



**CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS  
DEL NOROESTE, S. C.**

---

**Programa de Estudios de Posgrado**

**Indicadores e índice de sustentabilidad para especies  
sujetas a aprovechamiento comercial: el caso de  
ecosistemas forestales**

**T E S I S**

Que para obtener el grado de

**Doctor en ciencias**

**P r e s e n t a**

**Martín Martínez Salvador**

**La Paz, B. C. S., Octubre de 2005.**

## ACTA DE LIBERACIÓN DE TESIS

En la ciudad de La Paz, B.C. S., siendo las 12 horas del día \_\_\_\_ del mes de \_\_\_\_\_ de 2005, se procedió por los abajo firmantes, miembros de la Comisión Revisora de Tesis avalada por la Dirección de Estudios de Posgrado del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., a liberar la Tesis de Grado titulada:

### **Indicadores e Índice de sustentabilidad para especies sujetas a aprovechamiento comercial: El caso de ecosistemas forestales**

Presentada por el alumno:

Martín Martínez Salvador

Aspirante al Grado de DOCTOR EN CIENCIAS EN EL USO, MANEJO Y PRESERVACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES CON ORIENTACIÓN EN  
**ECOLOGÍA**

---

Después de intercambiar opiniones los miembros de la comisión manifestaron su APROBACIÓN DE LA TESIS, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

#### LA COMISIÓN REVISORA

---

DR. RICARDO DAVID VALDEZ CEPEDA  
CO-TUTOR

---

DR. ENRIQUE TROYO DIEGUEZ  
CO-TUTOR

---

DR. LUIS FELIPE BELTRAN MORALES  
CO-TUTOR

---

DR. BERNARDO MURILLO AMADOR  
CO-TUTOR

---

DR. ALFREDO ORTEGA RUBIO  
DIRECTOR DE TESIS

---

DRA. THELMA ROSA CASTELLANOS CERVANTES  
DIRECTORA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**Esta Tesis fue dirigida por:**

**DR. Alfredo Ortega Rubio** Centro de Investigaciones Biológicas del  
Noroeste S.C.  
Programa de Planeación ambiental y  
Conservación

**El comité tutorial y el de revisión estuvo integrado por:**

**Dr. Enrique Troyo Dieguez** Centro de Investigaciones Biológicas del  
Noroeste S.C.  
Programa de Agricultura en Zonas Áridas  
**Dr. Luis Felipe Beltrán Morales** Centro de Investigaciones Biológicas del  
Noroeste S.C.  
Programa de Planeación ambiental y  
Conservación  
**Dr. Bernardo Murillo Amador** Centro de Investigaciones Biológicas del  
Noroeste S.C.  
Programa de Agricultura en Zonas Áridas  
**Dr. Ricardo David Valdez Cepeda** Universidad Autónoma Chapingo  
Centro Regional Universitario Centro Norte

**El Jurado en el examen estuvo integrado por:**

**Dr. Alfredo Ortega Rubio** Centro de Investigaciones Biológicas del  
Noroeste S.C.  
Programa de Planeación ambiental y  
Conservación  
**Dr. Enrique Troyo Dieguez** Centro de Investigaciones Biológicas del  
Noroeste S.C.  
Programa de Agricultura en Zonas Áridas  
**Dr. Luis Felipe Beltrán Morales** Centro de Investigaciones Biológicas del  
Noroeste S.C.  
Programa de Planeación ambiental y  
Conservación  
**Dr. Bernardo Murillo Amador** Centro de Investigaciones Biológicas del  
Noroeste S.C.  
Programa de Agricultura en Zonas Áridas  
**Dr. Ricardo David Valdez Cepeda** Universidad Autónoma Chapingo  
Centro Regional Universitario Centro Norte  
**Suplente: Dr. José Luís García Hernández** Centro de Investigaciones Biológicas del  
Noroeste S.C.  
Programa de Agricultura en Zonas Áridas

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo brindado a través del programa de becas (137789) y financiamiento otorgado para la realización de mis estudios doctorales.

Al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. por darme la oportunidad de formar parte de esta prestigiada institución.

Al personal de posgrado por la comprensión y el apoyo brindado, quedo eternamente agradecido.

Al Dr. Alfredo Ortega Rubio quien ha sido un gran maestro en mi proceso de formación, y a los miembros del comité tutorial Dr. Luis Felipe Beltrán Morales, Dr. Enrique Troyo Dieguez, Dr. Bernardo Murillo Amador y Dr. Ricardo David Valdez Cepeda por su gran apoyo y por su invaluable Amistad.

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias por darme la oportunidad de desarrollarme como profesional en una institución comprometida con el área de investigación en el sector Agropecuario y Forestal de México.

A todo el personal del Centro Regional Universitario Norte Centro de la Universidad Autónoma Chapingo por su colaboración y apoyo durante mi estancia de trabajo en el estado de Zacatecas.

Agradezco especialmente a la Organización de Magueyeros Zacatecanos, por el apoyo brindado para la integración de la presente investigación, Agradezco la incondicional amistad del Ing. José Luis Medina Rodríguez, Director de dicha organización.

## **DEDICATORIA**

*A mis Padres y Hermanos por la tolerancia y el apoyo que siempre me han brindado*

*A mis compañeros de trabajo, por su gran amistad y apoyo incondicional*

*A Salvador Noe, Salvador Aschary, Alexis y Amy, por ser mi fuente inagotable de cariño.*

## CONTENIDO GENERAL

	<b>Página</b>
<b>CONTENIDO GENERAL</b>	<b>i</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>ii</b>
<b>ÍNDICE DE GRÁFICAS</b>	<b>iii</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>iv</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>vi</b>
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 El desarrollo sustentable	3
1.1.1 Desarrollo sustentable y economía.	5
1.1.2. Indicadores de sustentabilidad.	6
1.1.3 La evaluación de sustentabilidad	8
1.2 Sustentabilidad de ecosistemas forestales.	10
1.2.1 Procesos de monitoreo de sustentabilidad en ecosistemas forestales.	11
1.3 Escalas de monitoreo de los indicadores	12
1.3.1 El monitoreo de sustentabilidad a escala local	13
1.3.2. Importancia y utilidad del uso de indicadores para evaluar sustentabilidad forestal.	15
1.4 Entorno de los recursos forestales de zonas áridas.	16
1.4.1 Los recursos forestales en el sureste de Zacatecas.	17
1.4.2 Los Agaves	18
1.4.3 Origen de los Agaves	19
1.4.4 <i>Agave salmiana</i> ssp. <i>crassispina</i>	19
1.5. OBJETIVOS	22
1.5.1 Objetivo general	22
1.5.2. Objetivos específicos	22
Capítulo 2. MATERIALES Y MÉTODOS	23
2.1 Selección de los indicadores de sustentabilidad	24
2.2 Monitoreo y recopilación de información.	29
2.3 Análisis de la información.	34
Capítulo 3. RESULTADOS	36
3.1 Área de distribución del Agave y su descripción poblacional.	36
3.2 Indicadores de sustentabilidad.	40
3.3 Índices de sustentabilidad.	54
3.3.1 Índice de sustentabilidad ecológico forestal y su relación con los índices	

Social y económico.	57
Capitulo 4. DISCUSIÓN	62
Capitulo 5. CONCLUSIONES.	68
Capitulo 6. LITERATURA CITADA	71
Anexo A	80
Anexo B	84
Anexo C	85
Anexo D	91
Anexo E	93

**INDICE DE FIGURAS**

<b>NUM</b>	<b>FIGURA</b>	<b>Página</b>
<b>1</b>	Área de estudio	24
<b>2</b>	Área de distribución del Agave.	37



## INDICE DE GRÁFICAS

NUM	GRAFICA	Página
1	Estructura de las poblaciones de Agave y estructura poblacional para la región sureste del estado de Zacatecas.	38
2	Indicador social tasa de crecimiento poblacional que muestra tendencias con el índice de sustentabilidad para la región de distribución del Agave para el periodo 1990 - 2001.	44
3	Indicador social densidad de población que muestra tendencias con el índice de sustentabilidad para la región de distribución del Agave para el periodo 1990 - 2001.	44
4	Indicador socioeconómico acceso a servicios básicos que muestra tendencias con el índice de sustentabilidad para la región de distribución del Agave para el periodo 1990 - 2001.	45
5	Indicador socioeconómico Población Económicamente Activa y desempleo que muestra tendencias con el índice de sustentabilidad para la región de distribución del Agave para el periodo 1990 - 2001.	45
6	Indicador socioeconómico ingreso mensual por jefe de familia que labora en el sector primario que muestra tendencias con el índice de sustentabilidad para la región de distribución del Agave para el periodo 1990 - 2001.	46
7	Indicador ecológico % cambio de uso del suelo que muestra tendencias con el índice de sustentabilidad para la región de distribución del Agave para el periodo 1990 - 2001.	49
8	Indicador ecológico % de cobertura vegetal que muestra tendencias con el índice de sustentabilidad para la región de distribución del Agave para el periodo 1990 - 2001.	49
9	Indicador ecológico condición de erosión de suelo y Manto freático que muestra tendencias con el índice de sustentabilidad para la región de distribución del Agave para el periodo 1990 - 2001.	50
10	Indicador ecológico superficies aprovechada y reforestada de Agaves que muestra tendencias con el índice de sustentabilidad para la región de distribución del Agave para el periodo 1990 - 2001.	50
11	Indicador ecológico densidad de Agaves que muestra tendencias con el índice de sustentabilidad para la región de distribución del Agave para el periodo 1990 - 2001.	51
12	Indicador ecológico tasa de reclutamiento que muestra tendencias con el índice de sustentabilidad para la región de distribución del Agave para el periodo 1990 - 2001.	51
13	Índice de sustentabilidad para el área de distribución del Agave.	56
14	Desempeño del índice de sustentabilidad social para cada municipio del área de distribución el Agave.	58
15	Desempeño del índice de sustentabilidad económico para cada municipio del área de distribución el Agave.	59
16	Desempeño del índice de sustentabilidad Ecológico Forestal para cada municipio del área de distribución el Agave.	60

**INDICE DE TABLAS**

<b>NUM</b>	<b>TABLAS</b>	<b>Página</b>
<b>I</b>	Indicadores preliminares seleccionados para la construcción de los indicadores de sustentabilidad.	26
<b>II</b>	Indicadores definitivos usados para la construcción de los índices de sustentabilidad	27
<b>III</b>	Superficie de distribución del maguey, según densidad de Agaves.	38
<b>IV</b>	Superficie de distribución y abundancia de <i>Agave salmiana</i> en el sureste de Zacatecas, México.	39
<b>V</b>	Desempeño de los indicadores de sustentabilidad en la región de distribución del Agave.	41
<b>VI</b>	Coefficientes de correlación de los indicadores de sustentabilidad con el índice de sustentabilidad construido para el área de distribución del Agave.	53
<b>VII</b>	Desempeño del índice de sustentabilidad en el área de distribución del Agave	56

## RESUMEN

La sustentabilidad involucra la integración de los sistemas económico, ecológico y social en un proceso práctico de manejo y conservación de los recursos naturales. Su meta permanente es el incremento o cuando menos el no decremento del capital, incluido el capital natural, relacionando además este incremento con una mejora en la calidad de vida de la sociedad.

En México, la actividad forestal representa una importante alternativa de subsistencia para numerosos habitantes de diferentes ecosistemas (Templado, Árido y Tropical). Por otro lado, esta actividad repercute en la conservación de recursos estratégicos de interés nacional como agua, suelo y biodiversidad.

Como una alternativa inédita para el estudio de la sustentabilidad de la actividad forestal, se ha tomado como modelo de trabajo en ecología de zonas áridas, a la región de distribución del Agave (*Agave salmiana* ssp *crassispina*) en el sureste de Zacatecas, Méx., por representar un caso especial de uso del recurso. En los últimos años el aprovechamiento del Agave se ha incrementado considerablemente; sin embargo, no ha sido notable un incremento económico y mejoras en el bienestar social de la población.

El establecimiento del método de evaluación involucró el uso de 35 Indicadores, 7 correspondientes al sistema social, 5 al sistema económico y 23 más al sistema ecológico forestal. El periodo evaluado fue de 1990 al año 2001, y comprendió tres municipios.

Los indicadores sociales relacionados con población incrementaron en el periodo estudiado; sin embargo, en acceso a servicios el incremento fue menor. Por su parte, los indicadores económicos mostraron tendencias muy débiles de incremento en el tiempo. En el caso de los indicadores del sistema ecológico forestal, estos presentaron un decremento

paulatino en el periodo 1990 – 1997 y un decremento más brusco a partir de 1998; esto coincidió con un aprovechamiento más intensivo del Agave.

El comportamiento de los indicadores se reflejó en un decremento acelerado del índice de sustentabilidad a partir de 1997. Los valores del índice fueron menores a 0.60 para todo el periodo estudiado. Estos valores lo ubican en un grado de sustentabilidad MEDIO BAJO, lo cual indica que se requieren grandes esfuerzos por mejorar la calidad de vida de los habitantes de la región, elevar los niveles de desarrollo económico, así como la promoción de un mejor control sobre el aprovechamiento de los recursos.

En este trabajo se incluye de manera inédita, en su metodología, la utilización de los atributos poblacionales de una especie para construir indicadores, los cuales por su importancia tienen un elevado peso específico en el comportamiento del índice de sustentabilidad.

La metodología desarrollada es adecuada para evaluar el desempeño de la sustentabilidad de cualquier especie vegetal, animal, terrestre o acuática sujeta a aprovechamiento forestal y puede ser aplicada tanto a nivel municipal como a nivel de predios bajo manejo, como en el caso de aquellos que tienen autorización de aprovechamiento por parte de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. La utilización de la metodología aquí propuesta para pesquerías, por ejemplo, constituye una línea de investigación que merece ser explorada.

