsométricamente más bajo de los sistemas hidrográficos y por ende, ya con muy escasa energía del relieve, que se supone no ofrece oportunidades para el desarrollo de la red de drenaje. Una explicación de esto pudiera estar en el carácter kárstico del territorio, que condiciona que gran parte de las aguas corrientes se infiltren, para después aflorar en esta zona.

La zona de emisión-confinamiento, referida en esta investigación a las cuencas endorreicas que drenan a dolinas de la meseta central, observa un comportamiento más proporcional de la densidad de drenaje, como puede apreciarse en el Cuadro 7, siendo la única zona funcional que posee todas las clases de disección horizontal y donde la categoría Muy Alta posee poca importancia espacial.

Es destacable el papel de las dolinas en el funcionamiento hidrográfico del Cerro Grande de Manantlán, pues en ellas se encuentran los sumideros que sirven de

colectores para parte importante del recurso agua que posteriormente aflora en las zonas de emisión situadas en el área de la sima del macizo.

Durante el trabajo de campo, se pudo comprobar que algunas dolinas han sido asimiladas para la actividad agropecuaria, estando actualmente desprotegidos los sumideros de la cobertura forestal (ver Anexo 2). Esta situación puede ser preocupante, porque la no existencia de cobertura boscosa en los límites de los sumideros puede modificar la dinámica hídrica local.

En general, los aportes del mapa de disección horizontal por zonas funcionales hidrográficas nos permiten determinar con mayor eficacia las zonas que, por sus características físico-geográficas, indican una mayor o menor acumulación de aguas superficiales, lo que da una idea más clara de la disponibilidad natural que existe sobre el recurso hídrico en las subcuencas hidrográficas que conforman a Cerro Grande.

En este sentido, como la disponibilidad natural es la medida de la cantidad de agua que el sistema natural en cada cuenca o espacio geográfico puede almacenar cada año (Morales y Rodríguez, 2007); tal disponibilidad superficial del recurso hídrico, permite apoyar la localización y adecuada implementación de obras hidrotécnicas como riego ó presas (Toledo y Solís, 2001; Reygadas y Zarco, 2005; PASOLAC, 2006; Paré *et al.*, 2008 ), además de establecer más adecuadamente los límites de extracción de aguas superficiales para las distintas actividades humanas (PLADEYRA, 2003) que se realizan en la cuenca.

## IV.6. Potencial Natural para la Prestación de Servicios Ambientales Hídricos

La evaluación del potencial natural para la prestación de servicios ambientales hídricos se realizó sobre la base de los criterios de CONAFOR (DOF, 2009), introduciendo un solo cambio, correspondiente a la unidad básica sujeto de evaluación, pues en vez de predios, se evaluaron las Zonas Funcionales Hidrográficas. El Cuadro 8 y la Figura 12 presentan los resultados del proceso de evaluación, donde además se incluyeron algunas recomendaciones que pueden contribuir a la toma de decisiones.

Cuadro 8. Evaluación del potencial natural para la prestación de servicios ambientales hídricos en Cerro Grande, RBSM, Jalisco-Colima.

Potencial	Símbolo	Área		Observaciones y Recomendaciones
		km <sup>2</sup>	%	
Muy Alto	1	359.02	93.56	Zonas funcionales hidrográficas indistintas con 71-100% de cobertura vegetal natural de bosques y/o selvas.
Alto	2	15.08	3.93	Zonas funcionales hidrográficas indistintas, con 50-70% de cobertura vegetal natural de bosques y/o selvas. Iniciar procesos de restauración ecológica en 10-20% del área para garantizar permanencia en condiciones de elegibilidad.
Medio	3	1.67	0.42	Zonas funcionales hidrográficas de emisión y emisión-confinamiento con 40-49% de cobertura vegetal natural de bosques y/o selvas. Iniciar procesos de restauración ecológica en 20-25% del área para garantizar incorporación a condiciones de elegibilidad.
	4	1.15	0.30	Zonas funcionales hidrográficas de captación-transporte con 40-49% de cobertura vegetal natural de bosques y/o selvas. Favorable con limitaciones para la agricultura tradicional y la ganadería muy controlada y de mínima densidad. Se sugieren técnicas antierosivas y mantener la cobertura de vegetación ribereña. Iniciar procesos de restauración en 10-15 % del área para garantizar incorporación a condiciones de elegibilidad.
Bajo	5	2.80	0.73	Zonas funcionales hidrográficas de emisión o emisión-confinamiento, con 0-39% de cobertura vegetal natural de bosques y/o selvas, y densidad de drenaje de media a muy baja. Favorable para el aprovechamiento en la agricultura tradicional y la ganadería controlada y de baja densidad. Se sugiere mantener la cobertura de vegetación ribereña.
Muy Bajo	6	4.08	1.06	Zonas funcionales hidrográficas indistintas, con 0-39% de cobertura vegetal natural boscosa, y densidad de drenaje de alta a muy alta. Necesario implementar proyectos de restauración ecológica de inmediato.

# POTENCIAL NATURAL PARA LA PRESTACIÓN DE SERVICIOS AMBIENTALES HÍDRICOS EN CERRO GRANDE, RBSM, JALISCO-COLIMA

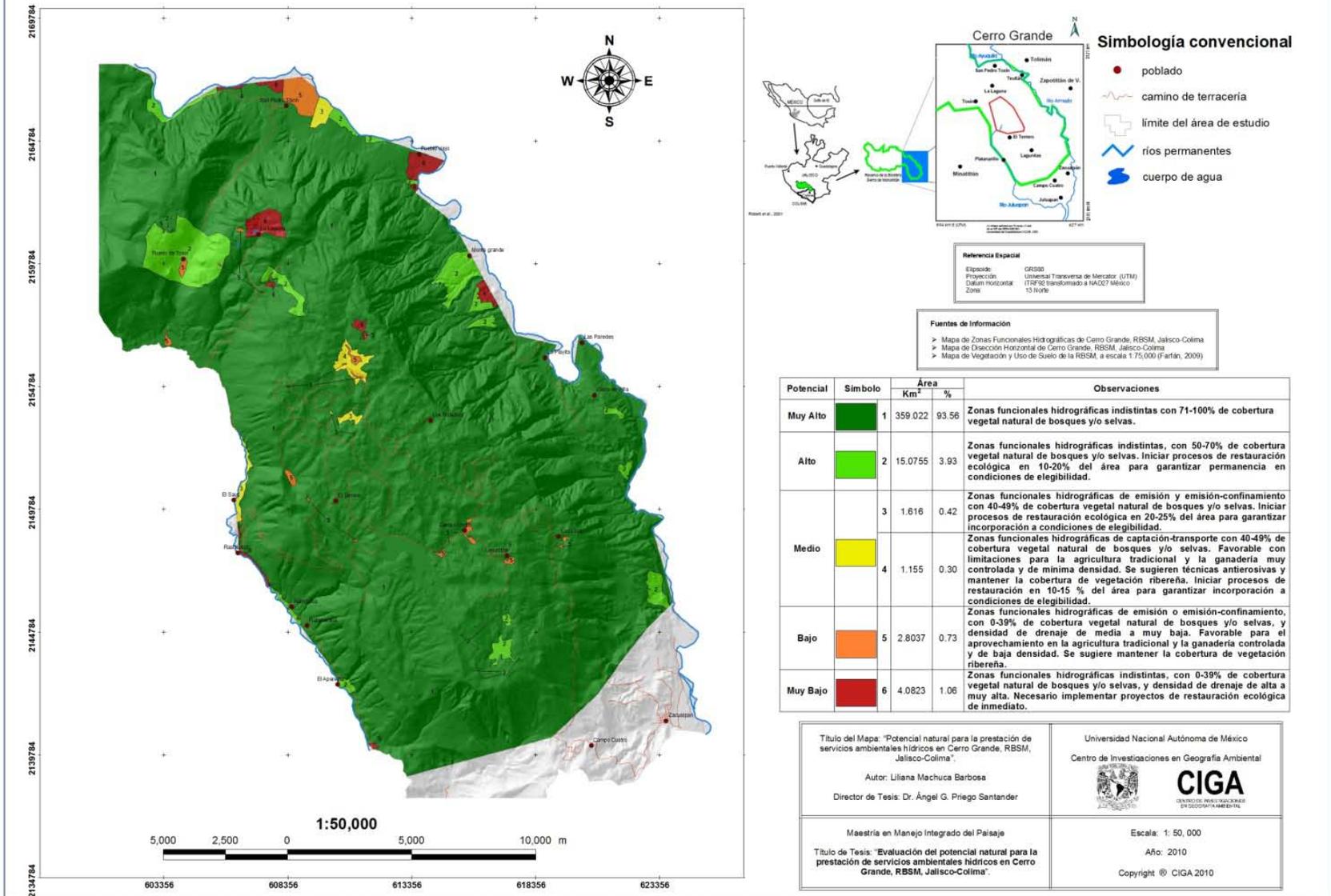


Figura 12. Evaluación del Potencial Natural para la prestación de Servicios Ambientales Hídricos en Cerro Grande, RBSM, Jalisco-Colima.

En Cerro Grande, así como en otros análisis similares de cuencas (PLADEYRA, 2000; 2003; Priego *et al.*, 2008), la evaluación del potencial para la protección hídrica del territorio pretende definir un esquema inicial de áreas prioritarias para la protección de los recursos hídricos, tomando en cuenta las funciones de sus diferentes zonas hidrográficas, para analizar la factibilidad de cumplir con su desempeño hidrológico, según el uso actual que presentan. Sin embargo, al estar estrechamente relacionadas al buen funcionamiento hidrológico de la cuenca, las zonas funcionales no pueden jerarquizarse en importancia (Gopar, 2008).

En este sentido, se priorizó la caracterización del estado actual de las coberturas vegetales y del uso de suelo en Cerro Grande, que como mencionan Medina *et al.* (2008), son un indicador clave para cuantificar el capital natural de un territorio y planificar su desarrollo. Así, la calidad de la captación de agua, la infiltración, la evapotranspiración y los escurrimientos superficiales y sub-superficiales, dependerán de la integridad de los ecosistemas naturales y de la calidad de la cubierta vegetal, según Boege (2008).

En razón de los argumentos anteriores, se consideró con Muy Alto potencial a aquellas zonas funcionales que poseen más de 70 % de área cubierta por selvas o bosques (como las que se muestran en las estaciones 9 y 10 del anexo 2). Éstas se distribuyen indistintamente por todo el territorio, ocupando casi 400 km<sup>2</sup>, equivalentes a más de 93 % del mismo y tienen la mayor prioridad para su conservación, debido a que sus características hidrográficas son las más favorables y las hacen elegibles para la prestación de Servicios Ambientales Hídricos (SAH) en el territorio. Destaca en estas áreas, parte importante de la meseta (complejo cumbral), donde el clima es más húmedo (mayor precipitación y menor temperatura y por lo tanto menor

evapotranspiración potencial), los suelos ricos en materia orgánica almacenan más agua y son más húmedos y predominan geofformas cóncavas; teóricamente es el área con mayor infiltración, la que alimenta los manantiales de la base del Cerro Grande. En las laderas el drenaje superficial es proporcionalmente alto por la fuerte pendiente, los suelos son someros (Leptosoles réndzicos) y retienen poca humedad y el clima es más seco (menor precipitación y temperaturas más altas).

Por ello, coincidiendo con las propuestas de Travieso (2005) y GESG (2005), y a pesar de que las condiciones físico-geográficas entre las áreas de estudio sean muy distintas, las zonas de Cabecera de las cuencas hidrográficas, gran parte del cauce de las corrientes permanentes, así como las laderas medias y altas, al ser relevantes en la captación y provisión de agua, se debe promover su conservación y considerarse como las zonas de mayor importancia para la protección del potencial hídrico en Cerro Grande.

De acuerdo al trabajo realizado por Uribe *et al.* (2008), el rendimiento hidrológico en las cuencas altas depende de la precipitación que reciben y además, de la presencia de bosques de niebla, dada su capacidad para interceptar el vapor del agua de la atmósfera y cederlo gradualmente a los drenajes naturales, tendiendo a hacer más estables los caudales a través del tiempo, controlando y previniendo así la erosión de los suelos y evitando deslizamientos. En este sentido, una característica valiosa en Cerro Grande se basa justamente en la presencia de más de 5 mil hectáreas cubiertas de bosque mesófilo de montaña (ver anexo 2: Estaciones 1 y 4), las cuales son sumamente importantes para preservar los servicios ambientales que proporciona y que en su mayoría están localizadas dentro de las áreas propuestas en este estudio para la prestación de SAH.

En general, se espera que las zonas de muy alto potencial, al poseer una cobertura bien desarrollada en comparación con cuencas deforestadas, asegurarán la protección del suelo ante el impacto de la lluvia, contribuyendo, como mencionan Andrade y Navarrete (2004), a disminuir la velocidad de la escorrentía y a mantener el suelo más firme con ayuda de las raíces, las cuales ayudan a evitar deslizamientos, a retardar la sedimentación de cauces y a prevenir la erosión superficial.

El Alto potencial natural contiene a las zonas funcionales hidrográficas que presentan una cobertura vegetal natural de bosques y selvas de 50 a 70 % y abarcan un área de 15 km<sup>2</sup>, cubriendo menos de 4 % del territorio. Aunque también son aptas para la conservación y provisión de recursos hídricos, se sugiere realizar proyectos de restauración ecológica en una parte del territorio (10-20 %) para continuar en condiciones de elegibilidad y así garantizar la prestación de SAH.

Considerando a la vegetación como el componente más significativo de los regímenes de perturbación natural o humana, según los argumentos de Palacio *et al.* (2002), resulta elemental considerar los tipos de vegetación natural que existen en Cerro Grande, con el fin de que los proyectos de restauración ecológica que se planean realizar en una porción del territorio, se lleven a cabo de la manera más similar a las condiciones de las coberturas originales, para garantizar con ello una mayor calidad en la provisión y prestación de los recursos hídricos en general. De esta forma, se asume tal como afirma Vera (2006), que la captación de agua es afectada principalmente por la altura de la vegetación, la densidad del follaje y la profundidad de las raíces. Por ello, tomando en cuenta la investigación de Robertson y Wunder (2005), entre más compleja sea la estructura de la superficie del bosque (debido a las diferentes cantidades de hojarasca y humus que presentan), el suelo subyacente permitirá una infiltración más

eficiente y una disminución en la escorrentía superficial promedio, en la sedimentación y en la erosión laminar de pendientes intermedias, en relación con una cuenca deforestada.

En suma y coincidiendo con Boege (2008), los ecosistemas naturales, por su mayor complejidad, son las mejores trampas para la infiltración del agua, el escurrimiento superficial y la evapotranspiración, y éstos permiten una mayor sustentabilidad y funcionamiento a mediano y largo plazo de las cuencas. Por lo tanto, la conservación y la restauración en estas áreas de alto potencial deben ser lo más próximas a su estado de cobertura original.

El potencial Medio reúne un área menor a los 3 km<sup>2</sup> (menos de 1% del territorio), en donde la vegetación natural de bosques y selvas tiene 40 a 49 % de cobertura. En dicha área se hace una distinción por Zonas Funcionales Hidrográficas, dando mayor prioridad a las zonas de emisión y emisión-confinamiento (nivel tres), para realizar procesos de restauración ecológica en 20-25 % del área y crear condiciones de elegibilidad para la prestación de SAH. En cambio, las zonas funcionales hidrográficas de captación-transporte (nivel cuatro), poseen condiciones más favorables para realizar otras actividades, como la agricultura tradicional y la ganadería controlada y de mínima densidad; además se sugiere el mantenimiento de la vegetación ribereña y la utilización de técnicas antierosivas, para evitar la pérdida de suelos. El iniciar estos procesos de restauración en 10-15 % de dicha área, permitirá garantizar su incorporación a ser elegible para la prestación de SAH.