**Palabras clave:** Sustentabilidad, Indicadores de Sustentabilidad, Especies sujetas a Explotación Comercial, Índice de sustentabilidad.

## ABSTRACT

Sustainability integrates economical, social and ecological systems into into a proces of practical management and conservation of the natural resources. Its permanent goal is to increase or at least not to reduce resources; where an increment means better human life quality.

At Mexico, forestry activities represent, in one hand, an important economical aspect for inhabitants in different ecosystems (temperate, arid, and tropical). On the other hand, these activities have an impact on water, soil and biodiversity conservation.

As an alternative to study forestry activities focusing on its sustainability, the suttheast of Zacatecas state was used as a model. This place is where *Agave (Agave salmiana ssp crassispina)* is distributed. For the last years, Agave's harvest has been increasing; however, economical indicators or social life quality hasn't increased as well.

In the establishment of the evaluation method, 35 indicators were used; 7 correspond to the social system, 5 to the economical system, and 23 to the forest ecological system. The evaluation period was from 1990 to 2001 and included three counties.

Social indicators increased during the period of the study; however, accesses to services had lower increases. Economical indicators did show weak increase trends throught time. Forest ecological indicators decrease slowly through the period 1990 – 1997, and decrease abruptly from 1998 to 2001 due to an intensive Agave's harvest.

Indicators behavior caused an accelerated decrement on sustainability index since 1997. Index values were under 0.60 for the whole study period. Those values represent a MEDIUM LOW sustainability degree, which means the necessity of an increment in human life quality, economical levels, and a development of an Agave's harvest control.

The present study includes, for the first time, the use of population attributes of a specie in order to build indicators which have a big specific weight in the sustainability index behavior.

The methodology of this study can be used for evaluation of sustainability on any terrestrial or aquatic plant or animal species. In addition, it can be applied at county level or land management unit, like the lands that have management permits from the Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

The application of this methodology on fishery can open a new important research line.

**Key words:** Sustainability, Sustainability Indicators, Economical Important Species, Sustainability Index.

## Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

A partir de la Conferencia Mundial de Naciones Unidas sobre Medio Ambiente Humano en Estocolmo en 1972, se reconoce la gravedad de los problemas ambientales y su vinculación con los modelos de desarrollo. Algunos países instrumentaron políticas para la reducción del crecimiento poblacional creyendo que ésta era la solución a la problemática del ambiente; sin embargo, la iniciativa no se reflejó en la reducción de los índices de deterioro ambiental, por lo que la Organización de Naciones Unidas (ONU) integró una comisión que realizó un diagnóstico sobre la situación ambiental vinculada con el desarrollo económico e industrial. Esta comisión presentó en 1987 los resultados de su trabajo, el cual es conocido como “Nuestro Futuro Común” o “Informe Brundtland”; en él, se señala que para superar la crisis general del modelo económico es necesario articular el medio ambiente con las políticas de desarrollo, estableciendo un nuevo esquema de trabajo denominado *Desarrollo Sustentable*, basado principalmente en el combate de la pobreza, la búsqueda del incremento en niveles económicos y la preservación de los recursos naturales tanto en la actualidad como en el futuro.

Posteriormente, durante la década de los noventa, la ONU celebró una serie de importantes conferencias sobre temas de preocupación mundial relacionados con la sustentabilidad de las actividades productivas de la sociedad. Como resultado del arduo trabajo se acordaron objetivos, lineamientos y planes de acción encaminados a la conservación de los recursos naturales, resaltando en la Conferencia de Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo en 1992 (Cumbre de Río) el interés por lograr el desarrollo equitativo y, a partir de entonces se han intensificado los esfuerzos para crear acciones locales, nacionales, regionales y globales para propiciar el desarrollo sustentable.

En el sureste del estado de Zacatecas, Méx., los ecosistemas forestales semiáridos con vegetación microfila, espinosa y rosetofila forman un mosaico complejo de comunidades vegetales, donde el Maguey (*Agave salmiana* ssp. *crassispina*) es una especie con gran potencial para la elaboración de bebidas fermentadas y destiladas y, al igual que otras especies del ecosistema forestal como *Acacia* spp (huizachez), *Opuntia* spp. (nopales), *Prosopis* spp. (mezquites) y algunas gramíneas, se aprovecha como forraje para el ganado que se mantiene en sistemas extensivos de manejo. Aunado al aprovechamiento histórico tradicional de los recursos, durante la década de los 90's en el siglo pasado, el auge de la comercialización del tequila generó una fuerte demanda de materia prima, por lo que el maguey representó una alternativa para cubrir una parte de la demanda de azúcares complementarios para la elaboración de este producto; no obstante, las condiciones de mercado y el desconocimiento de los valores económico y ecológico de los recursos han propiciado un decremento en el capital natural, bajo impacto económico y, por ende, no se aprecia un desarrollo en la calidad de vida de los habitantes de la región.

Situaciones similares han sido identificadas en diversos sectores productivos de distintas regiones del mundo. Al respecto, se han realizado iniciativas que buscan integrar índices que diagnostiquen el comportamiento de sistemas, subsistemas y factores relacionados con la calidad de vida y la estabilidad de los recursos naturales. Entre los principales modelos se encuentran el Índice de Desarrollo Humano (IDH), cuyo valor óptimo hace referencia a que los seres humanos deben disfrutar de una vida prolongada y saludable, adquirir conocimientos y tener acceso a los recursos necesarios para lograr un nivel de vida digno; el Índice de Marginación (IM) que involucra indicadores de grado educativo, acceso a servicios y el nivel de ingreso de la sociedad; y más recientemente se desarrolló el Índice de



Sustentabilidad Ambiental (ISA) que evalúa la calidad del aire en las ciudades, la calidad de los recursos hídricos, los niveles de consumo de energía, la degradación de suelos y la situación de la flora y la fauna. Estos índices son ejemplos de procesos que evalúan de forma integral la influencia de distintas variables, indicadores e índices en el proceso dinámico de desarrollo económico, estabilidad social y preservación de los recursos naturales.

Con la premisa de que las actividades productivas y su relación con el uso, manejo y preservación de los recursos naturales forman un sistema complejo y dinámico, cuya estructura y función varía de acuerdo con la dirección e intensidad de los factores de sus componentes, la presente investigación representa un esfuerzo inédito por integrar un modelo para la evaluación del desempeño de la sustentabilidad a nivel local incorporando un grupo de indicadores propios del sistema forestal, los cuales fueron derivados de una caracterización ecológica de las áreas en las que se distribuye de manera natural el Maguey (*Agave salmiana*, ssp *crassispina*), así como un grupo de indicadores derivados de los atributos de la estructura y dinámica de las poblaciones estudiadas, a fin de contar con un diagnóstico preliminar que indique la condición actual de las comunidades vegetales de la región de estudio y su relación con la sociedad que da uso y manejo a las mismas.

### **1.1 El desarrollo sustentable**

El desarrollo sustentable es una de las más novedosas, pero antiguamente conocida, alternativa de desarrollo socioambiental en constante búsqueda por integrar la necesidad productiva, con la obligación no sólo de mantener el equilibrio ecológico, sino de restaurar superficies deterioradas, o con riesgo de degradación (Pedroza, 1998). Este nuevo esquema

puede ser comprendido a partir de cuatro dimensiones, la económica, la social, ecológica e institucional; cada dimensión es compleja, dinámica y además debe ser considerada de manera independiente y relacionada a su vez con las demás, lo cual hace al sistema tremendamente complejo (Spangenberg, 2005), y además, para que el sistema sea sustentable, los cuatro subsistemas deben coevolucionar.

El desarrollo sustentable ha sido recientemente muy mencionado y ello lo ha convertido en un nuevo proceso de planeación paradigmático; sin embargo, se han hecho pequeñas evaluaciones sobre el impacto del concepto en el proceso de planeación (Manta, 2003). La Organización de las Naciones Unidas, Organizaciones no Gubernamentales, científicos y políticos coinciden en que cada vez es más claro que las políticas, estrategias y acciones para el desarrollo económico, el manejo del medio ambiente y la gestión de los recursos naturales son complementarios (Winograd, 1995); no obstante, se debe anotar que en el proceso de la toma de decisiones y la planificación, estas tres perspectivas conllevan a diversas necesidades y preocupaciones, que además implican que no hay un desarrollo sustentable, sino “*Desarrollos Sustentables*”, los cuales deberán ser definidos en los diferentes niveles de la sociedad y evaluados y monitoreados en función de las características económicas, socioculturales y ecológicas del lugar de que se trate. En este sentido la cooperación para el desarrollo sustentable es un tema controversial, de manera que las iniciativas encaminadas a la consolidación de esquemas de manejo sustentable no deben quedar en buenas intenciones y se deben desarrollar programas y políticas para llevar a cabo la conservación y equilibrio del ambiente pero desde el contexto de la globalización (Bolay, 2004).

El esquema ilustrativo de sustentabilidad expresa un enfoque integrado del desempeño económico y ambiental, que conforma un área de factibilidad donde el crecimiento económico debería ser suficiente para resolver el problema de la pobreza y, paralelamente, sustentable para evitar la crisis ambiental, considerando, además, tanto la equidad entre las generaciones presentes como la equidad intergeneracional que involucra los derechos de las generaciones futuras (INEGI-INE, 1998).

### **1.1.1 Desarrollo sustentable y economía**

El desarrollo sustentable ha sido un paradigma global que integra políticas ambientales y de desarrollo, generándose un gran debate entre economistas y ambientalistas, lo que ha creado confusión sobre indicadores y políticas a implementar (Bartelmus, 2000). Muchos autores coinciden en que existe una polarización clara entre la teoría económica y la teoría de sustentabilidad, ya que la política fundamental del desarrollo sustentable asume que sus valores no se deprecian a través del tiempo, mientras que en el análisis económico, todos los valores, sean estos sociales o ambientales, se interpretan en términos de dinero y se descuenta valor en el futuro (Patridge, 2003). En este gran debate, la teoría económica define al crecimiento económico como una situación en donde el bienestar *per capita* de la sociedad se mantiene constante o al menos no disminuye en el tiempo (Pearce *et al.*, 1994; Pierce y Atkinson, 1993). Este concepto es ampliado cuando se integra el marco de desarrollo económico al sistema de desarrollo sustentable, estableciéndose que ninguno de sus componentes debe presentar decrementos en el tiempo (Van Dieren, 1995).

En general, cuando se integra la dimensión económica al marco teórico de sustentabilidad se genera gran confusión, y si se usara un lenguaje común para integrar una contabilidad

física y monetaria ambiental, ayudaría a moderar el debate y de ello depende la implementación de un verdadero desarrollo sustentable (Bartelmus, 2000). Una alternativa viable es el uso de modelos económicos relacionados con problemas ambientales. Con este esquema es muy importante saber qué tipos de modelos son más apropiados según el sistema a evaluar. Se consideran cinco principales categorías de modelos, los cuales son llamados: modelos de contaminación, modelos ambientales de entradas y salidas, modelos macroeconómicos y modelos con tecnología y cambios revolucionarios (Kyelars y Van den Bergh, 2001). Estos modelos están siendo utilizados para acoplar la dimensión económica como un elemento más del concepto denominado desarrollo sustentable.

### **1.1.2 Indicadores de sustentabilidad**

Actualmente existen numerosas listas de indicadores para medir sustentabilidad, las cuales fueron generadas en cumplimiento al mandato de la Comisión de Naciones Unidas para el Desarrollo Sustentable que decide en 1995 la creación de indicadores de sustentabilidad en el marco de la política estratégica del Programa Agenda 21 generado en la Cumbre de Río en 1992 (Pfahl, 2005).

La experiencia ha mostrado que es científicamente factible establecer indicadores para medir el grado de sustentabilidad, generalmente este proceso se inicia con el establecimiento de una gran lista de indicadores para describir el fenómeno tan complejo que es la sustentabilidad y, posteriormente, mediante procedimientos de participación u otros ésta lista se reduce a una lista de indicadores estándar que pueden ser aplicados a diferentes países y en ocasiones a diferentes niveles, tales como: criminalidad, empleo, educación y esperanza de vida, de tal manera que se cumpla el propósito de proveer indicadores o el método para desarrollarlos en otros países (Hens y Wit, 2003).

Existen varios marcos disponibles que se pueden utilizar para guiar la selección y el desarrollo de indicadores:

Los modelos para obtener, analizar y elaborar información ambiental son generalmente de dos tipos (EPA, 1995; Winograd, 1995):

1. Modelos para la toma de decisiones o elaboración de estrategias que definen la relación entre la información ambiental y los valores sociales y/o objetivos y metas políticas.
2. Modelos de los procesos ambientales y las interacciones sociedad- medio ambiente que tratan de clasificar los problemas ambientales en términos de causa-efecto.

Un modelo ampliamente utilizado es el de Presión-Estado-Respuesta (P-E-R) adaptado por la OCDE (OCDE, 1991; OCDE, 1993) a partir del modelo original de Presión-Respuesta de Friends y Raport (1979). Este marco conceptual es probablemente el más aceptado a nivel mundial debido a su simpleza, facilidad de uso y la posibilidad de aplicación a diferentes niveles, escalas y actividades humanas. Este modelo fue utilizado por la OCDE para organizar la información ambiental de los países miembros como una forma para revisar su desempeño y resultados ambientales (OCDE, 1991; OCDE, 1993). Ha sido también utilizado para elaborar la información ambiental en función de metas y objetivos en países como Holanda y para estructurar un conjunto de posibles indicadores de sustentabilidad para la Comisión de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas (DPCSD) y para el Banco Mundial. También ha sido aplicado a escala regional para organizar un conjunto de indicadores ambientales que permiten medir la sustentabilidad del uso de la tierra en América Latina y el Caribe.