Así como señala el trabajo de Garcia-Coll *et al.* (2004), pese a que el pago por servicios ambientales debe orientarse primeramente hacia los propietarios de las zonas calificadas con alta prioridad, por brindar beneficios hídricos combinados y privilegiar a

los pobladores que viven bajo condiciones de alta marginación; las zonas evaluadas con prioridad media, deberán considerarse también, especialmente en proyectos que favorezcan la restauración ecológica. Así por ejemplo, las zonas de emisión son igualmente importantes para la provisión del agua potable que se concentra en el cauce principal del río Ayuquila y del río Juluapan; sin embargo, aquellas clasificadas con un potencial natural medio (nivel tres), están siendo afectadas por el aumento significativo de coberturas antrópicas como la agricultura de temporal. De la misma forma en las zonas de emisión-confinamiento, el cambio de uso de suelo hacia coberturas secundarias como el pastizal inducido, ha generado una mayor fragilidad en dichas áreas (ver estación 3 del anexo 2).

En Cerro Grande por ejemplo, el azolvamiento de los resumideros y dolinas por la apertura de brechas, ha afectado el patrón de escurrimiento en el territorio y generado fuertes problemas de erosión en los caminos (Jardel y Cruz, 2000). Por ello es menester realizar acciones de restauración en las zonas de nivel tres de emisión y emisión-confinamiento, que permitan una adecuada infiltración del agua pluvial superficial a través del suelo del bosque y confinamiento hacia el interior del macizo kárstico por las dolinas hasta las grandes resurgencias en la base de Cerro Grande, lo que garantizaría una mejor provisión y calidad del agua que fluye a los manantiales y a los cauces permanentes de las cuencas bajas.

Un rol importante en la restauración de las áreas de emisión y emisión-confinamiento subordinadas al nivel tres, lo desempeña el mantenimiento de la vegetación ribereña, la cual, según González y García (2001), tiene una estrecha relación con la estructura, la amplitud y el manejo de los cauces fluviales, al contribuir con la estabilidad de las orillas a través de su sistema radical, disminuir el riesgo de erosión por la acción de la

corriente, aumentar la cohesión y resistencia del suelo por la presencia de raíces, disipar la energía y velocidad de las aguas. Además tiene la capacidad de conservar a las especies presentes en las aguas de los cursos fluviales, incluyendo especies amenazadas como la nutria de río (*Lutra longicaudis*), cuya presencia es indicador de una buena condición del río (Rodríguez, 2006). A este respecto, el trabajo de Jiménez *et al.* (2009) demuestra que la nutria se distribuye a lo largo de todo el río Ayuquila, en zonas rocosas, con pozas y con una buena cobertura vegetal; y a pesar de que su hábitat se ha visto mermado por las actividades antrópicas realizadas a lo largo de la cuenca, la calidad de su hábitat ha ido mejorando por las acciones de rehabilitación del río, como los programas de separación de desechos, plantas de tratamiento y desvío de aguas negras, entre otros.

A su vez, las zonas de captación-transporte son elementales al proveer de agua potable, regular el flujo de materiales, nutrientes y sedimentos aguas abajo y funcionar como filtro ante contaminantes de las zonas funcionales contiguas (Gopar, 2008); sin embargo, como señalan Cotler y Priego (2004), el deterioro del recurso hídrico en esta zona implica también exportar condiciones ecológicas adversas que impactarán los ecosistemas de las zonas de emisión. En el caso de aquellas áreas que se han clasificado dentro de un potencial medio (nivel cuatro) en este estudio, éstas han sufrido un fuerte cambio en el uso de suelo al disminuir su cobertura vegetal desde bosque de encino y otras latifoliadas y bosque mixto de encino-pino hacia una extensa área de pastizal inducido, lo cual puede afectar inminentemente la capacidad de provisión de agua que puede generar dicha subcuenca endorreica. Es por eso que se sugiere planificar ciertas actividades en función de la aptitud del territorio de dicha zona

de captación-transporte, para lograr prácticas de manejo acordes a las condiciones locales del relieve, suelo y humedecimiento.

Por ello, coincidiendo con las propuestas de Travieso (2005) en función del potencial natural del territorio, en estas áreas se recomienda la protección de la vegetación natural donde existan restricciones del relieve para las actividades agropecuarias, la restauración de áreas de importancia hídrica y la realización de prácticas de manejo amigables con el ambiente; todo lo cual puede generar ingresos a mediano y largo plazo, por su implementación en el programa de pagos por la conservación de los servicios ambientales hídricos.

En general las zonas de captación-transporte poseen condiciones más favorables para el aprovechamiento de los recursos naturales, por lo que es posible realizar otras actividades que permitan mejorar las condiciones del suelo, del agua y de las comunidades locales.

Así por ejemplo, la ganadería controlada y de mínima densidad es recomendada en dichas áreas, ya que como menciona Bruijnzeel (1990; 2004), si ésta se maneja de forma controlada, puede ayudar a reducir la compactación y con ello disminuir aún más la escorrentía. También pueden considerarse en estas actividades de aprovechamiento los sistemas silvopastoriles, los cuales al combinar árboles con pasturas, podrían proveer una serie de beneficios locales, como prueban Dagang y Nair (2003).

Otras propuestas que se pueden efectuar de igual manera que en los trabajos de Hernández y Herrerías (2002) y de la Fundación de Agua y Medio Ambiente A.C. (FAMAAC, 2005) para la conservación del suelo y el agua (aunque con las características físico-geográficas propias de Cerro Grande), son la implementación de

parcelas agroforestales y hortalizas a partir de la elaboración de abonos orgánicos, la rotación de cultivos, el establecimiento de barreras vivas para controlar la erosión, la reforestación de barrancas y laderas con especies nativas; así como otras técnicas antierosivas de labranza que infiltren el agua, como el surcado en contorno, la construcción de terrazas mediante represas filtrantes, pequeños jagüeyes, zanjas trinchera y bordos de tierra. Se sugiere además la elaboración de suficientes cisternas de ferrocemento y ollas de captación de agua de lluvia, para que a través del tiempo el agua pluvial se acumule arriba del macizo kárstico y ésta pueda servir para las actividades básicas de las comunidades locales, ya que la disponibilidad de agua en las partes altas de Cerro Grande es prácticamente nula.

No obstante, un problema crucial en el manejo de las áreas correspondientes al potencial natural medio, estriba en que la gran mayoría (principalmente del nivel cuatro) se localizan dentro del polígono de la Zona Núcleo de Cerro Grande, lo que en ese aspecto dificultaría por completo su manejo y aprovechamiento sugerido. A pesar de esto, las actividades de restauración y de mantenimiento de la vegetación ribereña deben llevarse a cabo lo más pronto posible, para asegurar un buen funcionamiento para la prestación de servicios ambientales hídricos.

El potencial Bajo abarca tan solo un área de 2.8 km<sup>2</sup>, reúne a las zonas funcionales hidrográficas de emisión o emisión-confinamiento que tienen hasta 39% de su cobertura con vegetación natural y una densidad de drenaje de Media a Muy Baja. Estas zonas de nivel cinco se consideran favorables para la agricultura tradicional y la ganadería controlada y de baja densidad; además se sugiere el mantenimiento de la cobertura vegetal ribereña, indispensable para la conservación de estas áreas.

Es sabido que el proceso de deterioro que sufre un territorio cuando se elimina la cobertura vegetal, desencadena diversos efectos adversos para los ecosistemas y por ende para los seres humanos (Landa y Carabias, 2008); por lo que cuando se pierde la conectividad entre las áreas de vegetación natural, la extensión de la vegetación secundaria influye en el aumento de los procesos de erosión hídricos, afectando tanto la capacidad de recarga como el incremento de la carga de sedimentos, disminuyendo así la calidad de los cuerpos de agua (Cotler y Priego, 2004).

En este sentido, la degradación de los suelos y la modificación de los sistemas hídricos en estas áreas debido a la deforestación y el mal uso de la tierra, han provocado algunas alteraciones en Cerro Grande (como las que menciona Cardona (2006) pero con las características propias de cada sitio de estudio) que se presentan de manera inminente, como la erosión que induce a la sedimentación y el detrimento de los ríos; lo que conlleva al deterioro de las cuencas, el fraccionamiento de los ecosistemas y la contaminación de las aguas y los suelos.

Es a causa del deterioro en estas zonas de bajo potencial natural, que se sugieren las mismas acciones de aprovechamiento agrosilvopastoril y mantenimiento de la vegetación ribereña, que se desarrollaron para el nivel cuatro del potencial natural medio; con excepción de aquellos polígonos que se encuentran dentro de la Zona Núcleo de la Reserva en Cerro Grande, los cuales en teoría están en estricta protección, y por tal razón, deberían de ser restaurados lo más pronto posible.

El potencial Muy Bajo considera todas las zonas funcionales hidrográficas que tienen una cobertura vegetal natural inferior a 39% y poseen una densidad de drenaje alta a muy alta. En esta área (nivel seis) de poco más de 4 km<sup>2</sup>, es urgente la implementación

de proyectos de restauración ecológica, ya que el cambio de uso de suelo y el grado de erosión por la disección horizontal son determinantes en la conservación de estos sitios. Según el estudio de PLADEYRA (2003), al conocer las áreas que presentan una alta vulnerabilidad y un muy bajo potencial natural, se deben identificar los factores que están causando el estrés hídrico y, con base en ello, determinar las políticas a que deben someterse dichas zonas, con el fin de recuperar la estabilidad de los procesos hidrológicos naturales.

Un ejemplo utilizado en el trabajo de Hernández y Herrerías, (2005) para regenerar un bosque u otro tipo de vegetación natural, es abordar inicialmente las partes elevadas de las cuencas, para crear pequeñas represas donde el agua de lluvia se empieza a juntar, con el fin de producir una pequeña corriente en alguna de las barrancas que se forman en los pliegues de los cerros; además de realizar otras obras de retención en pendientes escarpadas con labores de regeneración ecológica, lo que permite favorecer los suelos, evitar la erosión y reducir el escurrimiento pluvial, propiciando la infiltración al subsuelo. Dichos ejemplos pueden implementarse en las áreas de nivel seis de Cerro Grande, realizando actividades de restauración desde donde nace el río hasta la zona más baja, así como a ambos lados del cauce, manteniendo también la vegetación ribereña, además de otros tipos de cobertura vegetal que permitan restablecer la calidad del agua en dichas áreas. Resulta básica la restauración de estas áreas de muy bajo potencial, ya que su alta densidad de drenaje les atribuye una mayor fragilidad ambiental, debido a que su índice de erosión es más elevado y al contar con muy poca cobertura natural, las hace más vulnerables y menos aptas para la prestación de los servicios ambientales hídricos. Sin embargo, los resultados en las labores de

regeneración pueden no ser tan propicios para el área de estudio, debido a su naturaleza kárstica que impide la captación superficial del agua.

En síntesis, el análisis de una cuenca a partir del enfoque físico-geográfico, como mencionan Cotler y Priego (2004), conlleva a comprender en el marco de las zonas funcionales, la estructura, el funcionamiento y la distribución de los ecosistemas que la conforman, incorporando a su vez la idea de su fragilidad y vulnerabilidad ambiental y sobretodo facilita el entendimiento de la cantidad, calidad y temporalidad del agua como eje integrador.

Por ello, este mapa intenta contribuir hacia el conocimiento de las funciones hidrográficas de los paisajes kársticos, a partir de un enfoque de cuenca y tomando en cuenta la zonificación funcional como elemento base, para su posterior evaluación e implementación en el actual programa de PSAH llevado por CONAFOR.

Los resultados obtenidos se basan principalmente en las condiciones de la red hidrográfica, la división de subcuencas, la identificación de zonas funcionales en términos del flujo del agua sobre el terreno y la disección horizontal, esto es, las condiciones físicas del terreno. Sin embargo, no considera otros factores que controlan el ciclo hidrológico, como el tipo y dinámica de la cobertura vegetal y la influencia de las condiciones bioclimáticas en la vegetación, en los procesos ecológicos (ecohidrológicos) y en el balance hídrico (precipitación-evapotranspiración-infiltración); aspectos que deben ser tomados en cuenta al evaluar servicios ambientales hidrológicos y que pueden ser discutidos en términos de lo que se puede recomendar para nuevos estudios.

#### **IV.7. Elegibilidad para la Prestación de Servicios Ambientales Hídricos**

Los resultados obtenidos sobre las áreas elegibles con potencial natural para la prestación de servicios ambientales hídricos en Cerro Grande según la propiedad de la tierra, se detallan en la Figura 13. Dichos resultados fueron confrontados con las zonas que considera la CONAFOR en la actualidad dentro del programa PSAH, desde el 2005 al 2009 en la zona de estudio. En el Cuadro 9 se presentan específicamente las áreas elegibles y no elegibles en km<sup>2</sup> y sus porcentajes de acuerdo a los diferentes propietarios de la tierra, contrastando los resultados de esta tesis con las áreas elegidas por CONAFOR (2005, 2006, 2007, 2008 y 2009) para PSAH.

Mientras que los resultados para esta investigación hablan favorablemente del estado de conservación de Cerro Grande en general, al sugerir un potencial natural de áreas elegibles en 374 km<sup>2</sup> (97.5 % del territorio y mayor del 96 % en todos los tipos de tenencia); la CONAFOR ha incluido únicamente 18.14 % del área al programa, considerando menos de 70 km<sup>2</sup> del territorio total. Específicamente la propiedad con mayor incorporación al programa PSAH ha sido la ejidal (principalmente Toxín y Platanarillos), incluyendo poco más de 42 km<sup>2</sup> elegidos por la CONAFOR durante el periodo mencionado, que equivalen a 60 % del área ejidal. A su vez, la propiedad indígena de Zacualpan se ha favorecido por el programa casi en un 40 % de su territorio (más de 13 km<sup>2</sup>), mientras la propiedad privada con la misma área beneficiada sólo contribuye con el 6 % de dicha tenencia. En cuanto a las zonas en conflicto, y a pesar del litigio, la CONAFOR ha incluido 4.5 % de éstas dentro del programa, lo que corresponde apenas a 31 hectáreas que, de acuerdo a las reglas de operación, no

pueden ser manejadas por no tener un dueño definido y sin embargo, de forma contradictoria, ya se incorporaron al programa PSAH en Cerro Grande en la actualidad. Hemos encontrado en estos resultados, coincidiendo con el estudio de Dourojeanni (2004) las inconsistencias que se aprecian en Cerro Grande entre las autoridades designadas para gobernar sobre territorios delimitados por razones político-administrativas, con las elegidas para gobernar sobre espacios delimitados por razones naturales como las cuencas hidrográficas, y que es uno de los mayores inconvenientes para gestionar el agua o los ecosistemas.

Un claro ejemplo se aprecia en las transposiciones entre las áreas de los ejidos, que generan problemas internos por la posesión de las zonas en litigio, principalmente entre los territorios más extensos, como son El Terrero-Lagunitas y Lagunitas-Zacualpan. Además, para los resultados de este estudio dichas zonas en conflicto son completamente aptas para prestar servicios ambientales hídricos, aunque el programa de la CONAFOR no las ha tomado en consideración o lo ha hecho mínimamente; sin embargo, los territorios donde colindan los ejidos El Terrero con Toxín y con La Laguna, se han incorporado en su mayor parte al programa PSAH.

Estos casos son contradictorios, ya que en teoría las áreas con problemas de linderos quedan fuera de todo pago o aprovechamiento hasta que se definan los dueños en los tribunales agrarios; no pueden ser aprovechadas y solo se trabajan en caso de que presenten amenazas como plagas, incendios, tala, etc. El problema estriba en que CONAFOR da el pago como si los límites ejidales fueran solo hasta donde están los límites de conflictos, y el dinero que pudieran obtener de esas áreas nadie lo adquiere por disposiciones legales, porque no hay un dueño definido (Oscar Balcázar, *com. pers.* 2010).

La determinación de estas zonas de elegibilidad para la prestación de servicios ambientales, ha ido evolucionando en cada ejercicio fiscal conforme la experiencia de la CONAFOR y mediante los criterios de las Reglas de Operación, entre los que destacan las superficies con una cobertura forestal arbórea igual o mayor de 50 % (DOF, 2009). No obstante, este criterio no es considerado de manera directa en la definición de las zonas elegibles, ya que el porcentaje de cobertura forestal arbórea está en función de la delimitación particular de un predio (Jesús Gutiérrez Cacique, *com pers.*, 2010) y no de una unidad hidrográfica como tal.

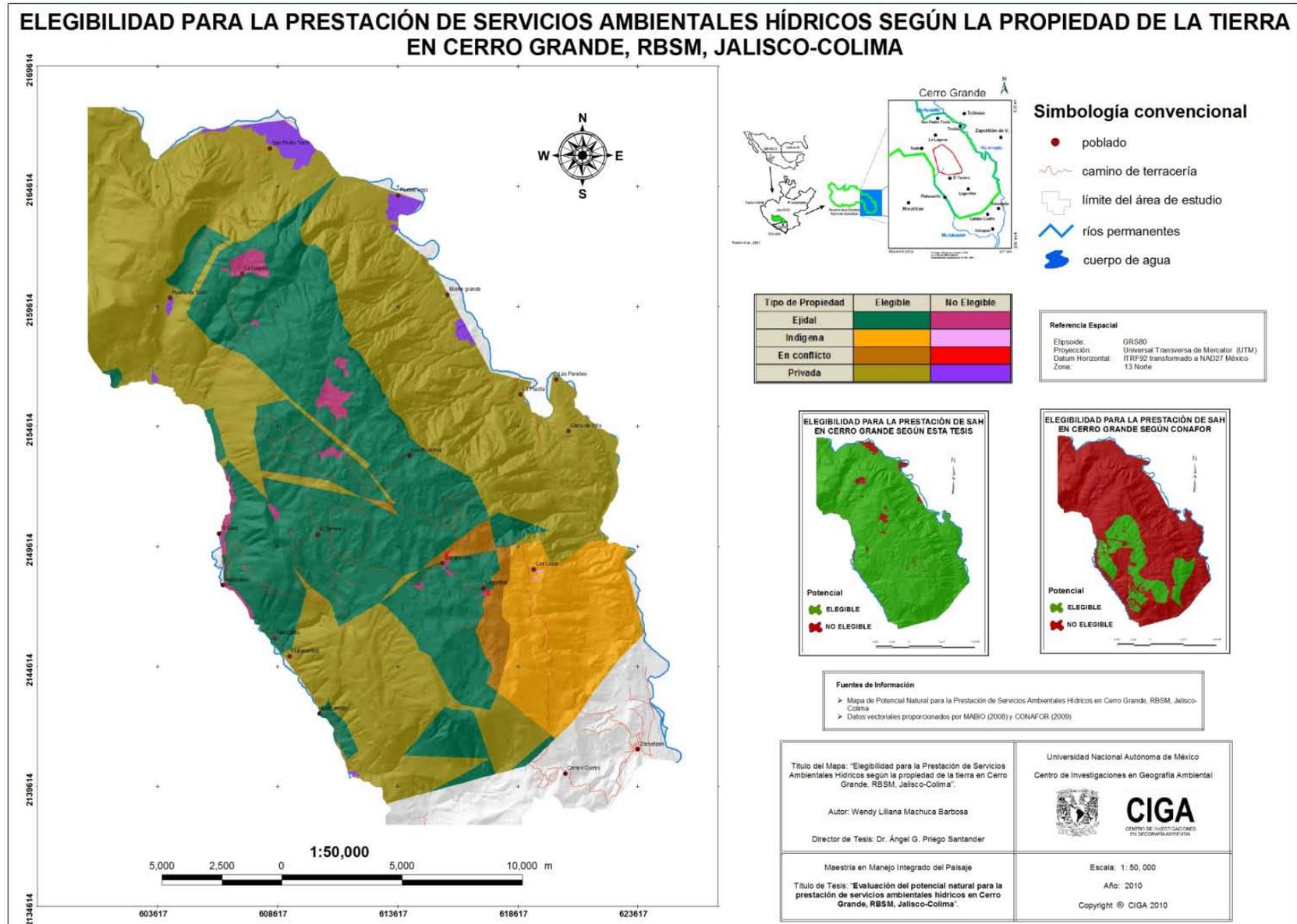


Figura 13. Elegibilidad para la prestación de Servicios Ambientales Hídricos en Cerro Grande, RBSM, Jalisco-Colima.

Cuadro 9. Evaluación del potencial natural para la prestación de servicios ambientales hídricos en Cerro Grande, RBSM, Jalisco-Colima.

Tenencia de la tierra	Nombre de la propiedad	Área de la propiedad (Km <sup>2</sup> )	AREAS ELEGIBLES				AREAS NO ELEGIBLES			
			TESIS		CONAFOR		TESIS		CONAFOR	
			Km <sup>2</sup>	%	Km <sup>2</sup>	%	Km <sup>2</sup>	%	Km <sup>2</sup>	%
Ejidal	CAMPO CUATRO	6.3275	6.3275	100	0.2151	3.4	0	0	6.1123	96.6
	EL TERRERO	37.9946	37.8126	99.52	13.6678	35.97	0.182	0.48	24.3268	64.03
	LA LAGUNA	43.0049	39.9107	92.81	4.8129	11.19	3.0942	7.19	38.192	88.81
	LAGUNITAS	19.7287	19.4749	98.71	6.1234	31.04	0.2538	1.29	13.6053	68.96
	PLATANARILLOS	16.5198	15.6368	94.65	9.1389	55.32	0.883	5.35	7.3808	44.68
	TOXIN	15.0976	14.797	98.01	8.0692	53.45	0.3006	1.99	7.0284	46.55
Indígena	ZACUALPAN	34.2254	34.1762	99.86	13.5985	39.73	0.0492	0.14	20.627	60.27
En conflicto	EL TERRERO-LAGUNITAS	2.0938	2.0385	97.36	0	0	0.05524	2.64	2.0938	100
	EL TERRERO-LA LAGUNA	0.0091	0.0091	100	0.0061	67.17	0	0	0.003	32.83
	EL TERRERO-PLATANARILLOS	0.000005	0.000005	100	0	0	0	0	0.000004	89.9
	EL TERRERO-TOXIN	0.2802	0.2802	100	0.2299	82.05	0	0	0.0503	17.95
	LAGUNITAS-ZACUALPAN	4.6025	4.5556	98.98	0.0785	1.7	0.0469	1.02	4.524	98.3
Privada	PROPIEDAD PRIVADA	203.871	199.0786	97.65	13.679	6.71	4.7925	2.35	190.192	93.29
<b>Total</b>		<b>383.7551</b>	<b>374.0978</b>	<b>97.48</b>	<b>69.6193</b>	<b>18.14</b>	<b>9.6574</b>	<b>2.52</b>	<b>314.1358</b>	<b>81.86</b>

Por tal razón, el cálculo de la cobertura forestal arbórea con un enfoque de cuenca y tomando como base las zonas funcionales hidrográficas (como sugiere el presente estudio), expresa de manera más efectiva y funcional el estado de conservación del territorio y del recurso hídrico, que cuando se basa en la tenencia de la tierra, como plantea la CONAFOR.

Como se ha demostrado previamente en México, el diseño de los programas de PSA juega un papel central para garantizar su éxito (Vera, 2006); por lo tanto, el esquema que impulse la prestación de servicios ambientales, debe fusionar las diferentes estrategias de uso territorial y de recursos naturales en términos de la funcionalidad de los ecosistemas (González *et al.*, 2008).

Aquí es importante señalar que a diferencia de otras experiencias del programa PSAH (FAO, 2004; Pagiola *et al.*, 2004; Paré *et al.*, 2008), el trabajo de Graf *et al.* (2008) indica que el mecanismo de PSAH de Cerro Grande no establece un pago por la propiedad de terrenos en el área de captación de agua para asegurar exclusivamente la conservación de bosques, sino por las prácticas de conservación y de manejo sustentable de los recursos naturales en sus territorios y prácticas urbanas sustentables que permitan el mantenimiento y mejoramiento del servicio ambiental. Con tal propuesta, se reconoce la importancia del manejo del territorio y los recursos naturales en la zona de captación y no sólo la exclusión de usos para la conservación de bosques. Al tener un enfoque integral, incide en el mantenimiento de otros servicios ambientales como la conservación del paisaje y la biodiversidad, además genera alternativas que incrementan el nivel de ingreso de la población, consolidan las capacidades para su desarrollo y son una verdadera oportunidad para reducir la marginación y la pobreza que impera en las comunidades de Cerro Grande. El objetivo

principal es apoyar a los propietarios de los terrenos y habitantes del territorio donde se genera el Servicio Ambiental (C. I. Zacualpan, los ejidos El Terrero, Lagunitas, Platanarillos, Campo Cuatro, Toxín y La Laguna, pequeños propietarios y legítimos poseedores de los recursos forestales del área de captación), para financiar prácticas sustentables del territorio, compensar la sustitución de uso en las áreas de conservación, crear capacidades locales para el desarrollo de alternativas productivas (como el ecoturismo o el manejo forestal) y crear una creciente conciencia ciudadana, para fortalecer el mecanismo tanto en las comunidades de la zona de captación como entre los habitantes de la ciudad de Colima.

Por tales motivos es preciso revisar la manera en que se definen las zonas elegibles y se asignan los recursos, cuando no hay una estrategia clara de la comunidad (Graf y Wynter, 2005). En este contexto, deben tener prioridad en recibir dicha compensación aquellos productores de los ejidos que poseen parte de sus tierras en el interior de la Zona Núcleo de la Reserva (Toxín, La Laguna y El Terrero), los cuales ostentan derechos agrícolas en dicha zona de conservación de Cerro Grande, pero no pueden realizar actividades por el decreto y no cuentan con otro espacio.

No obstante, existen inconsistencias por la selección de las áreas elegibles en ambas propuestas. Las áreas que resultaron con un potencial natural medio (nivel tres) en el presente estudio, específicamente en el ejido de Toxín, a pesar de encontrarse en una zona de emisión-confinamiento, con baja densidad de drenaje y cubiertas de pastizal inducido que domina la zona funcional (ver anexo 2: Estación 3), existe una extensa área adyacente con Bosque Mesófilo de Montaña. Sin embargo, al considerar los términos de la cobertura natural mínima para prestar adecuadamente servicios ambientales hídricos, se impide su elegibilidad. Pese a la cobertura transformada, al

ubicarse dentro del polígono de la Zona Núcleo de la Reserva, la restauración en esta parte del ejido debe ser inmediata.

En contraste al resultado previo, dentro del programa PSAH de CONAFOR (2008; 2009), de acuerdo a los polígonos implementados durante este periodo, gran parte de dichas zonas han sido beneficiadas en sus áreas tanto de cobertura boscosa como de vegetación transformada, lo cual es gratificante para su rehabilitación. No obstante, aún faltan más esfuerzos por preservar otros remanentes de Bosque Mesófilo situados en los ejidos de Lagunitas, El Terrero y La Laguna.

Al mismo tiempo, existen superposiciones entre polígonos pertenecientes al PSAH, como el del ejido Lagunitas (incorporado al programa en 2008) y los polígonos de beneficiarios privados (incorporados en 2005 y 2006); lo que se presta a posibles conflictos por el incentivo o el manejo del territorio, y con más razón si se le da una compensación a los ejidatarios, cuando parte del área que deben conservar se encuentra fuera del límite del ejido.

La comparación de los resultados obtenidos en este trabajo de investigación y las zonas que actualmente se encuentran dentro del programa de PSAH de CONAFOR, denota de manera evidente la diferencia de áreas elegibles con los dos métodos considerados, haciendo muy visible la falta de criterios hidrológicos que manejan las autoridades gubernamentales para una adecuada conservación de las cuencas y de los recursos hídricos en nuestro país.

A pesar de que los servicios ambientales relacionados con la oferta hídrica, según Fregoso (2006), han retomado el enfoque de cuencas como la perspectiva de análisis que permite circunscribir la oferta natural del servicio a una unidad hidrográfica funcional; en este estudio se ha resaltado la falta de criterios hídricos que se utilizan al

determinar la elegibilidad de las zonas que conforman Cerro Grande en el programa PSAH.

Es así como existen experiencias en ordenación y manejo de cuencas hidrográficas en México, donde aún no se ha entendido la adecuada estrategia de la cuenca para ubicar los cambios necesarios en los sistemas productivos y en la calidad de vida de las propias comunidades campesinas (Villanueva, 2002); por ello las actividades prácticas se siguen sin fundamentación teórica consciente y sistemática, sin un conocimiento amplio y profundo del propio concepto de cuenca, entendiendo la realidad de forma fragmentada y tratando los efectos en vez de las causas en los problemas. Por tales razones, Morales y Rodríguez (2007) consideran que la gestión actual del agua debe ser sustentable (aprovechar el recurso de modo que se logre el conocimiento científico y la equidad social), integral (que relacione aspectos físicos con los institucionales, los económicos y de participación social), eficiente (lograr mayor productividad del agua), incluyente y equitativa (que promueva la participación social en la toma de decisiones y la vía de la negociación entre usuarios en conflicto, logrando el mayor beneficio para los habitantes de la cuenca).

En suma, solo conociendo la realidad de la cuenca e intentando explicarla, será posible su manejo práctico adecuado, pues la cuenca no suprime la legalidad propia de la comunidad, del sistema productivo o del predio; más bien los relaciona a un área y a características en las que se integran y relacionan, dándoles un verdadero sentido (Villanueva, 2002). Por ello el manejo de las cuencas en Cerro Grande requiere de la participación social y la toma de decisión por parte de la comunidad que habita la cuenca, como menciona el estudio de Chávez (2004), para tener éxito en su gestión y

para construir una gobernabilidad más eficaz de los recursos hídricos. No obstante, pese a todo el conocimiento tradicional y local que poseen las comunidades sobre su territorio, éstos no pueden informarnos sobre la capacidad de los ecosistemas para sostener especies, recursos, funciones y servicios ecológicos indispensables para la reproducción de la vida; por lo que le corresponde generarlo a las comunidades científicas (Toledo, 2008).

En este sentido y coincidiendo con Boyd (2008), los mapas generados actualmente están cambiando la forma en que nos comunicamos y ayudamos a desarrollar nuestro entendimiento espacial de los fenómenos naturales y sociales; así la naturaleza es muy importante para la economía y la clave para entenderla, es la geografía.