### **1.1.3 La evaluación de sustentabilidad**

Medir el desarrollo sustentable es una de las metas para un mejor desempeño de cualquier productor que hace uso de los recursos naturales y, los indicadores son una forma para evaluar las decisiones políticas prácticas con las definiciones operacionales (Herrera *et al.*, 2003). En la actualidad se han presentado múltiples estudios que tratan de evaluar el desempeño de la sustentabilidad mediante el uso de indicadores e índices que ayudan a relacionar el termino sustentabilidad con los cambios sociales y ambientales (Morse *et al.*, 2004).

Las evaluaciones de sustentabilidad se han convertido en un área de intensa investigación a escala internacional enfocada a la definición de indicadores de sustentabilidad para la evaluación de sistemas desde los puntos de vista ambiental, económico y social (Masera *et al.*, 1999). Se han generado diversas metodologías para la evaluación del desarrollo sustentable, así como marcos para el desarrollo de indicadores de sustentabilidad, tal es el caso de el Marco Conceptual para el Desarrollo y Uso de Indicadores Ambientales y de Sustentabilidad para Toma de decisiones en Latinoamérica y el Caribe basados en el modelo Presión-Estado- Impacto/Efecto – Respuesta (Winograd, 1995), el cual se fundamenta en el esquema Presión-Estado-Respuesta de Friends y Raport (1979). Por otra parte, el marco desarrollado por el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IIAC) propone una metodología sistemática para la derivación de indicadores a partir de una extensiva revisión bibliográfica sobre el concepto de sustentabilidad y sus diferentes variantes, definiendo cuatro categorías de análisis; 1. La base de recursos del sistema; 2. La operación del sistema propiamente; 3. Otros recursos exógenos al sistema y 4. La operación de otros sistemas exógenos.

Masera *et al.* (1999) mencionan que la propuesta más elaborada sobre metodologías de evaluación de sustentabilidad es, sin duda, el Marco de Evaluación de Manejo Sustentable de Tierras, elaborado por FAO y conocido como FELSEM. Este marco constituye uno de los más importantes esfuerzos a escala internacional dirigido a la evaluación de sustentabilidad y fue la base para elaborar el Marco para la Evaluación de Sistemas de Manejo de Recursos Naturales incorporando Indicadores de Sustentabilidad (Masera *et al.*, 1999) que está dirigido a proyectos agrícolas, forestales y pecuarios llevados a cabo colectiva o individualmente y pretende que la evaluación no sea un instrumento meramente calificador de opciones, sino que sirva como punto de apoyo para hacer operativo el concepto de sustentabilidad en la búsqueda de un desarrollo social más equitativo y ambientalmente sano en las comunidades rurales.

Diversos programas de la ONU han sido generados para establecer métodos y estrategias para abatir el calentamiento global y contribuir al desarrollo sustentable. El Programa para la Implementación de Actividades Conjuntas (AIJ) reporta que a pesar de mas de 200 proyectos en el mundo, a la fecha ha sido difícil el acertar sobre criterios de evaluación que muestren objetivamente los avances hacia la sustentabilidad en el planeta (Barrera y Schwarze, 2004).

Algunos de los esfuerzos por evaluar sustentabilidad han sido publicados en documentos científicos; por ejemplo, Sigrid y O'Hara (2001) contrastan el comportamiento de los consumidores y acotan el hecho de que éstos no rigen su consumo basándose en sus necesidades más prioritarias, ya que siempre compran de todo y más de lo que necesitan; en contraparte se analiza como debe ser el comportamiento de los consumidores si sus compras estuvieran basadas meramente en sus necesidades, que pudieran estar ligadas a indicadores de sustentabilidad; de esta manera han detectado qué relaciones entre las

necesidades del consumidor e indicadores de sustentabilidad pueden ser aplicadas para promover patrones de consumo sustentable. Por su parte, Lorek y Spangerberg (2001) han detectado que existen tres formas de consumo que ejercen más presión sobre la estabilidad del ambiente, éstas son: vivienda, alimentos y transporte, en ese orden de importancia, aunque también mencionan que existen otros factores pero son menos relevantes. Zhang *et al.* (2003) proponen evaluar la sustentabilidad en las zonas urbanas de China con base en un esquema llamado “ahorro genuino” basado en el consumo de bienes que permiten un buen nivel de vida sin excesos.

Algunas otras evaluaciones están basadas en el modelo para estimar la huella ecológica. Holden (2004) realizó cálculos sobre huellas ecológicas basados en un número de categorías que tienen consecuencias severas sobre el ambiente, tales como energía y uso de materiales en la casa y transporte. La comparación se basó en una encuesta a 404 familias, de las cuales 66 dijeron ser miembros de familias ambientalistas. Sus resultados sugieren que si los miembros de las familias ecológicas tienen una huella mas pequeña, no se debe a que forman parte de familias ambientalistas, sino que es meramente un reflejo de que las familias ecológicas son más grandes que las ordinarias, por tanto la distribución del consumo fue menor.

## **1.2 Sustentabilidad de ecosistemas forestales**

Uno de los términos mas usados en el manejo forestal es el de “manejo sostenido” el cual hace referencia a la producción constante de madera; sin embargo, este concepto fue expandiéndose gradualmente hasta incluir la producción sostenida de otros productos forestales como agua, recreación, pesca, hábitat de fauna silvestre, forraje para ganado y otros productos no maderables (Floyd *et al.*, 2001), razón por la cual muchos autores usan



indistintamente como sinónimos “rendimiento sostenido” y “sustentabilidad forestal”; sin embargo, Floyd y sus colaboradores consideran que son términos distintos y que una de las diferencias más importantes es que el término “sustentabilidad forestal”, además de la producción sostenida de los recursos forestales, hace énfasis en los procesos y funciones del ecosistema (purificación de aire y agua, formación de suelo, ciclo de energía y nutrientes, etc.).

Actualmente, la mayor parte de los países del mundo han adoptado además del concepto de Desarrollo Sustentable, los términos “Sustentabilidad Forestal” y “Manejo Forestal Sustentable”, ambos consideran el uso continuo de los bosques o ecosistemas forestales, así como el mantenimiento de su salud, productividad, diversidad e integridad ecológica a perpetuidad, para satisfacer las necesidades sociales, económicas, físicas y espirituales del hombre, tanto de las generaciones actuales como futuras (Narváez *et al.*, 2003).

### **1.2.1 Procesos de monitoreo de sustentabilidad en ecosistemas forestales**

En la Conferencia Mundial de Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo (UNCED/CNUMAD) conocida como la “Cumbre de la Tierra” celebrada en Río de Janeiro en 1992, los dirigentes mundiales reconocieron la importancia del desarrollo sustentable de los recursos forestales para asegurar el bienestar de las poblaciones locales a largo plazo, y sostener las economías nacionales y la biosfera terrestre en su conjunto. La cumbre dio como resultado una declaración de principios sobre los bosques, una serie de convenciones sobre diversidad biológica, cambio climático y desertificación y un plan de acción para el siglo XXI conocido con el nombre de Agenda 21; todos ellos tienen implicaciones para el manejo de los bosques (Narváez *et al.*, 2003).

Una iniciativa internacional en la que participa México, es la conocida como Proceso de Montreal, la cual, a través de la bolsa de Indicadores de la Declaración de Santiago, pretende monitorear y evaluar el grado de sustentabilidad en materia forestal para los países que albergan la mayor parte de los bosques templados y boreales del mundo. Actualmente, Canadá es el país que en Norteamérica presenta mayores avances en el proceso de reportar el monitoreo de la sustentabilidad. Su reporte se caracteriza fundamentalmente por las bolsas de Indicadores generadas por la Red de Bosques Modelo y por el Consejo Canadiense de Ministros Forestales. El reporte más importante del estado actual de sustentabilidad para Canadá salió a la luz pública y fue presentado ante el Grupo del Proceso de Montreal en la publicación Canadian Council of Forest Ministers, 2000 (CCFM, 2000).

### **1.3 Escalas de monitoreo de los indicadores**

Los conceptos de sustentabilidad varían de acuerdo con las diferentes escalas de medición (global, nacional, regional, unidad de manejo forestal); sin embargo, sea cual sea la escala, los marcos de indicadores de sustentabilidad deben ser flexibles y capaces de adaptarse a lo largo del tiempo (Bridge *et al.*, 2002).

Algunas cuestiones importantes a considerar son: a). la escala espacial de los indicadores económicos y sociales tienden a ser más grandes que los recursos forestales, esto indudablemente es el resultado de la movilidad del hombre que afecta los valores del sistema social y económico y b). la disponibilidad de datos. Asimismo, es a menudo preferible que los datos sociales y económicos sean tomados a escalas en las cuales la gente se organice por si

misma (ejemplo: comunidades), pero generalmente la información sólo está disponible a nivel de estado o país (Wright *et al.*, 2002).

La estimación de la sustentabilidad por medio de Indicadores de Sustentabilidad es esencial en ambas escalas (local y nacional). La estimación a escala local es necesaria debido a que las decisiones de manejo hechas en las unidades de manejo forestal son las que finalmente determinan la sustentabilidad del manejo forestal a nivel nacional.

No obstante, algunos aspectos de sustentabilidad no pueden ser estimados a nivel local. Por ejemplo, el establecimiento de un sistema de “áreas protegidas” para propósitos de conservación, es un aspecto que generalmente sólo es posible evaluar a una escala a nivel nacional (Prabhu *et al.*, 1996).

### **1.3.1 El monitoreo de sustentabilidad a escala local**

En un marco tan grande como es la sustentabilidad, la escala es un factor muy importante, así como numerosos factores incluyendo el grado de confianza entre la población, sus percepciones y convicciones, sus conflictos y sus respectivas agendas, así como la manera en la cual los discursos y decisiones políticas son implementadas (Parto, 2004). De tal manera que cuando se implementan proyectos para evaluar el desempeño de la sustentabilidad, y estrategias de desarrollo, es fundamental el considerar la escala de medición, la cual puede tender a un esquema Global, Regional o local (Lorek y Spangerberg, 2001).

La intervención de actores locales en los proyectos de sustentabilidad lleva la intención de hacerlos más responsables; no obstante, tiene algunas limitaciones entre las que destacan

una vieja idea de manejo comunitario y el riesgo de ser manipulados por líderes de la comunidad, generando entonces conflictos de interés y de tiempo (Froger *et al.*, 2004). Es importante destacar que la organización entre gente que vive territorialmente cerca, facilita el desarrollo sustentable del ambiente porque se da un manejo con factores locales; además, las actividades humanas en el contexto de la globalización tienen, paradójicamente, un componente local que ha afectado directamente el aspecto público (Mollard y Torre, 2004).

En ambientes forestales, a nivel local, las nociones de sustentabilidad dependerán de cada interesado y variarán en función de las condiciones forestales, la importancia de los recursos forestales en las tradiciones y economías de la zona, la naturaleza y el tipo del régimen de tenencia de la tierra. Si bien, los objetivos de la gestión de las tierras puede variar según la escala y el propietario o administrador, en conjunto sus acciones individuales contribuyen a la sustentabilidad (Bridge *et al.*, 2002).

Varios sistemas de Indicadores de Sustentabilidad que reflejan la sustentabilidad a nivel local (Unidades de Manejo Forestal) han sido desarrollados por organizaciones como el Centro Internacional para la Investigación Forestal (CIFOR), la Alianza de Bosques Tropicales, la Asociación de Suelos, la Organización Africana de la Madera, y la Propuesta de Tarapoto (Prabhu *et al.*, 1996).

El CIFOR es un Instituto de Investigación no lucrativo, establecido en Indonesia, que ha conducido evaluaciones de Manejo Forestal Sustentable al nivel de Unidades de Manejo Forestal en varios países, con el fin de ver la utilidad y aplicabilidad de varias bolsas de Criterios e Indicadores, incluyendo la del Proceso de Montreal. CIFOR después de haber llevado al cabo una serie de pruebas en Indonesia, Alemania, Costa de Marfil, Brasil, Austria y Camerún, realizó en 1998 la Prueba Norteamérica (CIFOR-NA) en el Bosque

Nacional de Idaho, EEUU, con la participación de Canadá, Estados Unidos y México (Wright *et al.*, 2002). Esta prueba dio como resultado la adopción de tres Principios, 16 Criterios y 54 Indicadores.

En México, la UNAM y otras instituciones públicas y privadas también han trabajado sobre el desarrollo y evaluación de Indicadores ambientales y socioeconómicos. Asimismo, Masera y colaboradores generaron un esquema de sustentabilidad denominado “Marco Metodológico para la valuación de Sistemas bajo Manejo Incorporando: Indicadores de Sustentabilidad” que ha sido utilizado para la evaluación de la sustentabilidad a nivel local en diversos sistemas forestales y agropecuarios de México y América Latina (Masera *et al.*, 1999).

En lo que respecta a esfuerzos del sector no gubernamental, el FSC (Consejo de Manejo Forestal) es un organismo internacional que acredita a organizaciones certificadoras que tienen como propósito la certificación del manejo sustentable de los bosques de un predio o ejido. Esta certificación conocida como “sello verde” es solicitada voluntariamente por los dueños y manejadores de los bosques y su objetivo principal es competir internacionalmente en los mercados de la madera (Narváez *et al.*, 2003).