Es por ello que el conocer los patrones espaciales en la provisión de servicios ambientales es fundamental, considerándose una herramienta muy útil para la toma de decisiones de los programas de PSAH (Balvanera, *com pers.*, 2010). Debido a esto, es necesario contar con una estructura básica de análisis que permita desarrollar propuestas de PSA más equitativas y cercanas a la realidad en cuanto a la relación entre las sociedades humanas y su entorno natural, tal como indica Pattanayak (2004).

Como menciona Farfán (2009), la simple declaración de los espacios como protegidos no es suficiente para contener procesos de degradación del paisaje, como la deforestación, erosión de suelos, pérdida de hábitats y de biodiversidad; en este sentido, la conservación debe considerar la interacción tanto de procesos sociales como biológicos complejos.

Lo que se busca finalmente en este estudio es que las estrategias de conservación se adecuen conforme a las características físico-geográficas y socioeconómicas del territorio, enfocándose en las zonas funcionales de la cuenca hidrográfica como la unidad fundamental de provisión y gestión para los servicios ambientales hídricos en la región.

## V. CONCLUSIONES

1. La metodología utilizada permitió definir las Zonas Funcionales Hidrográficas de las subcuencas pertenecientes al área de Cerro Grande. A través de dicho método, se tiene un mayor conocimiento de sus características hidrográficas y es posible comprender mejor el comportamiento de los recursos hídricos en las subcuencas. Sin embargo, es un procedimiento no utilizado aún en los programas de PSAH que maneja la CONAFOR, debido a que no considera la tenencia de la tierra, como actualmente se seleccionan los terrenos que serán beneficiados.
2. A partir de la red hidrográfica completa y de la delimitación de 69 subcuencas en Cerro Grande (53 de origen exorreico y 16 endorreicas), se definieron sus zonas funcionales hidrográficas (clasificando casi la mitad del territorio como zonas de captación-transporte, con 201,794 km<sup>2</sup>, seguido de 196,965 km<sup>2</sup> de cabeceras y sólo 25,656 km<sup>2</sup> como zonas de emisión y emisión-confinamiento).
3. Se obtuvo el potencial natural para la prestación de Servicios Ambientales Hídricos en Cerro Grande. Éste potencial no se distribuye uniformemente en el territorio, prevaleciendo el Muy Alto potencial, considerando así más de 93 % del área en óptimas condiciones para prestar sus servicios ambientales hídricos a los habitantes de la cuenca.
4. Del total del área de Cerro Grande, el presente estudio considera aptas para elegirse como prestadoras de SAH al 99.45 % de las zonas de cabecera (181.7034 km<sup>2</sup>), 98.83 % de zonas de captación-transporte (182.4161 km<sup>2</sup>), 59.98 % de zonas de emisión (7.4535 km<sup>2</sup>) y 62.1 % de zonas de emisión-confinamiento (2.5246 km<sup>2</sup>);

dejando sin consideración para la prestación de SAH a poco menos de 10 km<sup>2</sup> (2.5 % de Cerro Grande). En contraste, la CONAFOR de acuerdo a su programa de PSAH desde el 2005 al 2009, ha conservado hasta ahora únicamente 19.93 % de zonas de cabecera, 16.92 % de zonas de captación-transporte y 48.35 % de zonas de emisión-confinamiento; dejando fuera a las zonas de emisión y sumando así más de 300 km<sup>2</sup> (81.39 %) de área aún no elegida que cumple con todos los requisitos para poder prestar SAH en Cerro Grande.

5. Los servicios ambientales hídricos pueden asegurarse a través del buen grado de conservación que presente el territorio, por lo tanto dependen en gran medida de la permanencia de la cobertura vegetal natural. Por ello el mapa del potencial natural para la prestación de SAH puede apoyar la toma de decisiones para un ordenamiento y conservación más adecuados del área de Cerro Grande. Asimismo, el mapa final de elegibilidad permite analizar y confrontar los resultados de áreas potenciales para prestar SAH desde dos métodos distintos: el físico-geográfico (basado en la hidrografía) usado en esta investigación y el socio-político (basado en los predios) usado por CONAFOR.
6. Para un adecuado manejo de cuencas y un mayor éxito en los programas de PSAH (que se especializan en la conservación, gestión y sustentabilidad de los recursos hídricos), se recomienda utilizar el método físico-geográfico seguido en esta tesis, el cual se enfoca en la unidad territorial de la cuenca y sus zonas funcionales como principales herramientas para definir el potencial natural que tiene un territorio como prestador de Servicios Ambientales Hídricos; e incorporando posteriormente a la evaluación de la elegibilidad la propiedad de la tierra, para priorizar a los propietarios de mayor marginación y pobreza.

7. Más allá del presente estudio, se sugiere hacer más investigaciones en el área de Cerro Grande, para poder obtener información sobre la dinámica de los diferentes tipos de vegetación, el balance hídrico, el clima y otros tipos de potenciales (agropecuario, forestal, de conservación de la biodiversidad, ecoturístico, etc.) que permitan conocer mejor el territorio a través de las características que posee, y construir propuestas más certeras sobre un apropiado uso de suelo y de sus recursos hídricos, fundamentando con mayor solidez las decisiones de manejo relacionadas con la generación de servicios ambientales.

## VI. BIBLIOGRAFÍA

- Andrade**, A. y Navarrete. 2004. Lineamientos para la aplicación del enfoque ecosistémico a la gestión integral del recurso hídrico. Serie de Manuales de Educación y Capacitación Ambiental - PNUMA. México.
- Arceo**, S. y E. Salinas. 1994. Evaluación del potencial natural de los paisajes para la actividad agropecuaria en el ejemplo del municipio Yaguajay (provincia Sancti-Spiritus, Cuba). *Geographicalia* 31, 3-16.
- Balcázar**, O.E. 2011. Patrones Geoecológicos de Incendios Forestales en la Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán. Tesis de Maestría en Ciencias en Manejo de Recursos Naturales. Centro Universitario de la Costa Sur, Universidad de Guadalajara. Autlán de la Grana, Jalisco, México, 135 p.
- Balvanera**, P. y H. Cotler (compiladores). 2009. Estado y tendencias de los servicios ecosistémicos, pp. 185-245. *En*: CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad) 2009. Capital natural de México. vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio. México, 819 p.
- Bastian**, O. 2008. Landscape classification – between fact and fiction. *Klasyfikacja krajobrazu. Teoria i praktyka. Problemy Ekologii Krajobrazu*. t. XX: 13-20.
- Bastian**, O. y M. Röder. 2002. Landscape functions and natural potentials, pp. 213-230. *In*: Bastian O. y U. Steinhardt (Eds.) Development and perspectives of landscape ecology. Kluwer Academic Publisher. Dordrecht, The Netherlands, 499 p.
- BM** (Banco Mundial). 2007. El manejo del agua en territorios indígenas en México. Volumen 4. Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento / Banco Mundial Departamento de México y Colombia / Región de América Latina y El Caribe, 97 p.
- Bocco**, G. 2004. Cartografía y Sistemas de Información Geográfica en el Manejo Integrado de Cuencas, pp. 41-47. *En*: Cotler, H. (Comp.). El manejo integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política ambiental. INE-SEMARNAT. México, 264 p.
- Bocco**, G., A. Priego y H. Cotler. 2010. The contribution of physical geography to environmental public policy in México. *Singapore Journal of Tropical Geography* 31: 215-223.
- Boege**, E. 2008. La captación del agua en los territorios actuales de los pueblos indígenas de México, pp. 41-66. *En*: Paré, L., D. Robinson y M. A. González (coord.). Gestión de cuencas y servicios ambientales. Perspectivas comunitarias y ciudadanas. Serie Planeación Territorial. SEMARNAT-INE, Itaca, Raíces, Sendas, A.C., WWF. México, 304 p.

- Boyd, J.** 2008. The Geography of Ecosystem Services. Resources Fall. pp. 10-15. Washington, DC (NorthWest). GeoEye ([www.geoeye.com](http://www.geoeye.com))
- Bonacci, O., T. Pipan y D. C. Culver.** 2009. A framework for karst ecohydrology. *Environmental Geology*, 56: 891–900.
- Broadmeadow, S. y Nisbet, T. R.** 2004. The effects of riparian forest management on the freshwater environment: a literature review of best management practice. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8(9): 286-305.
- Bruijnzeel, L. A.** 1990. Hydrology of Moist Tropical Forests and Effects of Conversion: A State of Knowledge Review. París: UNESCO International Hydrological Programme.
- Bruijnzeel, L. A.** 2004. Los Bosques Tropicales y los Servicios Ambientales. ¿Acaso los árboles impiden ver el Terreno? Agriculture, Ecosystems and Environment. Facultad de Hidrología y las Ciencias de la Vida y la Tierra. Vrije Iniversiteit Amsterdam. Holanda, 45 p.
- Caire, G.** 2004. Retos para la gestión ambiental de la cuenca Lerma-Chapala: obstáculos institucionales para la introducción del manejo integral de cuencas, pp. 183-200. *En:* Cotler, H. (comp). El manejo integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política ambiental. INE-SEMARNAT. México, 267 p.
- Carabias, J. y R. Landa.** 2005. Agua, medio ambiente y sociedad. Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México. Universidad Nacional Autónoma de México, El Colegio de México, Fundación Gonzalo Río Arronte. México. 221 p.
- Cardona, C. M.** 2006. La cuenca hidrográfica como unidad de planificación. Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad del Bosque. *Senderos Ambientales*, 1(1): 25-34.
- Casillas, J. A.** 2004. La visión de la SAGARPA para el desarrollo integral de microcuencas hidrográficas, pp. 211-221. *En:* Cotler, H. (comp). El manejo integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política ambiental. INE-SEMARNAT. México, D.F., 267 p.
- Chávez, G.** 2004. Del gobierno a la gobernabilidad de los recursos hídricos en México, pp. 173-182. *En:* Cotler, H. (comp). El manejo integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política ambiental. INE-SEMARNAT. México, D.F., 267 p.
- CODESUVER** (Coalición de Organizaciones para el Desarrollo Sustentable del Sur de Veracruz, A. C.) 2005. Consolidación de procesos participativos en torno del desarrollo regional, a partir del mejor uso de los recursos naturales en la Sierra de Santa Marta del sur de Veracruz. Cap. V. Pp. 159-246. *En:* Reygadas, R. y C. Zarco. (Comp.). Manejo comunitario de agua y recursos. Experiencias de desarrollo

local en México. Consejo de Educación de Adultos de América Latina, A.C. México, D.F., 520 p.

**CONABIO** (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad) 2008. Regiones Hidrológicas Prioritarias. México Fecha de modificación: 9 de diciembre de 2008.

[http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rhp\\_025.html](http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rhp_025.html)

**CONAFOR** (Comisión Nacional Forestal) 2005. Superficie aprobada para el Programa de Servicios Ambientales Hidrológicos en la APROMSA Cerro Grande Anualidad 2005. *Shapefile*. Gerencia de Servicios Ambientales del Bosque. Comisión Nacional Forestal. México.

**CONAFOR** (Comisión Nacional Forestal) 2006. Superficie aprobada para el Programa de Servicios Ambientales Hidrológicos en la APROMSA Cerro Grande Anualidad 2006. *Shapefile*. Gerencia de Servicios Ambientales del Bosque. Comisión Nacional Forestal. México.

**CONAFOR** (Comisión Nacional Forestal) 2007. Superficie aprobada para el Programa de Servicios Ambientales Hidrológicos en la APROMSA Cerro Grande Anualidad 2007. *Shapefile*. Gerencia de Servicios Ambientales del Bosque. Comisión Nacional Forestal. México.

**CONAFOR** (Comisión Nacional Forestal) 2008. Superficie aprobada para el Programa de Servicios Ambientales Hidrológicos en la APROMSA Cerro Grande Anualidad 2008. *Shapefile*. Gerencia de Servicios Ambientales del Bosque. Comisión Nacional Forestal. México.

**CONAFOR** (Comisión Nacional Forestal) 2009. Superficie aprobada para el Programa de Servicios Ambientales Hidrológicos en la APROMSA Cerro Grande Anualidad 2009. *Shapefile*. Gerencia de Servicios Ambientales del Bosque. Comisión Nacional Forestal. México.

**CONAFOR** (Comisión Nacional Forestal) 2011. Lineamientos para promover Mecanismos Locales de Pago por Servicios Ambientales a través de Fondos Concurrentes. México, 61 p.

**CONAGUA** (Comisión Nacional del Agua). 2006. La gestión del agua en México. Avances y Retos. México, 250 p.

**CONAGUA** (Comisión Nacional del Agua). 2011. Últimos meses, los más secos de la historia. En: Rojas, R. 2011. Cambio de Michoacán. Periodismo en evolución. Nota emitida el domingo 17 de abril de 2011.

<http://www.cambiodemichoacan.com.mx/vernota.php?id=147859>

**Costanza**, 1997. The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital. *Nature*, Vol. 387: 253-260.

- Cotler**, H. (Compiladora). 2004. El manejo integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política ambiental. INE-SEMARNAT. México, D.F. 267 p.
- Cotler**, H. y A. Priego-Santander. 2004. El análisis del paisaje como base para el Manejo integrado de cuencas: el caso de la cuenca Lerma-Chapala, pp. 63-74. *En*: Cotler, H. (Comp.). El manejo integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política ambiental. INE-SEMARNAT. México, D.F., 267 p.
- Cotler**, H. y G. Caire. 2009. Lecciones aprendidas del manejo de cuencas en México. INE, SEMARNAT, Fundación Gonzalo Río Arronte, I.A.P. y WWF. México, 380 p.
- Cotler**, H. 2010. Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización. Instituto Nacional de Ecología. México, 232 p.
- Cuevas**, R. y N. M. Núñez. 1988. Taxonomía de los pinos de la Sierra de Manantlán, Jalisco. Tesis de licenciatura, Facultad de Agronomía, Universidad de Guadalajara. Zapopan, Jalisco, 104 p.
- Dagang**, A.B.K. y P.K.R. Nair. 2003. Silvopastoral Research and Adoption in Central America: Recent Findings and Recommendations for Future Directions. *Agroforestry Systems*, 59:149–155.
- Daily**, G.C. (Editor). 1997. Nature's Services. Societal dependence on Natural Ecosystems. Washington, D. C. Island Press, 393 p.
- Derruau**, M. 1989. Geomorfología. Ed. Ariel. Barcelona, España, 528 p.
- DOF** (Diario Oficial de la Federación) 2004. Acuerdo por el que se modifica el diverso que establece las Reglas de Operación para el otorgamiento de pagos del Programa de Servicios Ambientales Hidrológicos. Viernes 18 de junio de 2004. Pp. 26-43.
- DOF** (Diario Oficial de la Federación) 2009. Reglas de Operación del Programa Pro Árbol 2010. Diario Oficial (Sexta Sección). Comisión Nacional Forestal. 31 de diciembre de 2009. 80 p.
- Dourojeanni**, A., A. Jouravlev y G. Chávez. 2002. Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica. CEPAL – SERIE Recursos Naturales e Infraestructura N° 47, Santiago de Chile, Chile.
- Dourojeanni**, A. C. 2004. Si sabemos tanto sobre qué hacer en materia de gestión integrada del agua y cuencas ¿por qué no lo podemos hacer? pp. 135-171. *En*: Cotler, H. (Comp.). El manejo integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política ambiental. INE-SEMARNAT. México, 264 p.
- ESRI**. 2008. ArcGIS 9 Versión 9.3. Environmental Systems Research Institute, Inc. US.

- FAMAAC** (Fundación de Agua y Medio Ambiente, A. C.) 2005. Proyecto manejo de microcuencas en zonas de montaña del área de conservación de Xochimilco, pp. 305-344. *En:* Reygadas, R. y C. Zarco. (Comp.). Manejo comunitario de agua y recursos. Experiencias de desarrollo local en México. Consejo de Educación de Adultos de América Latina, A.C. México, D.F., 520 p.
- FAO** (Food and Agriculture Organization of the United Nations) 2004. Sistemas de pago por servicios ambientales en cuencas hidrográficas. Land and Water Discussion Paper 3. Foro regional en Arequipa, Perú, del 9 al 12 de Junio de 2003, organizado por la Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe, Chile, 73 p.
- Farfán, M.** 2009. De la percepción remota a la social: deforestación y conservación (1971-2000) en la Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán, Jalisco. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Filosofía y Letras.
- Figuroa, B. L. y M. Olvera.** 2000. Dinámica de la composición de especies en bosques de *Quercus crassipes* H. et B. en Cerro Grande, Sierra de Manantlán, México. Colegio de Postgraduados. Texcoco, México. *Agrociencia*, 34(1): 91-98.
- Fregoso, A.** 2006. La oferta y el pago de los servicios ambientales hídricos: una comparación de diversos estudios. Instituto Nacional de Ecología, México. *Gaceta Ecológica*, 78:29-46.
- GAIA** (Grupo Autónomo para la Investigación Ambiental, A. C.) 2005. Hacia el fortalecimiento de las capacidades comunitarias de gestión ambiental: una experiencia en Oaxaca. Cap. VIII. Pp. 345-401. *En:* Reygadas, R. y C. Zarco. (Comp.). Manejo comunitario de agua y recursos. Experiencias de desarrollo local en México. Consejo de Educación de Adultos de América Latina, A.C. México, D.F., 520 p.
- García-Coll, I., A. Martínez-Otero, A. Ramírez-Soto, A. Niño-Cruz, A. Juan-Rivas y L. Domínguez-Barrada.** 2004. Zonas Prioritarias para Pago de Servicios Ambientales Hidrológicos en la Cuenca del Río Gavilanes, Coatepec, Veracruz, pp. 99-115. *En:* Cotler, H. (Comp.). El manejo integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política ambiental. INE-SEMARNAT. México, 264 p.
- Gerritsen, P., A. Lomelí y C. Ortiz.** 2005. Urbanización y problemática socioambiental en la costa sur de Jalisco, México. Una aproximación. *Región y Sociedad*, 17(33): 107-132.
- GESG** (Grupo Ecológico Sierra Gorda, I.A.P.) 2005. La promoción de la conservación del desarrollo sustentable en la Reserva de la Biósfera Sierra Gorda, pp. 403-433. *En:* Reygadas, R. y C. Zarco. (Comp.). Manejo comunitario de agua y recursos. Experiencias de desarrollo local en México. Consejo de Educación de Adultos de América Latina, A.C. México, D.F., 520 p.

- González, F. y G. Hernández.** 1998. Las dolinas de Tamaulipas. *Ciencias*, 50: 56-58.
- González, J. I.** 2000. Guía metodológica para el estudio de cuencas hidrológicas superficiales con proyección de manejo. Universidad de La Habana, Cuba (inédito).
- González, M. y D. García.** 2001. Restauración de ríos y riberas. Fundación Conde del Valle de Salazar y Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. España, 319 p.
- González, J. I.** 2004. El manejo de cuenca en Cuba: actualidades y retos, pp. 21-40. *En: Cotler, H. (Comp.). El manejo integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política ambiental.* INE-SEMARNAT. México, 264 p.
- González, M. A., F. Silvestre, M. E. Miranda, I. Martínez y J. Pérez.** 2008. El sistema comunitario para la biodiversidad: una estrategia para el manejo comunitario del complejo hidrológico Copalita-Zimatán-Huatulco, pp. 231-258. *En: Paré, L., D. Robinson y M. A. González (coord.). Gestión de cuencas y servicios ambientales. Perspectivas comunitarias y ciudadanas.* SEMARNAT, INE, Itaca, Raises, Sendas, A.C., WWF. México, D.F., 304 p.
- Gopar, L. F.** 2008. Cambios en las coberturas y usos del suelo y sus implicaciones en la provisión de servicios hidrológicos en la cuenca del Río Copalita, Oaxaca, México. Tesis de Maestría. Centro de Investigaciones en Ecosistemas, Universidad Nacional Autónoma de México. México, 88 p.
- Graf, S. y J.J. Rosales-Adame.** 1995. Diagnóstico sociodemográfico de la Sierra de Manantlán y su región de influencia. Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca/Instituto Manantlán de Ecología y Conservación de la Biodiversidad, Universidad de Guadalajara. Reporte técnico (inédito).
- Graf, S., E. Santana, E. Jardel, M. Gómez y S. García-Ruvalcaba.** 2003. La Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán, México, pp. 135-153. *En: Carabias, J., J. de la Maza y R. Cadena (Coord.) Capacidades necesarias para el manejo de Áreas Protegidas: América Latina y el Caribe.* The Nature Conservancy, World Commission on Protected Areas (WCPA), Unión Mundial para la Naturaleza (UICN). México, 200 p.
- Graf, S. y L. Wynter,** 2005. Mecanismo de pago compensatorio de servicios ambientales en Cerro Grande, Sierra de Manantlán, Colima. Fundación Manantlán para la Biodiversidad de Occidente A. C. pp. 25-29. *En: RAISES (Red de Aprendizaje, Intercambio y Sistematización de Experiencias hacia la Sustentabilidad). Segundo Seminario-Taller sobre Gestión Territorial del Agua y Servicios Ambientales, celebrado del 7 al 9 de febrero, en Pátzcuaro, Michoacán.* Instituto de Investigaciones Sociales, UNAM; Secretaría de Desarrollo Agropecuario, Gobierno del Estado de Michoacán, 38 p.
- Graf, S., E. Santana, L. M. Martínez-Rivera, S. García-Ruvalcaba and J. J. Llamas.** 2006. Collaborative governance for sustainable water resources management: the

experience of the Inter-municipal Initiative for the Integrated Management of the Ayuquila River Basin, Mexico. *Environment & Urbanization*, 18(2): 297–313.

**Graf**, S., L. E. Wynter, P. Bauche y G. Velica. 2008. Mecanismo compensatorio de servicios ambientales: experiencia en Cerro Grande, Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán, Jalisco-Colima. México, pp. 185-210. *En*: Paré, L., D. Robinson y M. A. González (coordinadores). Gestión de cuencas y servicios ambientales. Perspectivas comunitarias y ciudadanas. SEMARNAT, INE, Itaca, Raíces, Sendas, A.C., WWF. México, D.F., 304 p.

**Graf**, S. y L. Iglesias. 2010. Pago por Servicios Ambientales en México. Coordinación General de Producción y Productividad. CONABIO-SEMARNAT. *En*: Simposio de áreas protegidas y cambio climático, celebrado el 11 de marzo de 2010, en Mérida, Yucatán. México, 37 p.

**Hernández**, L. 1991. Análisis y evaluación de las Áreas Silvestres Protegidas en Jalisco y Colima. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias, Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco.

**Hernández**, R. y G. Herrerías. 2002. Programa agua para siempre. Obtención de agua y conservación de suelos a través de la regeneración de cuencas. Alternativas y procesos de participación social, A.C. *En*: “Experiencias locales en la lucha contra la desertificación en zonas semiáridas de América Latina y el Caribe”.  
<http://www.fidamerica.cl/actividades/conferencias/desertificacion/mixteca.html>

**Hernández**, R. y G. Herrerías. 2005. Agua para siempre y Qualli: un cuarto de siglo de desarrollo regional en la semiárida región Mixteca, pp. 45-98. *En*: Reygadas, R. y C. Zarco (Comp.). Manejo comunitario de agua y recursos. Experiencias de desarrollo local en México. Consejo de Educación de Adultos de América Latina, A.C. México, D.F., 520 p.

**INE** (Instituto Nacional de Ecología) 2000. Programa de Manejo de la Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán. Instituto Manantlán de Ecología y Conservación de la Biodiversidad (IMECBIO), Universidad de Guadalajara, INE-SEMARNAT. México. 203 pp.

**INE** (Instituto Nacional de Ecología) 2002. Cuencas hidrológicas. Conceptos.  
[www.ine.gob.mx/dgoece/cuencas/conceptos.html](http://www.ine.gob.mx/dgoece/cuencas/conceptos.html)

**INE** (Instituto Nacional de Ecología) 2010. Índice de presión económica a la Deforestación. Nota metodológica. Dirección General de Investigación en Política y Economía Ambiental, 5 p.

**INEGI** (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) 2000. Censo Nacional de Población y Vivienda. México.

**Jardel**, E. J. 1992. Estrategia para la conservación de la Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán. LNLJ, Universidad de Guadalajara, El Grullo, Jalisco, 312 p.

- Jardel**, E. J., A. Santiago y M. Muñoz. 1993. El bosque mesófilo de montaña de la Sierra de Manantlán. Universidad de Guadalajara. *Tiempos de Ciencia*, 30:20-28.
- Jardel**, E. J. (Coordinador). 1995. Programa de manejo forestal del ejido El Terrero, municipio de Minatitlán, Colima. Unidad Productora de materia prima forestal y derivados de la madera del Ejido El Terrero-IMECBIO/Universidad de Guadalajara. El Terrero, Colima. México.
- Jardel**, E. J., A. L. Santiago y M. E. Muñoz. 1995. Conservación y manejo de los encinos en el bosque mesófilo de montaña de la Sierra de Manantlán, Jalisco y Colima. *En*: Marroquín, J. (Ed.) Memorias del III Seminario Nacional sobre Utilización de Encinos. Fac. Cienc. Forestales UANL, Serie Reporte Científico, No. especial 14.
- Jardel**, E. J. 1998. Efectos ecológicos y sociales de la explotación maderera de los bosques de la Sierra de Manantlán. IMECBIO-CUCSUR-Universidad de Guadalajara. México, pp. 231-251. *En*: Ávila, R., J.P. Emphoux, L.G. Gastélum, S. Ramírez, O. Schöndube y F. Valdez (Eds.). El Occidente de México: arqueología, historia y medio ambiente. Perspectivas regionales. Actas del IV Coloquio Internacional de Occidentalistas. Universidad de Guadalajara / Instituto Francés de Investigación Científica para el Desarrollo en Cooperación (ORSTOM). Guadalajara, Jalisco.
- Jardel**, E.J. y G. Cruz. 2000. Diagnóstico integral y plan comunitario de manejo de recursos naturales del Ejido El Terrero, Municipio de Minatitlán, Colima. Programa de Desarrollo Regional Sustentable de la Región Sierra de Manantlán. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. Autlán, Jalisco, 108 p.
- Jardel**, E.J., S.H. Graf-Montero, E. Santana y M. Gómez. 2004. Managing core zones in mountain protected areas in México: The Sierra de Manantlán Biosphere Reserve, pp. 214-225. *In*: Hamilton, L., G. Worboys y D. Harmon (Eds.). Managing Mountain Protected Areas: Challenges and responses for the 21st Century. Andromeda Editrice. Teramo, Italia.
- Jardel**, E.J., R. Ramírez, F. Castillo, S. García-Ruvalcaba, O. Balcázar, J. C. Chacón y J. Morfín. 2006. Manejo del fuego y restauración de bosques en la Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán, México, pp. 214-242. *En*: Flores, J. G. y D. A. Rodríguez, T.O. Estrada y F. Sánchez Z. (Coord.). Incendios Forestales. Mundi-Prensa, CONAFOR. México D. F.
- Jardel**, E. J. 2008. Sucesión ecológica y restauración de bosques subtropicales de montaña en la Estación Científica Las Joyas, México, pp. 77-97. *En*: González-Espinosa, M., J. M. Rey-Benayas y N. Ramírez-Marcial (Editores). Restauración de bosques en América Latina. Fundación Internacional para la Restauración de Ecosistemas (FIRE) y Editorial Mundi-Prensa México, México.

- Jiménez**, A. L., L. I. Iñiguez, M. M. Ramírez e I. Ruan. 2009. Distribución y abundancia de la nutria (*Lontra longicaudis*) en la cuenca baja del río Ayuquila. Trabajo de tesis para obtener el grado de Ingeniero en Recursos Naturales y Agropecuarios. Centro Universitario de la Costa Sur. Universidad de Guadalajara. México.
- Landa**, R. y J. Carabias. 2008. Los recursos hídricos y la gestión de cuencas en México, pp. 23-40. *En*: Paré, L., D. Robinson y M. A. González (coord.). Gestión de cuencas y servicios ambientales. Perspectivas comunitarias y ciudadanas. SEMARNAT, INE, Itaca, Raises, Sendas, A.C., WWF. México, D.F., 304 p.
- Lazcano**, C. 1988. Las cavernas de Cerro Grande, estados de Jalisco y Colima. Laboratorio Natural Las Joyas, Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco, 144 p.
- LAN** (Ley de Aguas Nacionales) 2004. Publicada en 1992 y reformada en abril de 2004 por la Comisión Nacional del Agua. México.
- Lomelí**, J. A., P. Gerritsen y C. Ortiz. 2003. Diagnóstico integral de la cuenca baja del Río Ayuquila en el Occidente de México. Departamento de ecología y recursos naturales-IMECBIO. Universidad de Guadalajara. México, 73 p.
- Luna**, A. M. 1999. La geografía de los recursos naturales en Cuba: potencial natural y combinaciones territoriales. *Investigaciones Geográficas*, 40:99-109.
- Maass**, J. M., P. Balvanera, A. Castillo, G. C. Daily, H. A. Mooney, P. Ehrlich, M. Quesada, A. Miranda, V. J. Jaramillo, F. García, A. Martínez, H. Cotler, J. López, A. Pérez, A. Búrquez, C. Tinoco, G. Ceballos, L. Barraza, R. Ayala y J. Sarukhán. 2005. Ecosystem services of tropical dry forests: insights from longterm ecological and social research on the Pacific Coast of Mexico. *Ecology and Society*, 10(1), 17. <http://www.ecologyandsociety.org/vol10/iss1/art17/>
- MABIO** (Fundación Manantlán para la Biodiversidad de Occidente, A.C.). 2004. Tenencia de la Tierra de los Ejidos Campo Cuatro, La Laguna, Lagunitas, Platanarillos, el Terrero, Toxín y la Comunidad Indígena de Zacualpan. *Shapefiles*. Sistema de Información Geográfica de Cerro Grande. MABIO, A.C. México.
- MABIO** (Fundación Manantlán para la Biodiversidad de Occidente, A.C.) 2010. Experiencia en la creación de imagen institucional. Estudio de caso Cerro Grande. Mantengamos grande a Cerro Grande. Fundación Manantlán para la Biodiversidad de Occidente, A.C., 11 p.
- Machado**, S. 2010. Mecanismo de Compensación por Servicios Ambientales Hidrológicos de Cerro Grande. Trabajo presentado en el Taller de "Evaluación de Servicios Ecosistémicos: caso de estudio Servicio Ambiental Hídrico", realizado del 29 de septiembre al 1 de octubre de 2010 en Morelia, Michoacán, México.