### **1.3.2 Importancia y utilidad del uso de indicadores para evaluar sustentabilidad forestal**

Los indicadores pueden definirse como herramientas con las cuales se puede medir y evaluar el avance hacia el manejo forestal sustentable. De acuerdo con Rodríguez (1997), la utilidad práctica que se prevé con el establecimiento y uso de los criterios e indicadores son las siguientes:

- 1) Orientar las políticas futuras para el manejo forestal
- 2) Identificar y priorizar las necesidades de información e investigación
- 3) Orientar las prácticas de manejo forestal
- 4) Concienciar a la sociedad en la utilización adecuada de los recursos forestales
- 5) Auxiliar en la formulación de legislaciones o normas, orientadas al manejo forestal sustentable
- 6) Proporcionar datos e información sobre la condición de los bosques
- 7) Proporcionar datos e información sobre los resultados de las prácticas de manejo forestal
- 8) Proveer de un marco de referencia para evaluar el estatus de una unidad de manejo forestal o un país hacia el manejo forestal sustentable y
- 9) Tener una base común para la colaboración internacional

Los Indicadores son también una herramienta valiosa cuando son utilizados en la planeación, evaluación, manejo, inventario, monitoreo y comunicación. Ellos proporcionan un formato que soporta científicamente el manejo forestal y ayudan a la formulación de políticas efectivas (USDA. 2000).

Por otra parte, los indicadores pueden ser de gran ayuda y utilidad para los organismos de certificación interesados en la evaluación del manejo forestal (Boyle *et al.*, 2001).

#### **1.4 Entorno de los recursos forestales de zonas áridas**

Las comunidades vegetales de los sistemas de zonas áridas han logrado a través del tiempo adaptarse a las condiciones adversas que generan el estrés hídrico y las temperaturas extremas que imperan en dichas regiones (Pedroza, 1998). Una de las características

peculiares de las poblaciones vegetales del desierto, es la elevada concentración de metabolitos secundarios que hacen a las especies tolerantes a la sequía a través de diferentes mecanismos fisiológicos de adaptación; otra característica de algunas especies es lo caprichoso de su morfología y anatomía que conducen a la evasión de los efectos nocivos del déficit de humedad, algunas otras escapan a la hostilidad del clima aprovechando el escaso tiempo de humedad para completar su ciclo reproductivo (Martínez, 2000). El hombre a través del tiempo ha logrado dar valor comercial a varias de las diferentes características de las especies de zonas áridas, tal es el caso de los aceites, taninos, fibras, ceras, ornamentales y energéticos (Magueyes (*Agave* spp), orégano (*Lippia berlandieri* Sch.), cyelilla (*Euphorbia antisyphilitica*), lechuguilla (*Agave lecheguilla*), jojoba (*Simonsia chinensis*), opuntias (*Opuntia* spp), cactáceas, etc.); sin embargo, en la actualidad, las poblaciones de las especies con valor económico de zonas áridas están siendo aprovechadas a intensidades que provocan una gradual desaparición de dichos recursos (Martínez, 2000) disminuyendo así el potencial productivo de las diferentes comunidades, generando además alteraciones en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas.

#### **1.4.1 Los recursos forestales en el sureste de Zacatecas**

En la región semiárida del sureste del estado de Zacatecas históricamente se ha realizado extracción de recursos forestales no maderables, donde la especie más aprovechada es *Agave salmiana* ssp. *crassispina* usada comúnmente para la producción de mezcal (Frayre, 1996).

En esta región semidesértica existe un agudo problema de marginación, los suelos se caracterizan por ser poco profundos, con casi nula cantidad de materia orgánica, alto grado de salinidad, poca capacidad para la retención de humedad y escasa presencia de mantos acuíferos subterráneos (Frayre, 1996). Por su parte, la vegetación corresponde a matorral xerófilo (Rzedowski, 1993) y la precipitación media anual es poca y mal distribuida (400 mm), lo cual da carácter de ecosistemas frágiles a los de la región.

#### **1.4.2 Los Agaves**

La palabra “*Agave*” es proveniente del griego que significa “admirable, noble, ilustre agradable, magnífica” (Reyes, 1987; Granados, 1993; Nobel, 1998) y es la que representa al género de los conocidos magueyes. Las plantas de este género se caracterizan por tener raíces fibrosas, radiadas y extendidas superficialmente; tallos gruesos y muy cortos, usualmente más cortos que la yema terminal, hojas largas, generalmente suculentas, protegidas o desprotegidas, con dientes sobre los márgenes y con una espina aguda muy dura y sus hojas se encuentran dispuestas en una roseta suculenta (Tello, 1988). De acuerdo con Gentry (1980), en 1753 Linneo estableció el género *Agave* con sólo cuatro especies; luego las adiciones de especies durante los siglos XVIII y XIX respondieron a necesidades o conveniencias hortícolas, ya que entonces numerosos magueyes fueron llevados a Europa como novedades ornamentales (Aguirre *et al.*, 2001). Con relación a la clasificación de los Agaves, en décadas pasadas los botánicos tradicionales consideraron que el género *Agave* pertenecía a las familias *Liliaceae* y *Amarillidaceae*; sin embargo, en los últimos años la mayoría de los especialistas lo clasifican como género de la familia *Agavaceae* (Piña, 1980; Domínguez, 1980; Granados, 1993) reconociéndose en la actualidad 136 especies, 26



subespecies, 29 variedades, y 7 formas (Gentry, 1982), las cuales se encuentran incluidas en la siguiente jerarquía taxonómica: División Angiospermae; Clase Monocotiledoneae; Orden Liliales; Familia Agavaceae; Subfamilia Agavoideae; Género *Agave*; Subgénero *Agave* y *Littaea* (Granados, 1993).

### **1.4.3 Origen de los Agaves**

Slauson (2000) menciona que las especies del género *Agave* son nativas de México, Islas Canarias y del suroeste de Estados Unidos de América; sin embargo, en México se distribuyen el 75% de ellas, 74% de las cuales son endémicas de este país (García-Mendoza, 1995; Martínez-Palacios *et al.*, 1999) y es en México donde desde épocas prehispánicas las especies de *Agave* han sido apreciadas por la utilidad que los pueblos mexicanos encontraron en varios de sus géneros para alimentación, obtención de bebidas, forraje y extracción de fibras (Gentry, 1980; Colunga-García y May-Pat, 1993; Franco, 1995); sin embargo, las especies de este género han sido afectadas por la destrucción y modificación de su hábitat como resultado de un gran número de actividades humanas tales como la urbanización, agricultura, ganadería, construcción de carreteras y presas, elaboración de productos secundarios, así como la extracción de plántulas y especímenes adultos para uso ornamental (Franco, 1995).

### **1.4.4 *Agave salmiana* ssp *crassispina***

La subespecie *Agave salmiana* ssp *crassispina* está adaptada a diferentes hábitats, incluyendo cerros y laderas accidentadas y se desarrolla tanto a nivel individual como poblacional, sobre suelos con textura medias y con un pH de neutro a ligeramente ácido (Martínez-Morales y Meyer, 1985). Las plantas de Maguey verde (*Agave salmiana*) son

vigorosas y con una roseta de hojas suculentas que alcanzan alturas de hasta 1.8 m, las cuales pueden llegar a pesar en fresco hasta 250 kg, su tallo es fibroso, corto y grueso de manera que al eliminar la yema floral éste engrosa aún más y junto con las bases de las hojas forman un órgano de almacenamiento de carbohidratos llamado piña; por su parte las raíces de la planta son abundantes y fibrosas, de color rojo oscuro, la mayor parte de éstas se distribuyen en un radio similar al de la roseta de la planta y dentro de los primeros treinta centímetros de profundidad (Martínez, 1985; Tello, 1988; Martínez, 1988). El ciclo biológico de la especie es de entre 8 y 20 años y la floración se presenta al final, después del periodo de largo crecimiento vegetativo. La planta se propaga mediante la producción de vástagos y es capaz de producir también abundante semilla (Gentry, 1982); al respecto, Martínez-Morales y Meyer (1985) mencionan que la propagación vegetativa mediante la producción de vástagos que emergen al final de un rizoma es determinante en el mantenimiento de las poblaciones de maguey verde en el altiplano Potosino-Zacatecano, ya que constituye el único medio seguro de producción de nuevas plantas, ante la escasa o nula producción de semilla.

Varios autores (e.g. Abrahamson, 1980; Grime, 1982) mencionan que las ventajas de la propagación vegetativa son: transmisión genotípica exacta, mantenimiento del vástago por la planta madre, proliferación rápida, colonización rápida, rápido desarrollo para alcanzar el estado de madurez sexual; pero la principal ventaja de la multiplicación vegetativa en ambientes restringidos, se deriva de la capacidad de mantener el vástago en condiciones en las cuales el establecimiento a partir de un propágulo independiente sería un proceso largo y peligroso (Grime, 1982). La principal desventaja es que los individuos poseen menor plasticidad ante cambios del ambiente, además de que los rizomas inciden en el

mantenimiento poblacional debido que la longitud media de éstos reportada por Martínez-Morales y Meyer (1985) es de 0.72 m, lo cual no es ideal para que los vástagos escapen a la competencia intraespecífica o la supresión de crecimiento.

## 1.5 OBJETIVOS

### 1.5.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar el comportamiento de la sustentabilidad en ecosistemas forestales a través de la construcción de un índice mediante uso de indicadores de los sistemas social, económico y ecológico e incorporando indicadores relacionados con la estructura y dinámica de poblaciones del Agave (*Agave slamiana* ssp. *Crassispina*) y su entorno.

### 1.5.2 Objetivos Específicos

Seleccionar un conjunto de indicadores sociales, económicos y ecológicos, e incorporar un conjunto de indicadores del ecosistema forestal del área de distribución del Agave.

Establecer metodologías de consulta y muestreos de campo para el monitoreo de información que proporcione los valores de los indicadores de sustentabilidad.

Integrar los valores de los indicadores de sustentabilidad para el periodo comprendido entre los años 1990 - 2001.

Aplicar una metodología para la construcción de un índice para evaluar el desempeño de la sustentabilidad en el aprovechamiento del Agave en los ecosistemas forestales de la región de estudio, para el periodo comprendido entre los años 1990 – 2001.

## Capítulo 2. MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación aborda el uso de indicadores en un proceso de evaluación del desempeño de la sustentabilidad forestal a nivel municipal en la región de distribución de la especie *Agave salmiana* ssp. *crassispina* (Figura 1). El clima que caracteriza la región es BS1 kw (w) que corresponde al menos seco de los secos esteparios, con temperatura media anual entre 12°C y 18°C y con una precipitación media anual de 450 mm (UNAM,1970; García,1981). Con base en la clasificación de suelos realizada por la FAO-UNESCO y modificada por CETENAL (1972) para el caso específico de México, en la región de estudio predominan los tipos de suelo Litosol eútrico y Xerosol háplico. El tipo de vegetación característico de la región es el Matorral xerófito en el que conviven especies de la familia *Cactaceae* como las *Opuntias* (nopales), especies micrófilas como *Larrea divaricata* y *Jatropha dioica* y matorrales espinosos (Rzedowski, 1978).

El estudio aborda la teoría de sustentabilidad en función de los tres sistemas clásicos de la misma (Económico, Ecológico y Social) e incorpora indicadores relacionados con el uso y manejo del Agave como principal especie comercial del ecosistema forestal. El proceso metodológico estuvo integrado por tres etapas distintas: La primera fue la selección de los Indicadores de sustentabilidad, la segunda la recopilación de información para integrar una matriz de valores de los indicadores y la tercera el análisis de la información.

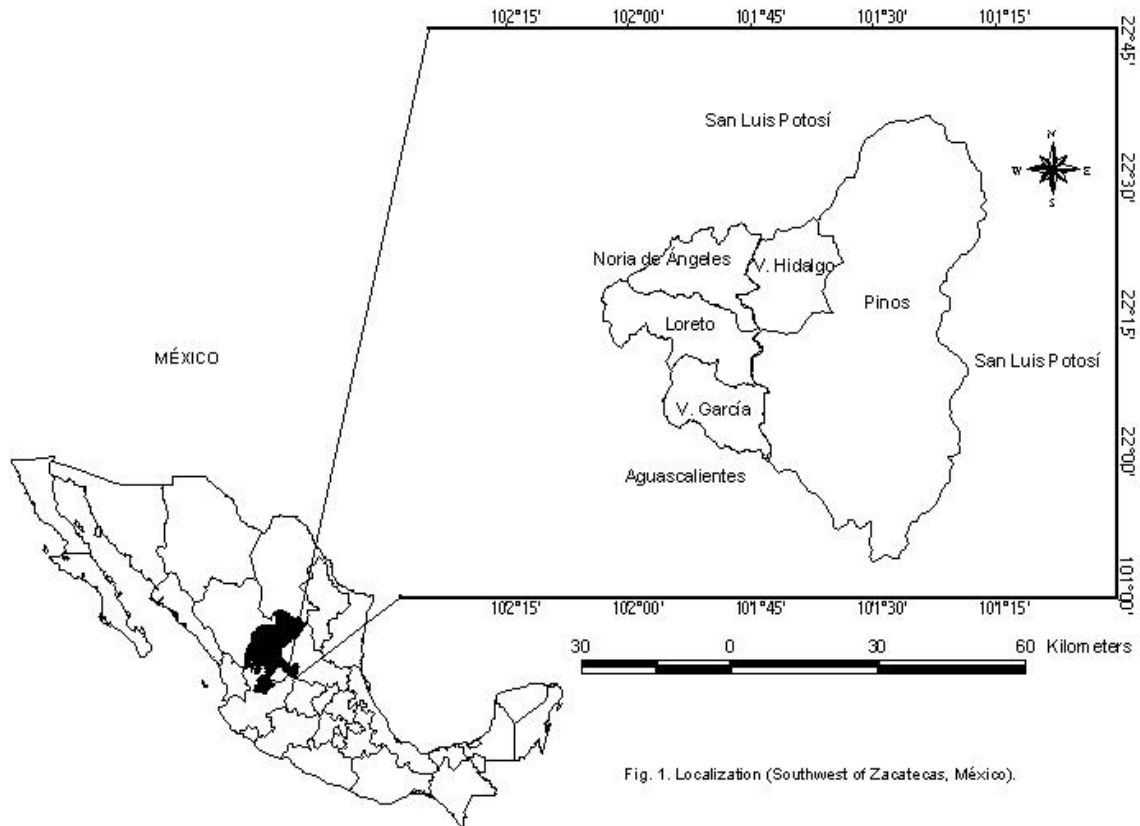


Figura 1. Área de estudio

## 2.1 Selección de los indicadores de sustentabilidad

Se partió del grupo de Indicadores Ambientales y de Sustentabilidad para la toma de Decisiones en Latinoamérica y el Caribe (Winograd, 1995), los cuales fueron generados usando el modelo Presión - Estado - Respuesta (OCDE, 1993). Posteriormente se realizó una selección de indicadores con la finalidad de contar con una lista de aquellos que puedan ser monitoreados a escala local. Las condicionantes para decidir la pertinencia de un indicador fueron las siguientes:

Que el indicador sea posible de monitorear a escala local, que se pueda medir periódicamente, que revele la dirección del cambio, que exista disponibilidad de datos de calidad y que sea simple y fácil de comprender.