- Makhdoum**, M. F. 2008. Landscape ecology or environmental studies (Land Ecology) (European Versus Anglo- Saxon schools of thought). *Journal of International Environmental Application & Science*, 3(3): 147-160.
- Martínez**, L. M. y J. M. Ramírez. 1998. Unidades fisiográficas de la Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán bajo un Sistema de Información Geográfica. *Terra* 16(3): 195-203.
- Martínez**, L. M., S. Graf, E. Santana y S. García. 2005. Gestión y manejo del agua en la cuenca del río Ayuquila. Primer congreso Internacional de casos exitosos de Desarrollo Sostenible del Trópico, realizado del 2 al 4 de mayo de 2005. Boca del Río, Veracruz, México.
- Mateo**, J. 1981. Morfología Cársica. Ministerio de Educación Superior "Apuntes para un libro de texto". Departamento de Textos y Materiales Didácticos. Universidad de la Habana, Cuba, 278 p.
- MAVDT** (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial) 2008. Estrategia Nacional de Pago por Servicios Ambientales. Viceministerio de Ambiente. Grupo de Análisis Económico. Colombia, 97 p.
- MEA** (Millenium Ecosystem Assessment) 2005a. Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesis. World Resources Institute, Washington, D.C., 86 p.
- MEA** (Millenium Ecosystem Assessment) 2005b. Ecosystems and Human Well-being: A framework for Assessment. Washington, D. C. Island Press, pp: 26-48.
- Medina**, C., C. Troche, A. Larrazábal y A. Velázquez. 2008. Componentes Bióticos del Paisaje. Vegetación y Uso del Suelo, pp. 12-37. *En*: Priego, A. y G. Bocco (Comp.). Bases para el ordenamiento ecológico de la Región Sierra-Costa de Michoacán. Informe para la SUMA Michoacán. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM, 160 p.
- Mercado**, N. 2001. Fish communities, fisheries and public perception of the Ayuquila River in west central Mexico. Thesis M.S. University of Wisconsin, Madison.
- México Forestal**. 2010. Cerro Grande: el bosque detrás del grifo. Revista electrónica de la Comisión Nacional Forestal. 17 de febrero de 2010. (<http://www.mexicoforestal.gob.mx>)
- Morales**, J. A. y L. Rodríguez. (Coordinadores). 2007. Economía del Agua. Escasez del agua y su demanda doméstica e industrial en áreas urbanas. UAM-Xochimilco. México, 356 p.
- Muñoz**, L. E. 2008. Efecto del cambio en el uso del suelo sobre la dinámica hidrológica y calidad de agua en el trópico húmedo del centro de Veracruz, México. Tesis de doctorado. Universidad Autónoma Metropolitana. México, 278 pp.

- Myers**, N. 1997. The World's Forests and their Ecosystem Services, pp. 215-236. *In*: Daily, G C. (Editor). Nature's Services. Societal dependence on natural ecosystems. Washington, D.C. Island Press, 393 p.
- Olvera**, M. y B. L. Figueroa. 2000. Inventario forestal en bosques dominados por encino (*Quercus fagaceae*) en la Sierra de Manantlán, Jalisco-Colima, México: Descripción de los patrones de respuesta al medio físico y biológico. Universidad de Guadalajara. Centro Universitario de la Costa Sur. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. L015. México, D.F., 68 p.
- Pagiola**, S., P. Agostini, J. Gobbi, C. de Haan, M. Ibrahim, E. Murgueitio, E. Ramírez, M. Rosales y J. P. Ruíz. 2004. Pago por Servicios de Conservación de la Biodiversidad en Paisajes Agropecuarios. Environmental Economics Series, Paper No. 96. The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank. U.S.A, 40 p.
- Palacio**, A. G., R. Noriega y P. Zamora. 2002. Caracterización físico-geográfica del paisaje conocido como "bajos inundables". El caso del Área Natural Protegida Balamkín, Campeche. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 4: 57-73.
- Paré**, L., D. Robinson y M. A. González (coordinadores). 2008. Gestión de cuencas y servicios ambientales. Perspectivas comunitarias y ciudadanas. SEMARNAT, INE, Itaca, Raises, Sendas, A.C., WWF. México, D.F., 304 p.
- Parise**, M. y V. Pascali. 2003. Surface and subsurface environmental degradation in the karst of Apulia (southern Italy). *Environmental Geology*, 44:247–256.
- PASOLAC** (Programa para la Agricultura Sostenible en Laderas de América Central) 2006. Elementos metodológicos para la implementación de pagos por servicios ambientales hídricos al nivel municipal en Centroamérica. Tegucigalpa, Honduras, 37 p.
- Pattanayak**, S. 2004. Valuing watershed services: concepts and empirics from southeast Asia. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 104: 171-184.
- Pérez-Maqueo**, O., C. Delfín, A. Fregoso, H. Cotler y M. Equihua. 2006. Modelos de simulación para la elaboración y evaluación de los programas de servicios ambientales hídricos. Instituto Nacional de Ecología. México. *Gaceta ecológica*, 78: 65-84.
- PLADEYRA**, 2000. Ordenamiento Ecológico Territorial de las Cuencas de los ríos Bobos y Solteros, Veracruz, a escala 1:100 000. Planificación, Desarrollo y Recuperación Ambiental. Gobierno del Estado de Veracruz-Llave, Xalapa, Veracruz, México.

- PLADEYRA**, 2003. Paisajes hidrológicos y balance hídrico de la cuenca Lerma-Chapala, a escala 1:250,000. Planificación, Desarrollo y Recuperación Ambiental S. C. Instituto Nacional de Ecología, México, 135 p.  
[http://www.ine.gob.mx/descargas/cuencas/estudio\\_hidrologico\\_clch.pdf](http://www.ine.gob.mx/descargas/cuencas/estudio_hidrologico_clch.pdf)
- Postel**, S. y S. Carpenter. 1997. Freshwater Ecosystem Services, pp. 195-214. *In*: Daily, G. C. (Editor). Nature's Services: Societal dependence on Natural Ecosystems. Washington, D. C. Island Press, 393 p.
- Priego**, A., H. Morales y C. Enríquez. 2004. Paisajes Físico-Geográficos de la Cuenca Lerma-Chapala, México. *Gaceta Ecológica*, 71: 11-22.
- Priego**, A., G. Bocco, H. Rivas, C. Troche, A. Acosta y J. Mathews. 2008. Caracterización del sistema natural. Componentes abióticos del paisaje, pp. 4- 12. *En*: Priego, A. y G. Bocco. (Compiladores). Bases para el ordenamiento ecológico de la Región Sierra-Costa de Michoacán. Informe para la SUMA Michoacán. CIGA, UNAM, 160 p.
- Quintero**, A. 1987. Descripción general de Cerro Grande, Sierra de Manantlán, Jalisco. Universidad de Guadalajara, Laboratorio Natural Las Joyas. Notas sobre Cuencas y Suelos. El Grullo, Jalisco.
- RAISES** (Red de Aprendizaje, Intercambio y Sistematización de Experiencias hacia la Sustentabilidad). 2005. Segundo Seminario-Taller sobre Gestión Territorial del Agua y Servicios Ambientales, celebrado del 7 al 9 de febrero de 2005 en Pátzcuaro, Michoacán. Instituto de Investigaciones Sociales, UNAM; Secretaría de Desarrollo Agropecuario, Gobierno del Estado de Michoacán, 38 p.
- Reygadas**, R. y C. Zarco. 2005. Manejo comunitario de agua y recursos. Experiencias de desarrollo local en México. Consejo de Educación de Adultos de América Latina, A.C. México, D.F., 520 p.
- Riegelhaupt**, E., P. Balvanera, A. Burgos, M. Equihua, A. Fregoso, G. García Félix, A. Gómez G., A. Gómez Tagle, M. González Guillen, J.J. Jiménez, M. Mass y L. Marín. 2005. Informe Final. Consulta de Expertos Sobre Servicios Hidrológicos de los Bosques. Primera Revisión del Programa Estratégico Forestal 2025 y Programa Nacional Forestal 2001-2006. Proyecto FAO/CONAFOR UTF/MEX/056.
- Robert**, O., E. Ruán, S. García, A. Pizano y O. Sánchez. 2000. Áreas y sitios de visita pública en Cerro Grande, Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán. Selección de sitios con mayor posibilidad de aprovechamiento turístico. Laboratorio de Desarrollo y Conservación, DERN-IMECBIO, CUCSUR, Universidad de Guadalajara, Autlán, 46 p.
- Robert**, O., E. Ruán, S. García, A. Pizano y O. Sánchez. 2001. Estrategia de manejo de la Visita Pública. Plan rector de manejo de la visita pública en Cerro Grande, Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán. Universidad de Guadalajara,

CUCSUR, DERN-IMECBIO. Resumen ejecutivo de la estrategia de manejo de la visita pública presentado al Consejo Asesor de la Reserva de la Biósfera, 23 p.

**Robert, O. y D. A. González.** 2006. Evaluación técnico-económica y diseño de proyectos de turismo alternativo. *En:* Taller de capacitación práctica realizado del 1 al 10 de septiembre de 2006 en la casa Ejidal y varios predios del Ejido Emiliana Zapata, El Arenal, Jalisco. CONAFOR/PROCYMAF II, 30 p.

**Robertson, K.** 1992. Guías de Análisis de Terreno: Geomorfología Aplicada. Módulos de Ecología y Cuencas Hidrográficas. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Subdirección de Docencia e Investigaciones, Santa Fe de Bogotá, Colombia, 99 p.

**Robertson, N. y S. Wunder,** 2005. Huellas frescas en el bosque. Evaluación de iniciativas incipientes de Pagos por Servicios Ambientales en Bolivia. Center for International Forestry Research (CIFOR). Bogor, Indonesia, 150 p.

**Rodríguez, J. T.** 2006. Análisis socioecológico de la vegetación ribereña en la cuenca baja del río Ayuquila. Elementos para su rehabilitación. Tesis de Licenciatura. IRNA, CUCSUR, Universidad de Guadalajara. Autlán de Navarro, Jalisco, 108 p.

**Romero, A. y F. Belmonte.** 2002. Los paisajes geomorfológicos de la región de Murcia como recurso turístico. Universidad de Murcia. *Cuadernos de Turismo*, 9:103-122.

**Salcido, S., P. Gerritsen y L. M. Martínez.** 2010. Gobernanza del agua a nivel local: Estudio de caso en el municipio de Zapotitlán de Vadillo, Jalisco. Universidad Autónoma Metropolitana – Azcapotzalco, México. *El Cotidiano*, 162:83-89.

**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 p.

**Saldaña, A.** 2010. Aspectos institucionales y legales en la implementación de un Programa Nacional de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos en México. Lecciones aprendidas. Comisión Nacional Forestal. *En:* “Evaluación de Servicios Ecosistémicos: caso de estudio Servicio Ambiental Hídrico”, taller realizado del 29 de septiembre al 1 de octubre de 2010 en Morelia, Michoacán, México.

**Sánchez, O.** 2007. Ecosistemas acuáticos: diversidad, procesos, problemática y conservación, pp. 11-36. *En:* Sánchez, O., M. Herzig, E. Peters, R. Márquez y L. Zambrano (eds.). Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México. INE-SEMARNAT, México, 293 p.

**Sandoval, J., A. Aguirre y L.M. Martínez.** 2005. Calidad de agua y sanidad en comunidades rurales de la Sierra de Manantlán, Jalisco México. V Convención Internacional sobre Medio Ambiente y Desarrollo. Memorias en extenso. La Habana CUBA, 10 p.

- Santa María**, P. 2010. Experiencias de los Mecanismos de Pagos por Servicios Ambientales en las Áreas Naturales Protegidas. Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (SERNANP). Lima, Perú, 87 p.
- Santiago**, A. L., E. Jardel y R. Cuevas. 2002. Rareza y estado de conservación de especies arbóreas del bosque mesófilo de montaña en la Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán, México. *Ibugana, Boletín* 10: 5-22.
- Sarukhán**, J., P. Koleff, J. Carabias, J. Soberón, R. Dirzo J. Llorente-Bousquets, G. Halffter, R. González, I. March, A. Mohar, S. Anta y J. de la Maza. 2009. Capital natural de México. Síntesis: conocimiento actual, evaluación y perspectivas de sustentabilidad. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, 100 p.
- SEMARNAT y Hombre-Naturaleza**. 2003. Introducción a los servicios ambientales. México, 36 p.
- Spiridonov**, A.I. 1981. Principios de la metodología de las investigaciones de campo y el mapeo geomorfológico. Tomo I. Facultad de Geografía de la Universidad de la Habana. Ministerio de Educación Superior. La Habana, Cuba, 225 p.
- Summerfield**, M. A. 1991. Global Geomorphology. An introduction to the study of landforms. Ed. Longman Scientific & Technical. John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 537 p.
- Taminskas**, J. y V. Marcinkevicius. 2002. Karst geoindicators of environmental change: The case of Lithuania. *Environmental Geology*, 42:757–766.
- Toledo**, V. y L. Solís. 2001. Ciencia para los pobres. El programa “Agua para siempre” de la región Mixteca. *Ciencias*, 64: 33-39.
- Toledo**, A. 2008. Análisis y Evaluación de la Resiliencia Ecológico-Social de la Región Sierra-Costa de Michoacán. Ecosistemas Regionales y Resiliencia Ecológica y Social, pp. 134-160. *En*: Priego, A. y G. Bocco. (Compiladores). Bases para el ordenamiento ecológico de la Región Sierra-Costa de Michoacán. Informe para la SUMA Michoacán. CIGA, UNAM, 160 p.
- Torres**, J. M. y A. Guevara. 2002. El potencial de México para la producción de servicios ambientales: captura de carbono y desempeño hidráulico. México, D. F. Instituto Nacional de Ecología. *Gaceta ecológica*, (63): 40-59.
- Tovar**, I. y M. Mas, 1994. Nuestros orígenes. DDF, CONACULTA, Universidad Iberoamericana A. C. México, 227 p.
- Travieso**, A. C. 2005. Evaluación de indicadores de sustentabilidad de la ganadería bovina en la costa de Veracruz Central, México. Tesis para obtener el grado de

Doctor en Ciencias en Ecología y manejo de recursos naturales. Instituto de Ecología A. C. Xalapa, Veracruz, México, 167 p.

**Uribe**, E., J. C. Mendieta, H. J. Rueda y F. Carriazo. 2008. Introducción a la valoración ambiental, y estudios de caso. Universidad de los Andes, Facultad de Economía, Bogotá, 155 p.

**Urich**, P., M. Day y F. Lynagh. 2001. Policy and practice in karst landscape protection: Bohol, the Philippines. *The Geographical Journal*, 167(4): 305–323.

**Vázquez**, J. A., R. Cuevas, T. S. Cochrane, H.H. Iltis, F.J. Santana-Michel y L. Guzmán (Eds.).1995. Flora de Manantlán. Plantas vasculares de la Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán Jalisco-Colima, México. Sida Botanical Miscellany No. 13. Botanical Research Institute of Texas. Fort Worth, Texas, EUA, 315 p.

**Vera**, J. 2005. Stakeholder participation in Mexican water policy. Publications in Environmental Sociology Series N° 34. Universidad de Wageningen, Holanda.

**Vera**, J. 2006. Gestión de cuencas hidrográficas. Alianza mexicana por una nueva cultura del agua. Documento base No. 10. FLACSO-México.

**Villanueva**, J. 2002. Microcuencas. Universidad Autónoma Chapingo. México, 225 p.

**Williams-Linera**, G., R. H. Manson y E. Isunza. 2002. La fragmentación del bosque mesófilo de montaña y patrones de uso de suelo en la región oeste de Xalapa, Veracruz. México. *Madera y Bosques*, 8:132-138.