Una vez realizada la selección se integró una matriz de indicadores preliminares, a los cuales se anexaron indicadores para verificar la influencia del aprovechamiento del Agave en el desempeño sustentable de la región. Los indicadores fueron agrupados en cuatro criterios relacionados con la estructura, función y aprovechamiento de especies de interés comercial (Criterio 1. Atributos de hábitat, Criterio 2. Atributos de la comunidad, Criterio 3. Atributos ecológicos de la población, Criterio 4. Atributos de uso y manejo) (Tabla I).

Finalmente se integró una matriz con 39 indicadores preliminares, de los cuales 7 corresponden al sistema social, 9 al sistema económico y 23 relacionados con el ecosistema ecológico forestal.

Una vez integrada la matriz de indicadores preliminares e incluidos los indicadores del sistema forestal relacionados con la especie de interés, se diseñaron los indicadores definitivos los cuales están integrados por uno o más indicadores preliminares (Ej. Densidad de población =  $\text{Habitantes} / \text{superficie}$ ; grado de analfabetismo =  $\text{Población menor a 15 años que no sabe leer} / \text{Población menor a 15 años que sabe leer}$ ).

La lista final está integrada por 35 indicadores definitivos (Tabla II) que abordan aspectos del los tres sistemas que integran la teoría general de sustentabilidad (Económico, Ecológico y Social).

Tabla I. Indicadores preliminares seleccionados para la construcción de los indicadores de sustentabilidad.

<b>SISTEMA</b>	<b>No</b>	<b>Variables</b>
<b>Social</b>	1	Superficie
	2	Población total
	3	Habitantes en viviendas particulares
	4	Viviendas particulares con agua
	5	Viviendas particulares con luz
	6	Viviendas particulares con drenaje
	6	Población de 6-14 años que sabe leer y escribir
<b>Económico</b>	7	Población de 6-14 años que no sabe leer y escribir
	8	Ingreso <i>per capita</i>
	9	Valor de la producción agrícola
	10	Valor de la producción ganadera
	11	Valor de la producción silvícola
	12	Densidad de carreteras por Km <sup>2</sup>
	13	*Precio del Agave
	14	Salario mínimo de la zona
	15	PEA (Población Económicamente Activa)
<b>Ecológico Forestal</b>	16	PEA empleada
	<b>Atributos de hábitat</b>	
	17	Tipo de suelo
	18	Tipo de relieve
<b>Atributos de comunidad</b>	19	Precipitación
	20	Temperatura
	21	Riqueza
	22	*Índice de diversidad
	23	*Número de plantas por hectárea
	24	*% de cobertura vegetal
	25	Superficie forestal
	26	Superficie de agostadero
<b>Atributos de población</b>	27	*Densidad de Agaves
	28	*Tasa de reclutamiento
	29	*Juveniles
	30	*Prerreproductivos
	31	*Reproductivos
	32	*Maduros
<b>Atributos de Uso</b>	33	% cambio en el uso del suelo
	34	Unidades animal en agostadero
	35	Condición de erosión de suelo
	36	Condición del manto freático
	37	Superficie aprovechada
	38	Superficie reforestada
	39	Superficie de Agaves

\*Indicadores agregados y relacionados con la estructura y dinámica del Agave y con su aprovechamiento en la región de estudio.



Tabla II. Indicadores definitivos usados para la construcción de los índices de sustentabilidad.

Indicador	Sistema	Unidad de medida	Fuente
SOCIALES			
Tasa de crecimiento poblacional	S1	%	INEGI; CONAPO
Densidad de población	S2	Hab/km <sup>2</sup>	INEGI
Numero de habitantes por vivienda	S3	No.	INEGI
Población con acceso a agua potable	S4	%	INEGI
Población con acceso a luz	S5	%	INEGI
Población con acceso a drenaje	S6	%	INEGI
Grado de analfabetismo	S7	%	INEGI
ECONÓMICOS			
Valor de la producción de Agaves	E1	Miles \$	INEGI, Integradora de Magueyeros Zacatecanos A.C.
Salario mínimo regional	E2	\$	INEGI; Encuesta Municipal
Población Económicamente Activa	E3	%	INEGI
Población desempleada como proporción de la PEA	E4	%	INEGI
Ingreso mensual <i>per capita</i>	E5	\$	INEGI; Encuesta Municipal
ECOLÓGICO FORESTALES			
Tipo de suelo*	F1	TIPO	INEGI, Anexo A
Tipo de relieve*	F2	TIPO	INEGI, Anexo A
Precipitación	F3	mm	Comisión Nacional del Agua
Temperatura	F4	°C	Comisión Nacional del Agua
Riqueza	F5	No	Trabajo de campo, Anexo C
Índice de diversidad	F6	Valor	Trabajo de Campo
Numero de plantas por ha	F7	No	Trabajo de Campo, Anexo C
% de cobertura vegetal	F8	%	Trabajo de Campo, Anexo C
Superficie forestal	F9	Ha	Trabajo de Campo, Anexo C
Superficie de agostadero	F10	Ha	
Densidad de Agaves	F11	No	Trabajo de Campo, Anexo C
Tasa de reclutamiento	F12	%	Trabajo de Campo, Anexo C
Juveniles*	F13	%	Trabajo de Campo, Anexo C
Prerreproductivos*	F14	%	Trabajo de Campo, Anexo C
Reproductivos*	F15	%	Trabajo de Campo, Anexo C
Maduros*	F16	%	Trabajo de Campo, Anexo C
% cambio en el uso del suelo	F17	%	INEGI

Continuación Tabla II. Indicadores definitivos usados para la construcción de los índices de sustentabilidad.

Condición de erosión de suelo*	F18	Clase	SEMARNAT
Condición del manto freático*	F19	CLASE	SEMARNAT
Unidades animal en agostadero	F20	No	INEGI
Superficie aprovechada	F21	Ha	SEMARNAT, Organización de Magueyeros Zacatecanos.
Superficie reforestada	F22	Ha	SEMARNAT, Organización de Magueyeros Zacatecanos.
Superficie de Agaves	F23	Ha	Trabajo de campo

\*Los valores de las clases de edad (Juveniles, prerreproductivos, reproductivos y maduros) corresponden al porcentaje que representa cada clase de edad con respecto al total de Agaves considerando como unidad espacial una hectárea. El Tipo de suelo corresponde a 1. Regosol, Xerosol, Litosol, 2. Fluvisol, 3. Otro tipo. (Los mejores suelos para el establecimiento de Agaves son Regosol, Xerosol, Litosol (Martínez, 1985). Relieve: 1. Valles, 2. Lomeríos y pie de monte pendiente menor al 13%, 3. Cerros y montañas pendientes mayores al 13%. Condición de erosión de suelo: 1. Suelo de medio a profundo sin erosión, 2. Suelo de medio a profundo con erosión, 3. Suelo somero sin erosión, 4. Suelo somero con erosión, 5. Pérdida total del suelo. Condición del manto freático. 1. Sin acuífero, 2. Manto sobreexplotado con mínima recarga, 3. Manto sobreexplotado con escasa recarga, 4. Manto sobreexplotado con abundante recarga y 5. Zona de recarga.

Los caracteres S, E y F (Tabla II), se refieren al sistema al que pertenece cada indicador: S para el sistema social, E para el sistema económico y F para el sistema ecológico forestal, integrado por indicadores relacionados con los recursos forestales de los ecosistemas del área de estudio.

En el sistema social, los indicadores evalúan la dinámica de la población y su relación con el acceso a servicios básicos; además incluyen un indicador que evalúa el grado educativo, el cual está referido a la población menor de 15 años que no sabe leer y escribir. Se ha incluido este indicador con fundamento en las posibles acciones correctivas para disminuir el rezago educativo, ya que la inducción a educación de niños puede resultar mas efectiva que en adultos. En el sistema económico se incluye a la Población Económicamente Activa (PEA), el nivel de desempleo y el salario mínimo como factores principales de la dinámica económica y su relación con el componente social; por otra parte, establecen una liga con el uso de la especie de interés al considerar

el porcentaje que representa el valor del aprovechamiento del Agave con relación al total de la producción en el sector primario (Agricultura, Ganadería, Silvicultura). Por su parte, los indicadores del sistema ecológico hacen referencia a tres aspectos básicos involucrados en el uso, manejo y preservación de los recursos forestales (degradación de los recursos forestales, característica de los suelos y agua y abundancia de las poblaciones arbustivas).

## **2.2 Monitoreo y recopilación de información**

El proceso de evaluación del desempeño de la sustentabilidad se basa en el análisis de series históricas de información de los indicadores, con la finalidad de identificar la evolución del sistema en función del aprovechamiento de los recursos naturales, así como los cambios que los recursos naturales tienen en función de las características socioeconómicas de las unidades de estudio (municipios).

Con este esquema para realizar la colecta de información fue necesario identificar las fuentes que producen y transfieren información estadística. En este proceso se integraron dos grupos de variables: A. Indicadores Económicos y Sociales y B. Indicadores Ecológicos. Posteriormente, en función de la disponibilidad de información de cada indicador se realizaron muestreos de campo o se revisaron las fuentes de información necesarias.

*Indicadores económicos y sociales.* La información se obtuvo de diversas fuentes federales y estatales, tales como el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), Consejo Nacional de Población (CONAPO), Presidencias Municipales, Gobierno del estado de Zacatecas, Secretaría de Agricultura Ganadería,

Pesca y Alimentación (SAGARPA), Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR).

Para recabar la información correspondiente a cada indicador socioeconómico, se realizaron revisiones documentales de datos históricos a partir de 1990 y, posteriormente, se realizó la captura de información relacionada con cada indicador definitivo o, en su caso, de los valores correspondientes de los indicadores preliminares que lo integran. Finalmente, mediante el uso de la matriz preliminar de información fue posible integrar los valores históricos de cada indicador definitivo.

*Indicadores ecológicos.* Para integrar los valores correspondientes a los indicadores del sistema ecológico fue necesario clasificar a los indicadores en dos grupos: A. Indicadores preliminares con información definitiva disponible en alguna fuente documental con estadísticas municipales, estatales o nacionales y B. Indicadores preliminares con información definitiva no disponible, pero con posibilidades de ser monitoreados mediante procesos de muestreo en campo o análisis de información digital, como son fotografías aéreas, imágenes de satélite y cartografía temática.

Para el grupo de Indicadores pertenecientes al grupo A, la información se obtuvo de diferentes fuentes, siguiendo el mismo procedimiento que se realizó para los indicadores económicos y sociales. Las fuentes de información consultadas fueron: SEMARNAT, CONAFOR, SAGARPA, INE, CONAGUA, INEGI.

Los indicadores que se incluyeron en el grupo B son: Densidad de Agaves, Tasa de reclutamiento, Estructura poblacional (Juveniles, prerreproductivos, reproductivos y maduros), riqueza específica, número de plantas de uso forestal por hectárea, cobertura vegetal de la comunidad arbustiva, cambio en el uso del suelo, condición de erosión de

suelos y condición del acuífero (Manto freático). Para los primeros cuatro indicadores se realizó un muestreo forestal dirigido en las áreas donde se distribuye el Agave y, para la integración de las series históricas, los resultados de campo fueron complementados con proyecciones retrospectivas tomando en consideración el volumen aprovechado de Agave. Para el caso específico de cobertura vegetal se utilizaron los resultados del muestreo en campo y se complementaron con un análisis espacio-temporal con el apoyo de cartografía digital para los años 1990, 1996 y 2000.

Para los indicadores cambio en el uso del suelo, condición de erosión de suelos y condición del acuífero (Manto freático) se realizó el análisis espacial de información digital de vegetación, suelos, relieve, características del manto freático y condición de erosión de suelos correspondiente a los años 1990, 1996 y 2000, mediante el uso de coberturas digitales proporcionadas por el Instituto Nacional de Ecología, las cuales fueron elaboradas a partir del uso de Imágenes de satélite LAND SAT TM7.

Muestreo de campo. El muestreo de campo se dirigió a las superficies donde se distribuye el Agave de manera natural, por lo que la primera actividad en el método fue delimitar dicha área. En este proceso se utilizaron cartas de uso del suelo Esc. 1:50000 (DETENAL 1969) a partir de las cuales se digitalizaron los rodales que en la carta ostentan la tipología con clave CR definida como Matorral crasirrosulifolio espinoso, así como sus diversas asociaciones con Matorral micrófilo, Matorral crasicaule y Pastizal natural.

Una vez delimitada el área de distribución del Agave se realizó un análisis fotogramétrico y recorridos de campo para verificar la información espacial y, en su caso, actualizarla en las áreas donde el uso del suelo no corresponde con el uso actual. En este proceso fue posible identificar cuatro estratos distintos. Cada estrato se caracterizó por presentar

homogeneidad en cuanto a cobertura vegetal y densidad de Agaves/ha (1. densidad alta, 2. densidad media, 3. densidad baja y 4. densidad muy baja). Esta estratificación permitió identificar la densidad de Agaves (Indicador F11) para cada municipio, así como algunos indicadores relacionados con las comunidades vegetales en las que existe presencia de poblaciones de Agave (F5, F6, F7, F8, F13, F14, F15, F16 Y F23).

El muestreo se realizó siguiendo un diseño estratificado aleatorio (Ecuación 1), considerando de manera independiente a cada uso de los estratos identificados en la elaboración del mapa de distribución del Agave.

$$n = \frac{L \sum_{h=1}^L N_h^2 s_h^2}{N^2 D^2 + \sum_{h=1}^L N_h s_h^2} \quad (1)$$

Donde:  $n$  = Tamaño de muestra.  $L$  = Número de estratos,  $N_h$  = Tamaño total (número de unidades) del estrato  $h$  ( $1, 2, \dots, L$ ),  $D$  = Tamaño deseado del error estándar de la media,  $s_h$  = Error estándar del estrato  $h$  y  $s_h^2$  = Varianza del estrato  $h$ .

El tamaño de muestra se estimó con un nivel de significancia del 95% y un error deseado del 5% y se utilizó la varianza de la densidad de *maguey verde*, la cual se obtuvo de un premuestreo en 40 sitios circulares de 250 m<sup>2</sup>, ya que con dicha superficie el número de especies encontradas dentro de la parcela no varió al aplicar la metodología de sitios anidados (Franco, 1989). El muestreo se realizó en un total de 154 sitios.

En cada sitio se midió la latitud, longitud, número de individuos por especie arbustiva y sus características (Altura, área basal y diámetro de copa).

Con la finalidad de identificar la estructura poblacional de los Agaves como una alternativa para verificar los resultados de sustentabilidad, para el caso específico de la

especie *Agave salmiana* ssp. *crassispina*, se tomó la información por cada una de las siguientes clases de edad: *Juveniles*: son hijuelos que emergen de la planta madre, se establecen en un radio máximo de 2 m alrededor de la planta que les da origen y llegan a alcanzar alturas de 30 cm; *prerreproductivos*: son de mayor edad que los juveniles, los cuales se encuentran independientes de la planta madre, pero que aún no han iniciado la etapa de reproducción clonal a partir de sus rizomas; *reproductivos*: son los que ya han iniciado la etapa de reproducción vegetativa mediante la producción de vástagos a partir de los rizomas que extienden, llegan a producir siete ó más hijuelos y esta etapa termina en cuanto inician la reproducción sexual; *maduros*: son aquellos que han ingresado a la etapa de reproducción sexual, que se manifiesta con el inicio de la emisión del escapo floral, el cual es un indicador indiscutible de la etapa final de la vida de la planta.

De forma análoga a la generación de la información de los indicadores de sustentabilidad basados en muestreo de campo, fue posible construir tablas que describen los principales atributos (abundancia, cobertura y alturas) de las comunidades vegetales. Por otra parte, para el caso específico de las poblaciones de maguey se construyeron tablas que muestran la estructura poblacional de la especie tomando en cuenta sus cuatro clases de edad y se realizó un análisis de simulación mediante el uso de un modelo dinámico basado en la estructura poblacional, con la finalidad de estimar la estabilidad de las poblaciones de Agaves maduros y, de esta manera, predecir el comportamiento de las poblaciones en el futuro.

### 2.3 Análisis de la Información

Una vez integrada la matriz de indicadores con sus valores correspondientes para el periodo 1990 – 2000, se realizó el análisis de los mismos, aplicando una metodología para la construcción de Índices de Sustentabilidad que son posibles de calcularse anualmente, de manera que permiten identificar cambios en el nivel de sustentabilidad en el tiempo. Para la construcción de los índices de sustentabilidad sintéticos se aplicó el siguiente procedimiento:

Sea  $i$  un indicador del IS para un año en particular, en las entidades  $X_i$ , donde  $X$  corresponde a cada municipio estudiado e  $i$  corresponde a cualesquier indicador.

Se establece como *Indicador Relativo* para la construcción del Índice de Sustentabilidad, al valor resultado de la aplicación de las ecuaciones 1 y 2, según se desee.

Si un Indicador se aproxima a la sustentabilidad en valores altos (Ej. Ingreso *per capita*), entonces se aplica la siguiente ecuación:

$$I.R. = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (2)$$

Donde:  $X_i$  es el valor registrado para el indicador  $i$  del municipio  $X$ , mientras que  $X_{\max}$  y  $X_{\min}$  son los valores máximo y mínimo observados para el indicador  $i$  en el conjunto de municipios, para el mismo año.

Si un Indicador se aproxima a la sustentabilidad en valores bajos (e.g. Tasa de crecimiento poblacional), entonces se aplica la siguiente ecuación.

$$I.R. = (X_{\max} - X_i) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (3)$$

Donde:  $X_i$  es el valor registrado para el indicador  $i$  del municipio  $X$ , mientras que  $X_{\max}$  y  $X_{\min}$  son los valores máximo y mínimo observados para el indicador  $i$  en el conjunto de municipios, para el mismo año.



A la sumatoria de la totalidad de indicadores relativos (22), se le ha denominado Índice de Sustentabilidad Municipal (ISM) y fue construido con base en la siguiente ecuación.

$$ISM = \sum_{i=1}^n IR_S \times 9/28 + \sum_{i=1}^n IR_E \times 7/28 + \sum_{i=1}^n IR_F \times 12/28 \quad (4)$$

Donde  $IR_{Si}$  son los índices relativos de los indicadores sociales,  $IR_{Ei}$  son los índices relativos de los indicadores económicos y  $IR_{Fi}$  son los índices relativos de los indicadores ecológicos.

Los 10 indicadores contemplados en el sistema ecológico han sido utilizados para la construcción del Índice de Sustentabilidad Forestal, económica y social con base en las siguientes ecuaciones.

Índice de Sustentabilidad Forestal.

$$ISF = \sum_{i=1}^n RI_F / 12 \quad (5)$$

Índice de Sustentabilidad Económico

$$ISE = \sum_{i=1}^n IR_E / 7 \quad (6)$$

Índice de Sustentabilidad Social.

$$ISS = \sum_{i=1}^n IR_S / 9 \quad (7)$$

Finalmente se realizaron correlaciones de los indicadores del índice generado con cada indicador. Para este análisis se normalizaron los valores de los indicadores mediante el uso de la ecuación  $Z = (X - \mu) / \delta$ , donde X corresponde al indicador y  $\mu, \delta$  son la media y la desviación estándar de los valores del indicador de todo el periodo (1990 - 2001).

### Capítulo 3. RESULTADOS

En un primer apartado de este capítulo se presenta de manera gráfica el área de distribución de la especie, así como la superficie que ocupa en cada municipio; se incluyen además los resultados relacionados con los indicadores de estructura poblacional de la especie (Densidad de Agaves, Tasa de reclutamiento, Juveniles, prerreproductivos, reproductivos y maduros). En un segundo apartado se muestran los resultados del comportamiento de los indicadores de sustentabilidad por cada sistema (Ecológico, Económico y Social) y, finalmente, se integran los índices de sustentabilidad obtenidos mediante la aplicación de la metodología previamente descrita.

#### 3.1 Área de distribución del Agave y su descripción poblacional.

*Agave salmiana* ssp *crassispina* es una especie que se encuentra distribuida en la región centro-norte del municipio de Pinos, en la parte oeste del municipio de Villa Hidalgo y una población que se encuentra en la parte central del municipio de Noria de Ángeles en el sureste de Zacatecas (Figura 2). Estos tres municipios conforman el área de estudio, y en ellos se realizó el muestreo de campo para identificar los valores de los indicadores ecológico-forestales relacionados con la estructura y densidad del Agave, así como algunos atributos de las comunidades vegetales de la región.

Se ha estimado que el Agave ocupa una superficie de 59,394 ha; en 1,142 ha sus poblaciones presentan densidades altas y 58,253 ha se encuentran con densidades menores formando parte de variadas comunidades vegetales como nopaleras, matorral inerme, matorral subinerme (Anexo C).

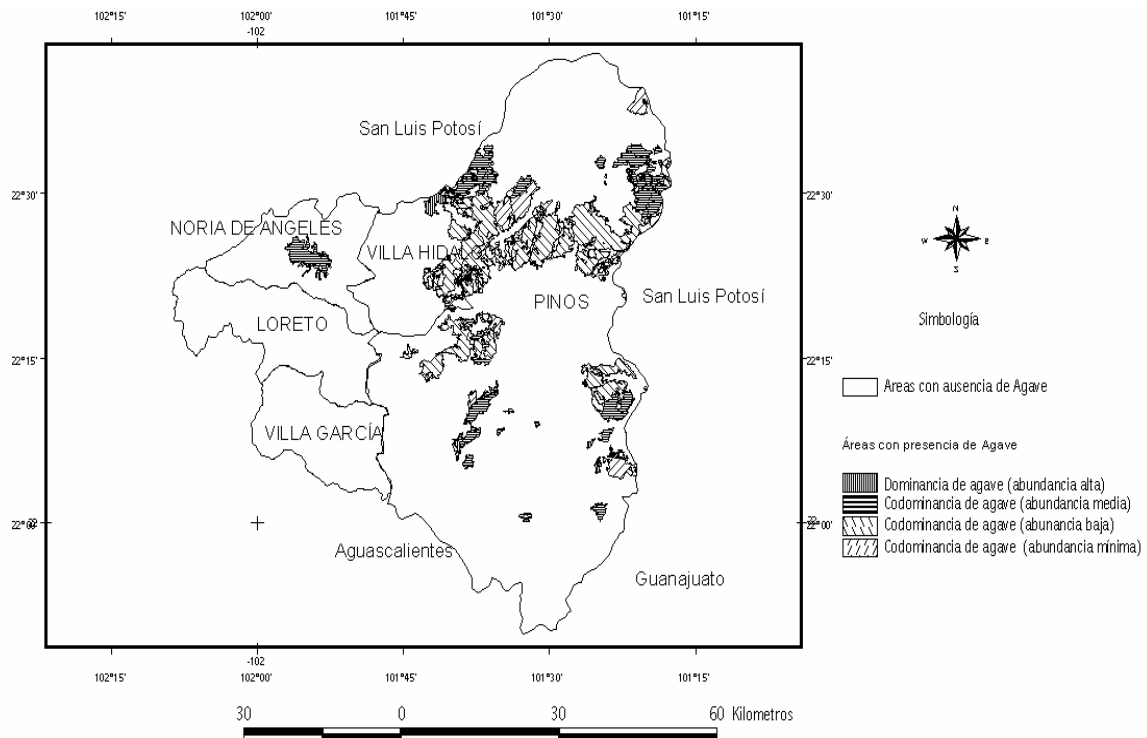


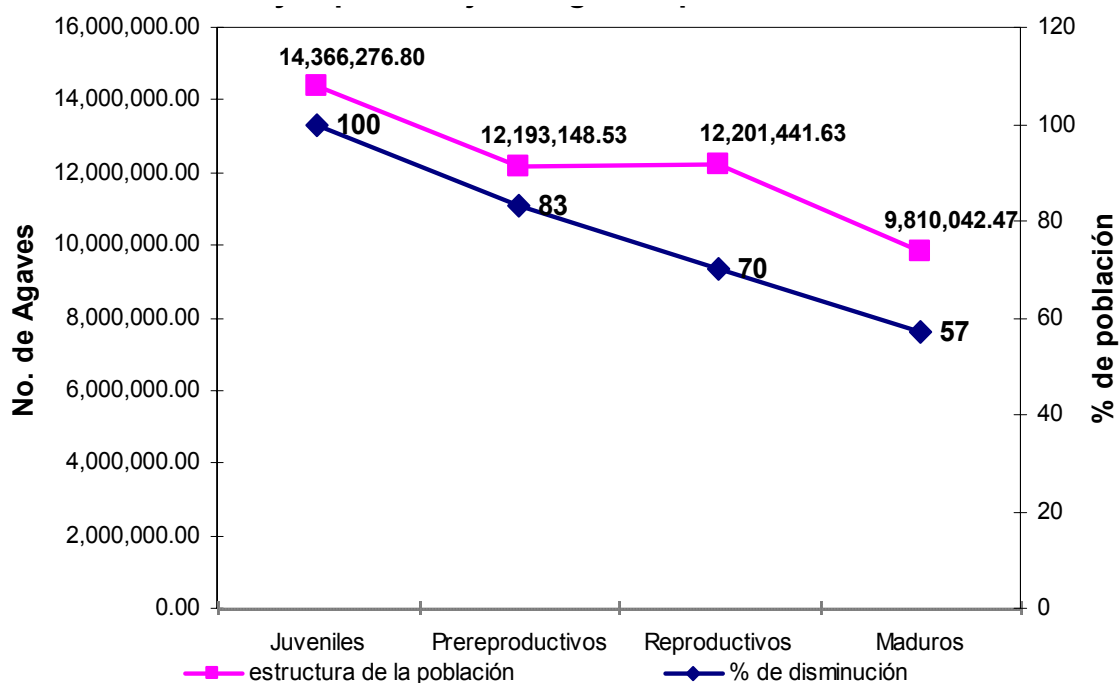
Figura 2. Área de distribución del Agave.