**Wunder**, S. 2007. The Efficiency of Payments for Environmental Services in Tropical Conservation. *Conservation Biology*. 21(1): 48-58.

**Wünscher**, T., S. Engel y S. Wunder. 2006. Payments for environmental services in Costa Rica: increasing efficiency through spatial differentiation. *Quarterly Journal of International Agriculture*, 45 (4): 319-337.

## ANEXO 1. GLOSARIO DE TÉRMINOS

Se definieron algunos conceptos en torno al manejo del agua en cuencas, mismos que fueron ordenados de acuerdo a su utilización en esta investigación:

- **Cuenca:** Unidad del territorio en donde ocurre el agua en distintas formas y ésta se almacena o fluye a través de una red hidrográfica de cauces que convergen en uno principal hasta un punto de salida que puede ser el mar u otro cuerpo receptor interior (LAN, 2004). Área drenada por una corriente fluvial y sus tributarios (Bocco, 2004). Forma terrestre principal dentro del ciclo hidrológico que capta y concentra la oferta del agua que proviene de las precipitaciones, donde el agua interactúa en un proceso permanente y dinámico, con los sistemas físicos (recursos naturales), bióticos (flora y fauna) y socioeconómicos (usuarios de las cuencas y sus interrelaciones) (Vera, 2005). Se concibe como la unidad territorial más adecuada para la gestión integrada de los recursos hídricos (Dourojeanni *et al.*, 2002) y la negociación entre sus partes, proveedores y usuarios de la cuenca alta, media y baja (GAIA, 2005).
- **Cuenca hidrológica superficial (hidrográfica):** Superficie terrestre drenada por un sistema fluvial continuo y bien definido, cuyas aguas vierten a otro sistema fluvial (González, 2000; 2004), y sus límites están generalmente determinados por la divisoria geográfica principal de las aguas de las precipitaciones o parteaguas (INE, 2002; PLADEYRA, 2003).

- **Parteaguas:** Línea imaginaria que une los puntos de máximo valor de altura relativa entre dos laderas adyacentes pero de exposición opuesta; desde la parte más alta de la cuenca hasta su punto de emisión, en la zona hipsométricamente más baja (INE, 2002). Línea altimétrica de mayor elevación que delimita orográficamente a cuencas vecinas, marcando las variaciones de la conducción del drenaje superficial que por efectos de la pendiente confluyen hacia la parte baja y se cierra en la boquilla, un estrangulamiento natural que se forma a pie de monte (Villanueva, 2002).
- **Cuenca endorreica:** Espacio delimitado hacia adentro de la arista de la cresta superior de las sierras perimetrales o parteaguas de vertientes, donde sus arrastres fluyen por gravedad dentro de ella misma (Tovar y Mas, 1994). Geoforma cuyas laderas convergen en un punto central, y reúnen las aguas captadas por todas las vertientes confluentes, las cuales terminan su flujo superficial en ese cuerpo de agua, que puede ser un almacenamiento de agua interior, como un lago, una laguna o un embalse de presa (Morales y Rodríguez, 2007), sin verter a otras cuencas ni llegar al mar; a excepción de aquellas que tienen sumideros hacia el subsuelo y que generan flujos que afloran en otras cuencas vecinas (Sánchez, 2007).
- **Cuenca exorreica:** Superficie terrestre por donde el agua de lluvia escurre y transita o drena a través de una red de corrientes que fluyen hacia una corriente principal, y por ésta hacia un punto común de salida, llevando sus descargas hasta el mar (Morales y Rodríguez, 2007). Unidad hidrológica cuyo vertimiento de sus aguas ocurre hacia otras cuencas, usualmente hasta llegar a algún litoral marino (Sánchez, 2007).

- **Karst:** Formas topográficas formadas por la disolución de rocas sedimentarias carbonatadas (caliza, dolomita, mármol) o evaporitas (yeso, anhidrita, rocas de sal), caracterizadas por un alto rango de depresiones superficiales cerradas, un sistema de drenaje subterráneo bien desarrollado y una escasez de corrientes superficiales (González y Hernández, 1998; Field, 2002 en Bonacci *et al.*, 2009). Resulta de un proceso geomorfológico epigenético que involucra rápidos cambios a los paisajes y sus propiedades físicas, generando un relieve recientemente formado, que complica el desarrollo económico de la región y la protección de la naturaleza. La intensidad del proceso de karstificación está estrechamente relacionado con la circulación del agua subterránea y superficial (Taminskas y Marcinkevicius, 2002).
- **Dolinas:** Cavidades a cielo abierto, formadas por corrosión química en zonas con topografía comúnmente kárstica (González y Hernández, 1998). Consideradas las formas más típicas de las regiones kársticas, éstas depresiones simples presentan distintas variedades de formas y tamaños que dependen de ciertos factores que determinan su origen (como la presencia de una pendiente y del escurrimiento temporal), para propiciar su desarrollo (Mateo, 1981).
- **Zonas Funcionales Hídricas:** Divisiones de una cuenca o subcuenca a partir de la clasificación de orden del drenaje. Cada una de ellas juega un papel particular en el funcionamiento hidroecológico de la cuenca y presenta un grado de fragilidad diferente (Cotler y Priego, 2004). Generalmente se conforman de tres partes, aunque en este estudio se consideran cuatro zonas:

a) **Cabecera:** Es la zona donde nacen las corrientes hidrológicas, localizada en las porciones más altas de cada cuenca, desde el parteaguas principal hasta la intersección de las corrientes de primer orden; por su función principalmente de captación de agua, presentan la mayor fragilidad hidrológica (PLADEYRA, 2003). Es importante reguladora de agua superficial, ya que se encarga de la intercepción, condensación e infiltración del agua precipitada (Gopar, 2008).

b) **Captación-Transporte:** Porción de la cuenca localizada entre la zona de cabecera y la de emisión, que en principio capta la mayor parte del agua que entra al sistema, y transporta el agua proveniente de la zona de cabecera, por lo que a través de ésta confluyen masas de agua con diferentes características físico-químicas. Se relaciona con los escurrimientos de agua hacia la desembocadura de la cuenca; siendo la zona funcional más extensa, pues prácticamente recorre toda la cuenca y está estrechamente relacionada con la vegetación riparia. En general, estas áreas sufren una fuerte influencia antrópica por su accesibilidad al agua potable, instalándose alrededor de ellas industrias, zonas agrícolas y asentamientos humanos (Broadmeadow y Nisbet, 2004). Es un sistema importante para la provisión de agua potable, además de regular el flujo de nutrimentos y sedimentos, mantener una temperatura constante y funcionar como filtro ante contaminantes de las zonas funcionales contiguas. (Gopar, 2008).

c) **Emisión:** Se localiza en la parte baja de una cuenca de tipo exorreico. Se caracteriza por recibir el agua de las otras dos zonas más altas (cabecera y captación-transporte), por lo que es la más caudalosa y con menor energía del relieve, ya que comprende el área ocupada por la corriente de mayor orden

dentro de la cuenca. Sus límites se ubican al reconocer las dos últimas corrientes de segundo orden y el inicio de aquellas corrientes de primer orden que se encuentran por debajo del nivel de ella, en la parte baja de la cuenca. Brinda los servicios ambientales de regulación y provisión que prestan las otras dos zonas funcionales, pues ofrece la provisión de agua potable, mantiene un clima constante, la fertilidad del suelo, y controla los flujos, inundaciones y arrastre de materiales por la escorrentía durante las precipitaciones y los eventos extraordinarios como huracanes (Maass *et al.*, 2005). No obstante, esta área se está viendo afectada por el aumento significativo y gradual de coberturas secundarias y de asentamientos humanos (Gopar, 2008).

d) **Emisión-Confinamiento:** Se localiza en la parte baja de una cuenca de tipo endorreico. Se delimitan de la misma manera que las zonas funcionales de emisión, a diferencia que las corrientes de la parte más baja de la cuenca son emitidas a un cuerpo de agua permanente o son confinadas e infiltradas a una depresión como las dolinas que se forman en territorios kársticos.

- **Disección horizontal:** Densidad de drenaje o corrientes hídricas contenidas en una determinada área, que reflejan principalmente el grado de erosión del relieve (PLADEYRA, 2003). Indica la longitud de corrientes de agua que atraviesan un  $\text{km}^2$  (Spiridonov, 1981; Gopar, 2008). En particular cuando este índice morfométrico es alto en una cuenca o zona funcional, esto indica una alta disponibilidad o captación de agua en dicho territorio. En este caso se tomó como la suma de la longitud (km) de los ríos encontrados por cada zona funcional de cada subcuenca definida.

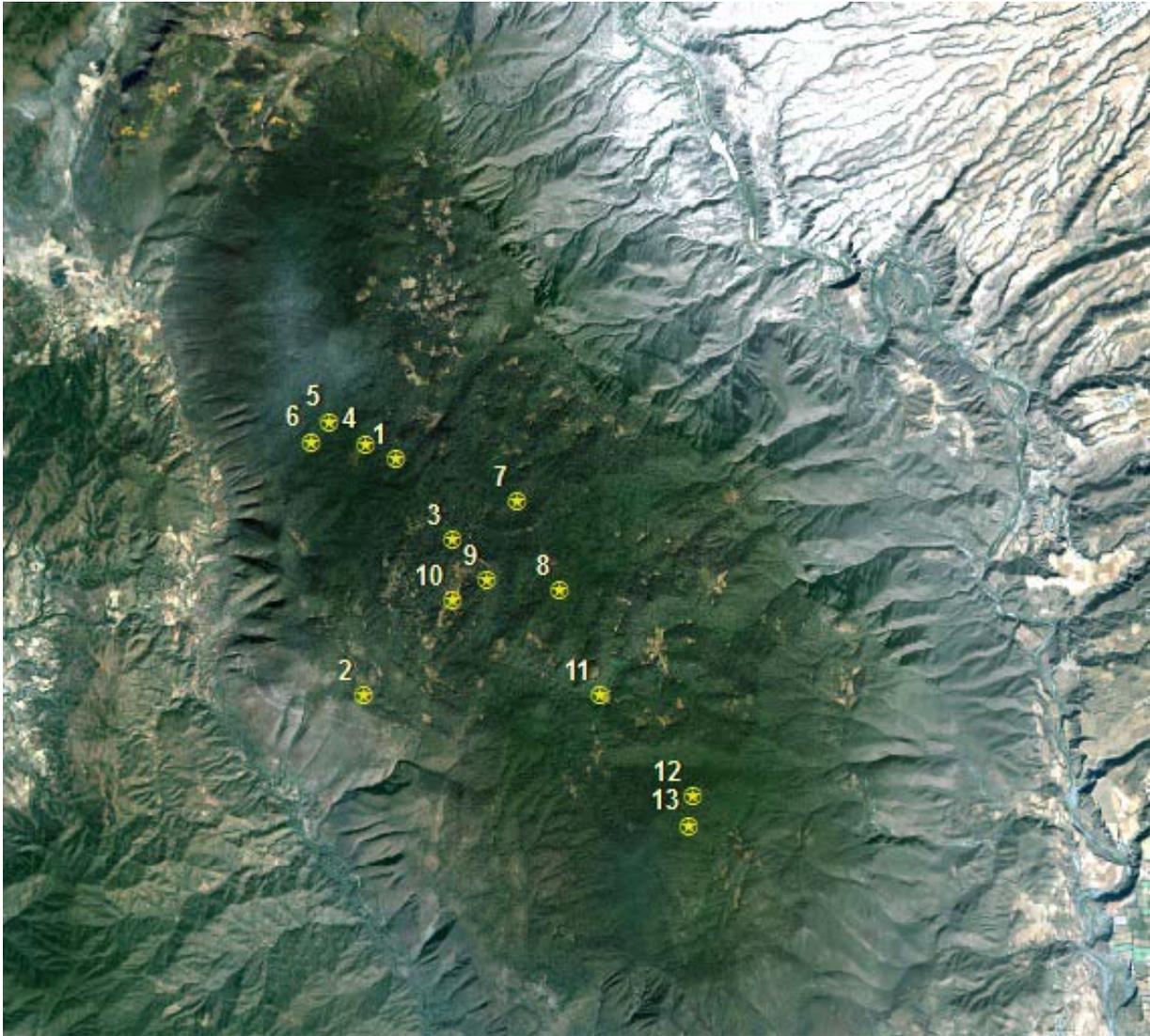
- **Potencial natural:** Capacidad productiva de una unidad o complejo natural para ciertos tipos y condiciones (actuales y futuras) de utilización, con el objetivo de satisfacer las necesidades de la sociedad humana a través de determinadas funciones socio-económicas que dependen de sus propiedades naturales (Arceo y Salinas, 1994). Rendimiento económico de un paisaje (Neef, 1966 en Bastian, 2008) que no depende de su explotación real, sino de las características físicas de su territorio (como los parámetros geológicos, el clima, suelo, agua, biota y uso de suelo), para poder evaluar más adecuadamente sus funciones (Bastian y Röder, 2002; Makhdoum, 2008) hacia una actividad socioeconómica específica, con el fin de generar escenarios alternativos para la planificación ambiental (Travieso, 2005). Dicha capacidad socioeconómica del medio geográfico revela las particularidades espaciales y temporales de los distintos recursos naturales vinculados con la economía (Luna, 1999). En este trabajo se pretende determinar espacialmente (a partir de las características del relieve, la hidrografía y la cobertura vegetal) el potencial natural para la prestación de servicios ambientales hídricos y su correspondencia con la tenencia actual de la tierra en Cerro Grande, con el fin de aportar propuestas tanto ambiental como socioeconómicamente sustentables para el ordenamiento ecológico de dicho territorio.
- **Servicios Ambientales Hídricos:** Condiciones y procesos por los cuales los ecosistemas naturales y las especies que los constituyen, sostienen y satisfacen las necesidades humanas (Daily, 1997); bienes y servicios que recibe la sociedad como producto de las funciones ecosistémicas (Costanza, 1997). Dichos beneficios que se obtienen de los ecosistemas (provisión, regulación,

culturales y de sustento) (MEA, 2005b), se enfatizan en el abastecimiento del agua y su disponibilidad a diferentes niveles espaciotemporales. Resultan del ciclo hidrológico como un producto de la capacidad de los ecosistemas para captar agua y así mantener la oferta hídrica disponible para beneficio de la sociedad (Costanza *et al.*, 1998 en Fregoso, 2006). En este estudio se hizo énfasis en la presencia de la cobertura vegetal natural (bosques y selvas) como elemento imprescindible del paisaje para la captación y provisión de agua, ya que proporcionan estabilidad al paisaje, protegen el suelo, ayudan en la retención de humedad y en el almacenaje y reciclaje de nutrientes (Myers, 1997); mantienen la capacidad de recarga de los mantos acuíferos, la calidad de agua, la reducción de la carga de sedimentos cuenca abajo, la reducción de las corrientes durante precipitación extrema, la conservación de manantiales, el mayor volumen de agua superficial disponible en época de secas y reducción del riesgo de inundaciones (DOF, 2004 en Pérez-Maqueo *et al.*, 2006).