La Figura 2 fue elaborada mediante el uso de cartografía de uso del suelo (DETENAL, 1969) y actualizada con el apoyo de un análisis fotogramétrico y verificación de sitios de muestreo en campo.

La Tabla III muestra la superficie de distribución del maguey en la región de estudio. En el municipio de Pinos se encuentra la región más extensa de distribución (85%) y el resto en los municipios de Villa Hidalgo y Noria de Ángeles. Las superficies con más altas densidades se distribuyen en el municipio de Villa Hidalgo. Tanto en los municipios de Pinos como Villa Hidalgo, las actividades de aprovechamiento de la especie se realizan con más intensidad y frecuencia.

Tabla III. Superficie de distribución del maguey, según densidad de Agaves.

Municipio	Superficie en hectáreas				Total
	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja	Densidad Muy baja	
Pinos	381	14,639	29,172	6,402	50,594
Villa Hidalgo	761	357	5,182	55	6,355
Noria de Ángeles	-----	2,446	-----	-----	2,446
<b>TOTAL</b>	<b>1,142</b>	<b>17,441</b>	<b>34,354</b>	<b>6,457</b>	<b>59,394</b>



Gráfica 1. Estructura de las poblaciones de Agave y estructura poblacional para la región sureste del estado de Zacatecas.

La Gráfica 1 muestra los resultados de los indicadores Densidad de Agaves y Tasa de reclutamiento de Agaves. En la región con densidad alta se contabilizaron en promedio 3,125 Agaves por hectárea, 892 Agaves por ha en la región de media densidad, y 725 y 652 Agaves en las regiones con baja y muy baja densidad, respectivamente y se ha estimado que del 100% de los Agaves juveniles, solo el 57% alcanza la madurez.

La Tabla IV presenta un resumen de la estructura de las poblaciones de Agave en toda la región de estudio, así como una estimación del número total de individuos existentes por cada una de las etapas fenológicas consideradas. En cada una de las regiones estudiadas se observa que existe una disminución gradual en el número de Agaves en etapas superiores de madurez; de manera que los Agaves prerreproductivos, reproductivos y maduros representan el 83.0, 70.0 y 57.0%, respectivamente, con relación al número total de Agaves juveniles existentes.

Tabla IV. Superficie de distribución y abundancia de *Agave salmiana* en el sureste de Zacatecas, México.

<i>Nivel de abundancia</i>	<i>Número de Agaves / hectárea</i>					<i>No. Agaves /Sup.Tot.</i>
	Juveniles	Prerreproductivos	Reproductivos	Maduros	Total	
Alta	993.30	828.30	696.70	606.70	3,125	3,568,531.25
Media	267.69	212.31	273.85	138.46	892	15,562,841.17
Baja	209.03	187.10	160	169.03	725	24,719,515.14
Mínima	198.75	161.25	162.50	130	652	4,720,021.88
<i>Número total de Agaves en la región, por tipo</i>						
Total	<b>14,366,276.80</b>	<b>12,193,148.53</b>	<b>12,201,441.63</b>	<b>9,810,042.47</b>		<b>48,570,909.43</b>

### 3.2 Indicadores de sustentabilidad

Fue posible integrar los valores en series históricas (1990-2001) para todos los indicadores de los sistemas social y económico; sin embargo, para el caso del sistema ecológico forestal los indicadores de Estructura poblacional se reportan en el apartado anterior sólo para el periodo en el que se realizó el trabajo de campo (Tabla V).

Los indicadores tipo de suelo y relieve, incluidos en el criterio atributos de hábitat, tienen gran influencia para la delimitación de las superficies potenciales de producción; sin embargo, estos indicadores son poco sensibles a los cambios inducidos por el aprovechamiento de la especie. Los valores de Tipo de Suelo y Tipo de Relieve han sido similares para todo el periodo estudiado (Anexo A).

Suelo. Para la región de estudio, el Agave se distribuye preferentemente en suelos de tipo Litosol eútrico (61.18%), Xerosol Háptico (20.34%), Fluvisol eútrico (7.30%) y Fluvisol calcárico (7.26%).

Relieve. El 72.55% de la superficie de distribución de los Agaves se encuentra en pie de monte y lomeríos suaves con pendientes menores al 13% y con alturas entre 1,950 y 2,300 msnm, mientras que en el tipo de topoformas clasificado como cerros y montañas con pendientes mayores al 13% y con alturas mayores a 2,200 metros sobre el nivel del mar la superficie con presencia de Agave ocupa el 20.43%.

Por su parte, los indicadores de precipitación y temperatura son poco sensibles en el espacio para regiones pequeñas; sin embargo, de la misma manera que el relieve, influyen para la determinación de áreas potenciales de producción. En el caso de la región de estudio se registra una precipitación promedio que varía de 450 a 500 mm anuales y una temperatura media anual de 17°C.

Tabla V. Desempeño de los indicadores de sustentabilidad en la región de distribución del Agave.

INDICADOR	Año											
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Tasa de crecimiento poblacional %	1.86	1.86	1.78	1.70	1.63	1.57	1.51	1.63	1.96	1.95	1.95	1.95
Número de habitantes por vivienda	5	5	5	6	6	6	5	5	6	6	6	5
Densidad de población (No/ km <sup>2</sup> )	29	30	30	31	32	33	33	33	33	33	33	33
% Población con acceso a agua potable	0.82	0.83	0.84	0.84	0.85	0.85	0.86	0.86	0.86	0.86	0.88	0.90
% Población con acceso a luz	0.87	0.88	0.88	0.88	0.87	0.88	0.89	0.89	0.89	0.89	0.91	0.92
% Viviendas conectadas a drenaje	0.23	0.22	0.23	0.24	0.24	0.24	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.26
Tasa de analfabetismo (% de niños menores de 15 años)	0.15	0.15	0.16	0.18	0.15	0.15	0.14	0.15	0.14	0.15	0.15	0.15
Valor de la producción de Agaves/Sector prim.	0.02	1.46	1.65	0.90	0.52	0.00	0.00	0.25	0.48	1.07	0.31	0.82
Población Económicamente Activa	16.12	15.75	16.18	19.87	20.09	21.53	21.42	21.03	20.32	20.32	20.54	19.70
Tasa de desempleo %	4.88	4.76	4.81	4.26	4.21	3.25	3.23	3.41	3.63	3.61	3.46	3.98
Salario Mínimo Regional (\$)	14.17	14.31	15.74	17.07	18.26	24.08	31.88	31.88	42.08	42.08	46.33	50.72
Ingreso Mensual Promedio (\$)	853.33	860.70	941.63	1036.85	1095.65	1452.67	1921.67	1928.33	2539.27	2549.27	2416.67	2677.84
% Cambio en el uso del suelo	0.52	1.07	0.51	0.51	1.30	0.57	0.88	0.59	0.95	0.93	2.76	1.40
% Cobertura Vegetal	37.76	37.82	38.13	36.31	36.61	35.44	35.17	36.86	39.13	39.53	42.59	44.04
No. de plantas por hectárea	6242	6276	6075	5404	5376	5144	5268	5768	5892	5975	5199	5807
*Condición e erosión del suelo	3.00	3.00	3.00	2.33	2.33	2.00	2.00	2.67	4.00	3.67	3.33	3.00
*Condición del acuífero	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	4.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Carga animal (Unidades animal/ha)	3	3	3	4	4	4	4	4	3	4	4	3
Superficie con aprovechamiento de agave (ha)	2413	3136	2000	80	80	0	0	705	8131	8992	8864	5888
Superficie reforestada (ha)	44	80	600	272	133	54	26	60	1730	503	71	52
Densidad de Agaves maduros por hectárea	520	508	497	485	474	463	453	442	414	388	364	297
*Tasa de reclutamiento de juveniles	0.36	0.36	0.35	0.35	0.34	0.34	0.33	0.31	0.29	0.27	0.25	0.25

\*Condición del acuífero: 1. Sin acuífero, 2. Manto sobreexplotado con mínima recarga, 3. Manto sobreexplotado con escasa recarga, 4. Manto sobreexplotado con abundante recarga y 5. Zona de recarga. 1. Suelo de medio a profundo sin erosión, 2. Suelo de medio a profundo con erosión, 3. Suelo somero sin erosión, 4. Suelo somero con erosión, 5. Pérdida total del suelo.

\*La tasa de reclutamiento de juveniles, se refiere al porcentaje que representan los Agaves juveniles establecidos en relación con el total de Agaves y la información para este indicador se obtuvo del estudio de estructura y dinámica de las poblaciones de agave en la región de estudio. Para su cálculo en el periodo 1990-2001, se realizaron proyecciones en función de la tasa de aprovechamiento y la superficie aprovechada.

Los Indicadores de atributos de hábitat no mostraron variación en el tiempo: En el área de distribución del Agave más del 60% de los suelos son Litosol y Xerosol, el 72% de los Agaves se encuentran en terrenos con pendientes menores al 13%, la precipitación media para todo el periodo fue de 450 mm y la temperatura media de 17°C.

Los Indicadores de atributos de comunidad (Riqueza e Índice de diversidad), se estimaron para el año 2001: La riqueza específica varió de 17 a 26 especies en la región de estudio, mientras que el índice de diversidad estimado con la ecuación de Shanon – W varió de 0.83 a 1.251.

A continuación se presenta el comportamiento y tendencias de los indicadores sociales y económicos. Tanto para la tasa de crecimiento poblacional (Gráfica 2), como para el número de habitantes por vivienda y densidad de población (Gráfica 3), se observan incrementos en el tiempo, lo cual contrasta con el índice de sustentabilidad, por lo que la correlación que se presenta para los tres indicadores es negativa ( $r < -0.9$ ) (Tabla VI). La correlación negativa en este caso indica una clara presión de la población sobre los recursos naturales, especialmente con las poblaciones de Agave, dado que gran parte de los componentes del índice son indicadores del sistema ecológico – forestal. De los indicadores sociales con acceso a servicios (Gráfica 4), solo el porcentaje de población con acceso a agua potable presenta correlación altamente significativa ( $r=0.94$ ); sin embargo, en el caso de los indicadores Población con acceso a luz y viviendas con acceso a drenaje, las correlaciones fueron bajas pero muestran tendencias positivas, lo que refiere un incremento en los niveles de bienestar de la población que se reflejan en el índice de sustentabilidad.

Con relación a los indicadores del sistema económico, no se encontraron correlaciones altamente significativas con el índice de sustentabilidad; sin embargo, la Población Económicamente Activa (Gráfica 5) muestra una tendencia de correlación positiva ( $r=0.75$ ), mientras que la tasa de desempleo refleja una correlación negativa ( $r= -0.68$ ).

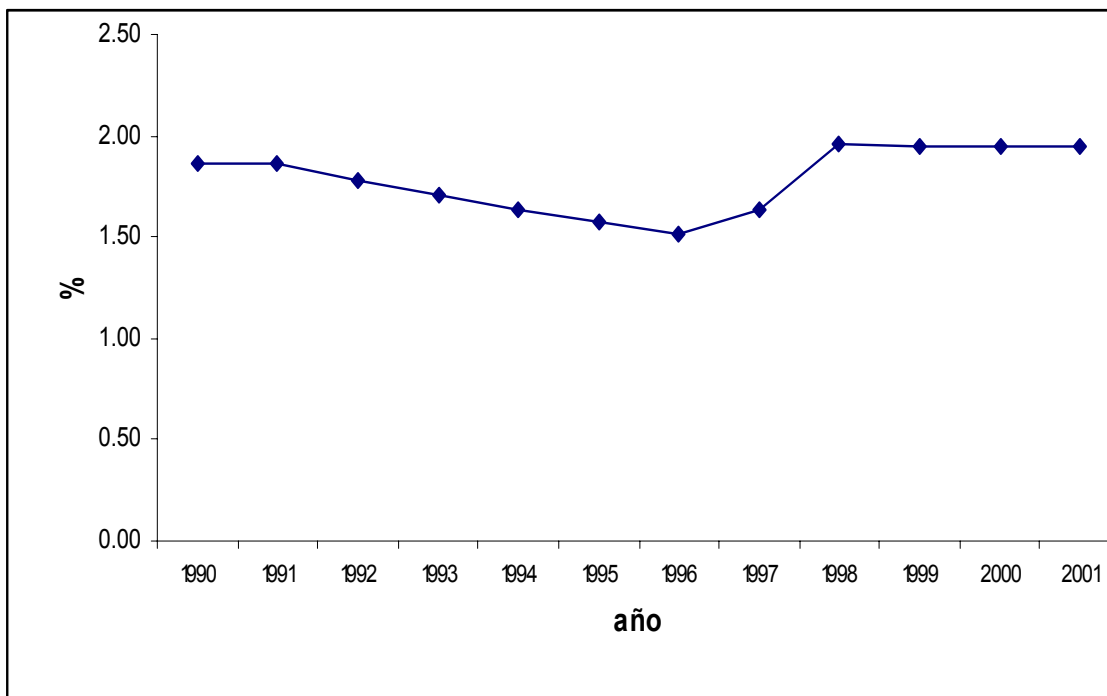
La Gráfica 5 permite observar que ha existido un incremento en la PEA en el periodo estudiado; sin embargo, no se observa un incremento importante en el número de empleos, por lo que la tasa de desempleo tiende a decrecer a un ritmo semejante que el incremento en la PEA.