- **Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH):** Programa gubernamental manejado desde el 2004 por la SEMARNAT a través de la CONAFOR, como un mecanismo financiero para incentivar la conservación, mediante la asignación de un pago o retribución a los beneficiarios, dueños o legítimos poseedores de terrenos con recursos forestales, por los servicios ambientales hidrológicos que presta el buen estado de conservación de sus bosques y selvas (Pérez-Maqueo *et al.*, 2006). Los criterios técnicos para el PSAH establecen que las zonas elegibles que presten el recurso hídrico, deben cubrir los requisitos señalados por las reglas de operación (DOF, 2009; INE, 2010; CONAFOR, 2011) para poder brindar el apoyo a los propietarios de la

tierra que lo solicitan; tales como contener predios con una cobertura forestal igual o mayor al 50% de la superficie total, correspondiente a bosques y selvas, los cuales se localicen en zonas críticas para la recarga de acuíferos, estén sobreexplotados o con problemas de escasez, de calidad del agua, o en zonas de riesgo de desastres hidrológicos, estén vinculados con el abastecimiento de agua a centros poblacionales de más de 5,000 habitantes y se ubiquen dentro de las montañas listadas para el PSAH o como parte de un Área Natural Protegida (DOF, 2004).

## ANEXO 2. BITÁCORA FOTOGRÁFICA



Estaciones de campo efectuadas en Cerro Grande.

**Estación no. 1 (Ejido La Laguna):**

Zona Funcional de Captación-Transporte de una subcuenca endorreica con alta densidad de drenaje y cubierta de Bosque de encino y elementos de Bosque Mesófilo en laderas de 10-20° de inclinación. Se localiza al interior de la Zona Núcleo de Cerro Grande. Las fuentes de humedecimiento en la zona se dan por precipitación, escurrimiento superficial y niebla. Zona Elegible para la prestación de SAH, aunque aún no se ha contemplado en el programa de CONAFOR.



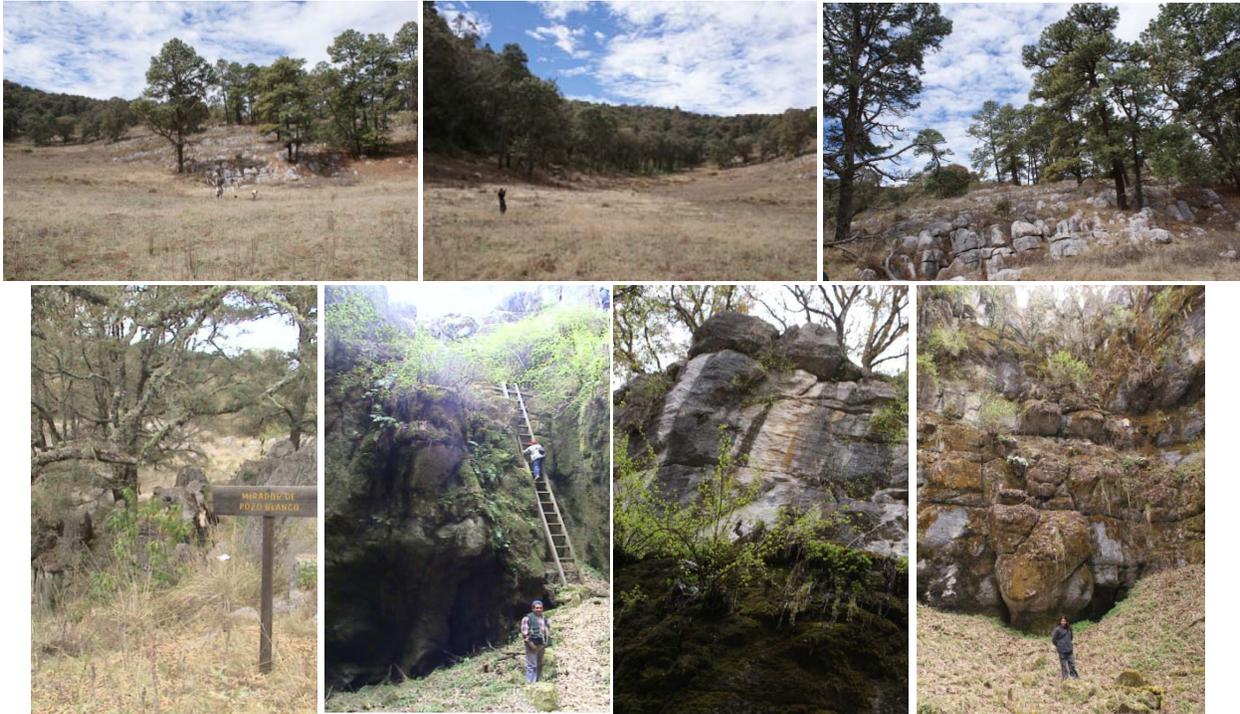
**Estación no. 2 (Ejido Platanarillos):**

Zona Funcional de Captación-Transporte de una subcuenca exorreica con alta densidad de drenaje y cubierta de Selva Baja Caducifolia en laderas de 30-45° de inclinación. Las fuentes de humedecimiento en la zona se dan por precipitación y escurrimiento superficial. Zona Elegible para la prestación de SAH e implementado desde el 2009 en el programa de CONAFOR.



### **Estación no. 3 (Mirador de Pozo Blanco, Ejido Toxín):**

Zona Funcional de Emisión-Confinamiento de una subcuenca endorreica con media densidad de drenaje, cubierta por Pastizal inducido (avenilla) en la zona baja y rodeada de Bosque de Encino, Pino y Bosque Mesófilo de Montaña. Las fuentes de humedecimiento en la zona se dan por precipitación, escurrimiento superficial, niebla y humedecimiento del fondo de las depresiones. Zona No Elegible para la prestación de SAH según esta investigación, pero considerado de gran relevancia para su restauración y conservación al estar dentro de la Zona Núcleo de Cerro Grande. En el 2008 esta área fue implementada dentro del programa PSAH de CONAFOR, siendo beneficiario en este caso el ejido de La Laguna, a pesar de encontrarse dentro de los límites de Toxín.



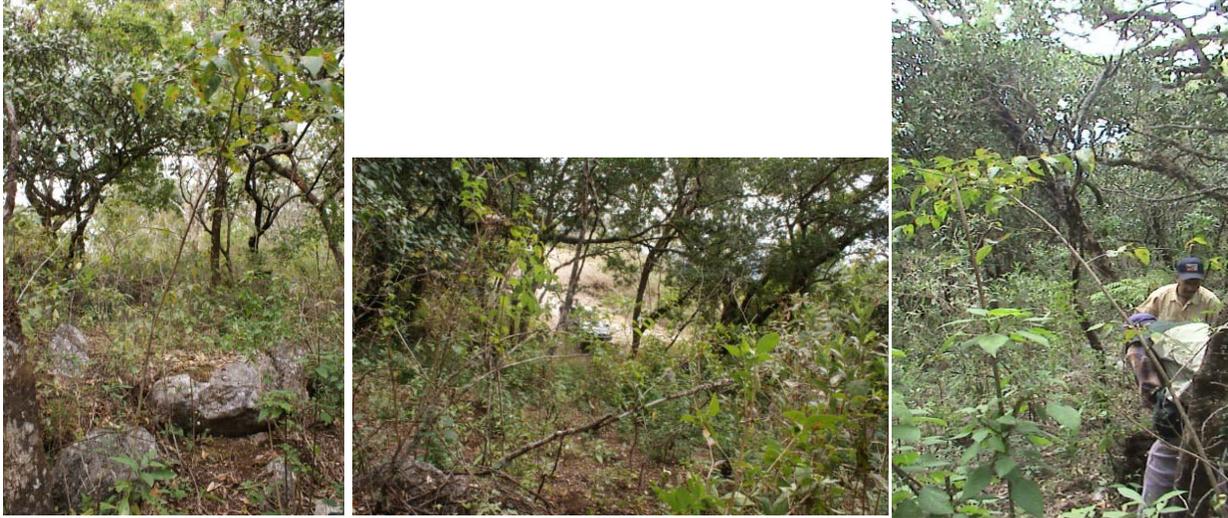
### **Estación no. 4 (Ejido La Laguna):**

Zona Funcional de Captación-Transporte de una subcuenca endorreica con alta densidad de drenaje y cubierta por Bosque Mesófilo de Montaña, en laderas de 10-20° de inclinación. Las fuentes de humedecimiento en la zona se dan por precipitación, escurrimiento superficial y neblina. Localizada al interior de la Zona Núcleo de Cerro Grande. Zona Elegible para la prestación de SAH según esta investigación, pero aún no considerado dentro del programa PSAH de CONAFOR.



**Estación no. 5 (Ejido La Laguna):**

Zona Funcional de Captación-Transporte de una subcuenca endorreica con alta densidad de drenaje y cubierta por Bosque de Encino, en laderas de 10-20° de inclinación. Las fuentes de humedecimiento en la zona se dan por precipitación, escurrimiento superficial y subsuperficial. Se localiza al interior de la Zona Núcleo de Cerro Grande. Zona Elegible para la prestación de SAH según esta investigación, pero aún no se implementa en el programa PSAH de CONAFOR.



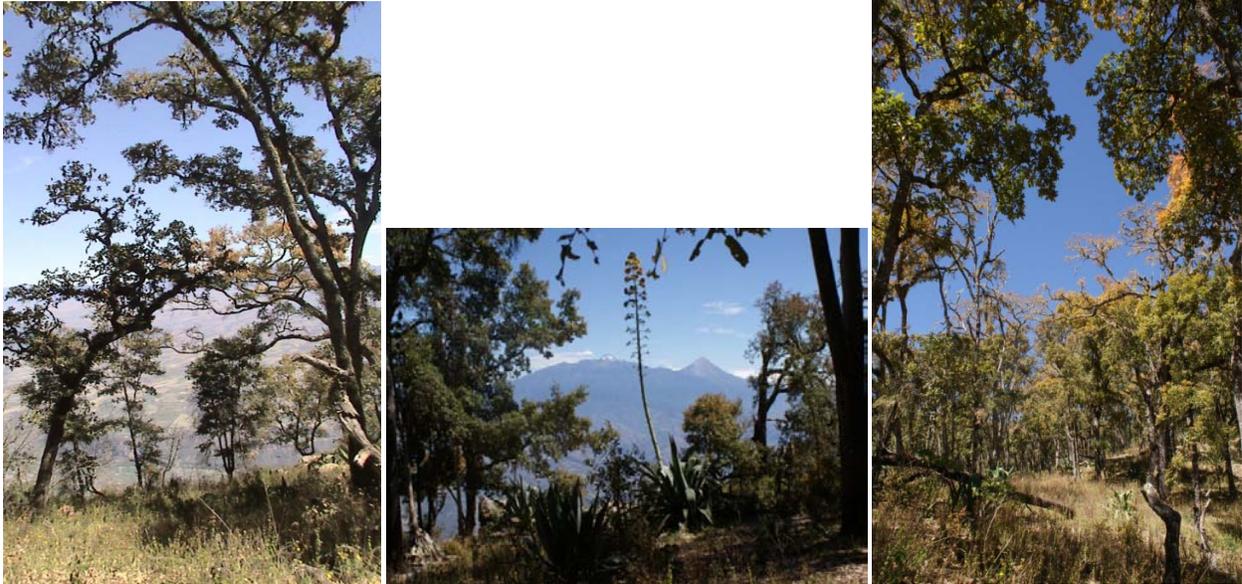
**Estación no. 6 (Propiedad Privada):**

Zona Funcional de Captación-Transporte de una subcuenca endorreica con alta densidad de drenaje y cubierta por Selva Baja Caducifolia, en laderas de 5-10° de inclinación. Existe una fuerte presencia de carsolitos en la superficie. Las fuentes de humedecimiento en la zona se dan por precipitación, escurrimiento superficial y subsuperficial. Se localiza al interior de la Zona Núcleo de Cerro Grande. Zona Elegible para la prestación de SAH según esta investigación, pero aún no es considerada en el programa de CONAFOR.



**Estación no. 7 (Mirador de los Siete Palos, Ejido La Laguna):**

Zona Funcional de Cabecera de una subcuenca exorreica con alta densidad de drenaje y cubierta por Bosque Mixto de Encino y Pino, en complejo cumbre con inclinación de 5-10° y junto a la ladera Oriental con pendientes de casi 90°. Las fuentes de humedecimiento en la zona se dan por precipitación y niebla. Zona Elegible para la prestación de SAH, aunque no se ha agregado al programa de CONAFOR.



**Estación no. 8 (El Timbe, Ejido El Terrero):**

Zona Funcional de Cabecera de una subcuenca exorreica con alta densidad de drenaje y cobertura dominante de Bosque de Pino (*Pinus pseudostrabus*), en ladera de 20-30° de inclinación. Las fuentes de humedecimiento en la zona se dan por precipitación, niebla, escurrimiento superficial y subsuperficial. Zona Elegible para la prestación de SAH, aunque no se ha sumado al programa de CONAFOR.



### **Estación no. 9 (El Tapeiste, Ejido Toxín):**

Zona Funcional de Captación-Transporte de una subcuenca endorreica con alta densidad de drenaje y cobertura dominante de Bosque de Encino, sobre la meseta kárstica con una superficie de 3-5° de inclinación. Las fuentes de humedecimiento en la zona se dan por precipitación, niebla, escurrimiento subsuperficial e infiltración. Se localiza al interior de la Zona Núcleo de Cerro Grande. Zona Elegible para la prestación de SAH según este trabajo de investigación, e implementada en el programa de PSAH de la CONAFOR desde el 2009.



### **Estación no. 10 (La Pila Vieja, Ejido El Terrero):**

Zona Funcional de Emisión-Confinamiento de una subcuenca endorreica con baja densidad de drenaje y cubierta de Bosque de Oyamel (*Abies religiosa*) con elementos de Pino, formada por dolinas kársico-sufosivas (se comunican entre ellas por medio de un resumidero). Las fuentes de humedecimiento en la zona se dan por precipitación, niebla, escurrimiento subsuperficial y humedecimiento del fondo de las depresiones. Se localiza al interior de la Zona Núcleo de Cerro Grande. Zona Elegible para la prestación de SAH según este trabajo de investigación, e implementada desde el 2008 en el programa de PSAH de la CONAFOR.



**Estación no. 11 (Ejido Lagunitas):**

Zona Funcional de Cabecera de una subcuenca endorreica con alta densidad de drenaje y cubierta de Bosque de Encino, en laderas de 10-20° de inclinación. Las fuentes de humedecimiento en la zona se dan por precipitación, niebla, escurrimiento superficial y subsuperficial. Zona Elegible para la prestación de SAH, pero aún no se considera dentro del programa de PSAH de la CONAFOR.



**Estación no. 12 (Comunidad Indígena Zacualpan):**

Zona Funcional de Captación-Transporte de una subcuenca exorreica con muy alta densidad de drenaje y cubierta de Selva Baja Caducifolia, en laderas de 30-45° de inclinación. Las fuentes de humedecimiento en la zona se dan por precipitación, escurrimiento superficial y subsuperficial. Zona Elegible para la prestación de SAH, pero aún no se considera dentro del programa de PSAH de la CONAFOR.



**Estación no. 13 (Comunidad Indígena Zacualpan):**

Zona Funcional de Captación-Transporte de una subcuenca exorreica con alta densidad de drenaje y cubierta de Selva Baja Caducifolia, en laderas de 20-30° de inclinación. Existe una gran abundancia de karsolitos en superficie, deslizamiento y caída de bloques. Las fuentes de humedecimiento en la zona se dan por precipitación y escurrimiento subsuperficial. Zona Elegible para la prestación de SAH, pero aún no se implementa dentro del programa de PSAH de la CONAFOR.