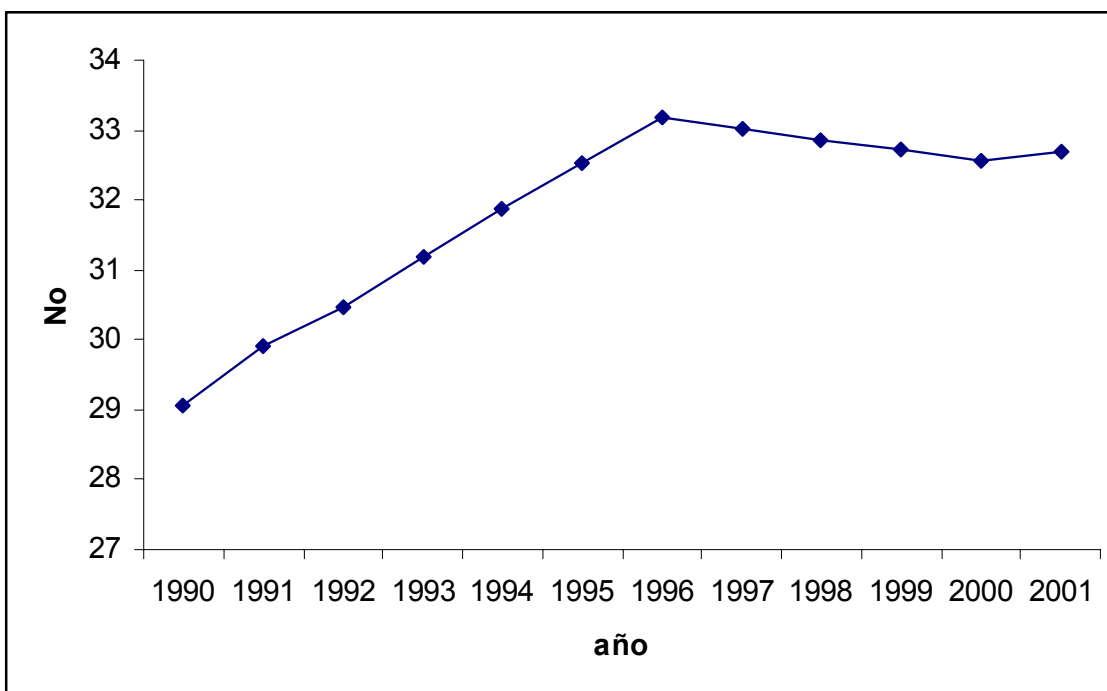
Los resultados obtenidos del índice de sustentabilidad no muestran correlaciones altamente significativas con los indicadores relacionados con ingresos y salarios, lo cual puede deberse a que estos indicadores no derivan de la cantidad de recursos captados por el aprovechamiento o la venta de Agaves o recursos forestales, sino que pueden ser el reflejo de los ingresos de alguna otra actividad relacionada con el sector primario como la agricultura o la ganadería, o bien de otro tipo de fuente de ingresos.

El comportamiento de los indicadores socioeconómicos con relación al índice de sustentabilidad indica que la población ejerce presión sobre los recursos naturales; sin embargo, la actividad forestal no genera los suficientes ingresos como para que las familias basen su sustento económico en ella. La Gráfica 6, muestra el comportamiento del ingreso mensual que obtiene un jefe de familia en la región de estudio, en ella se observa un incremento marcado para el periodo 1990 – 2001, el cual es relación del incremento nominal del salario mínimo durante todo el periodo estudiado y, al igual que el salario mínimo regional, muestra baja relación con la sustentabilidad.

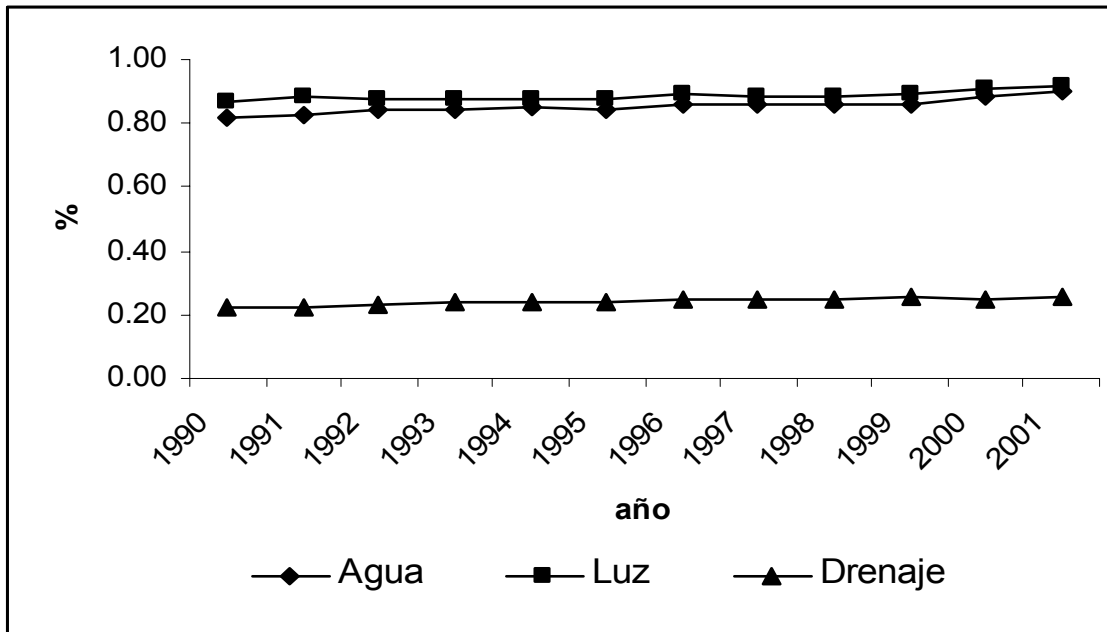
Con relación al indicador Valor de la producción de Agave con respecto al Valor de la producción en el sector primario, no se aprecia alta correlación con el índice de sustentabilidad, lo cual puede deberse al bajo valor del recurso, aunado a la falta de un programa de producción continuo, ya que en algunos años se acentúa el aprovechamiento, mientras que en otros no se reportan aprovechamientos como en los años 1995 y 1996.



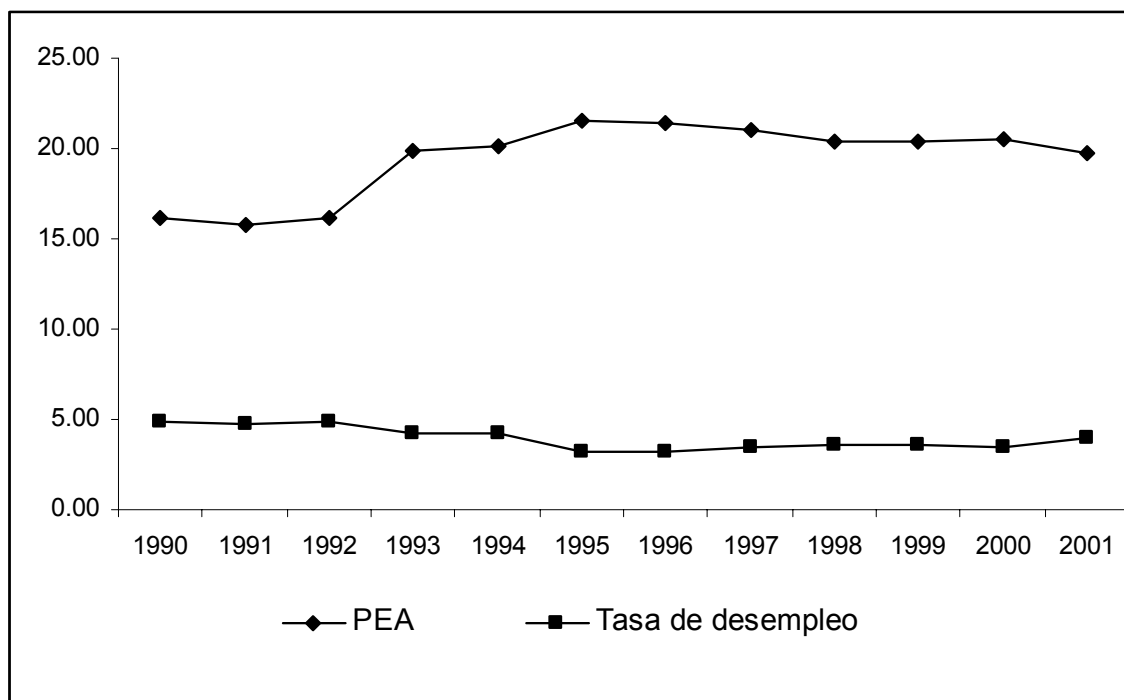
Gráfica 2. Indicador social tasa de crecimiento poblacional que muestra tendencias con el índice de sustentabilidad para la región de distribución del Agave para el periodo 1990 - 2001.



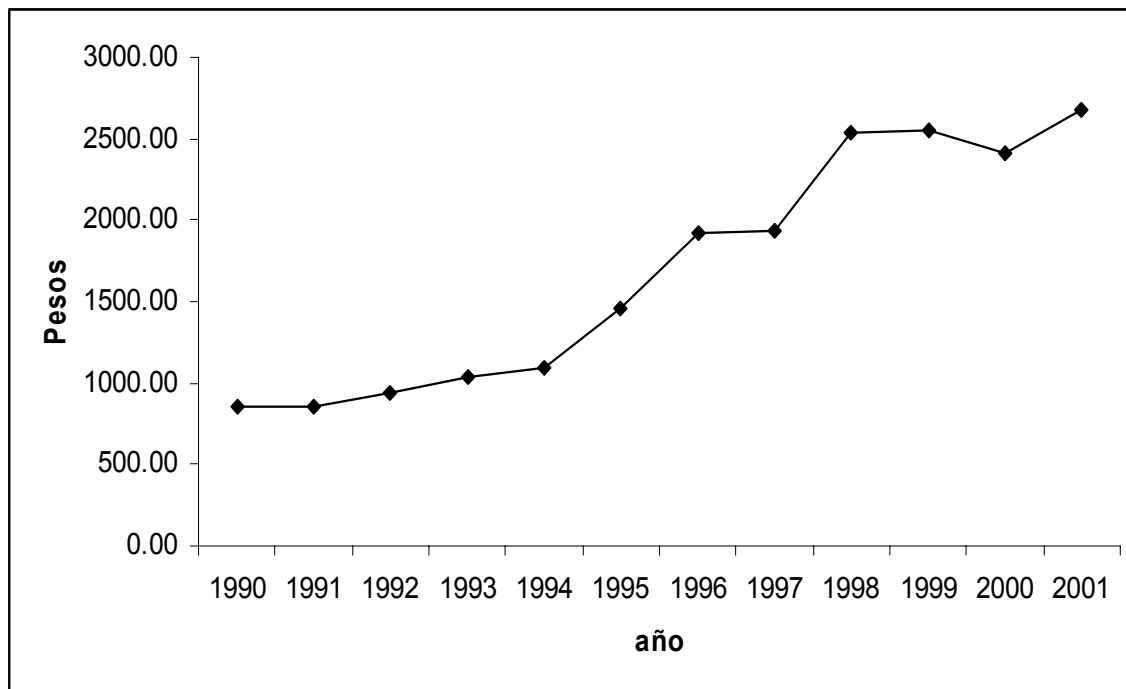
Gráfica 3. Indicador social densidad de población que muestra tendencias con el índice de sustentabilidad para la región de distribución del Agave para el periodo 1990 - 2001.



Gráfica 4. Indicador socioeconómico acceso a servicios básicos que muestra tendencias con el índice de sustentabilidad para la región de distribución del Agave para el periodo 1990 - 2001.



Gráfica 5. Indicador socioeconómico Población Económicamente Activa y desempleo que muestra tendencias con el índice de sustentabilidad para la región de distribución del Agave para el periodo 1990 - 2001.



Gráfica 6. Indicador socioeconómico ingreso mensual por jefe de familia que labora en el sector primario que muestra tendencias con el índice de sustentabilidad para la región de distribución del Agave para el periodo 1990 - 2001.

Al observar el desempeño de los indicadores del sistema ecológico-forestal, se muestra un incremento en la presión sobre los recursos naturales en la segunda mitad del periodo estudiado (1996 – 2001).

El cambio en el uso del suelo para actividades relacionadas con agricultura, ganadería y vivienda (Gráfica 7), se mantuvo por abajo del 1.5 % hasta antes de 1999, con un incremento significativo en los años 2000 y 2001 (superior al 2.5%); este cambio se debe principalmente a los incrementos en las superficies aprovechadas de Agave en los últimos tres años.

Por su parte, el porcentaje de cobertura vegetal (superficie en m<sup>2</sup> de cobertura de copa de los arbustos) mantiene un incremento que va de 38 a 43% (Gráfica 8), este indicador está relacionado con la estructura de las comunidades vegetales (Anexo C), ya que

generalmente en los lugares en los que se aprovecha el Agave se presenta una invasión de arbustos de otras especies, lo cual refleja un mayor grado de cobertura vegetal.

Para el caso del indicador condición de erosión de suelos (Gráfica 9), la información se obtuvo del diagnóstico realizado por el INE (2000). Se jerarquizaron las características del suelo con base en la siguiente clasificación: 1. Suelo de medio a profundo sin erosión, 2. Suelo de medio a profundo con erosión, 3. Suelo somero sin erosión, 4. Suelo somero con erosión, 5. Pérdida total del suelo. Al respecto, se observa un cambio en la condición de erosión de suelos en los últimos cinco años del periodo estudiado.

El Indicador Condición del acuífero (Gráfica 9) fue evaluado con información proporcionada por el INE (2000) y se jerarquizaron las características del manto freático con base en la siguiente clasificación: 1. Sin acuífero, 2. Manto sobreexplotado con mínima recarga, 3. Manto sobreexplotado con escasa recarga, 4. Manto sobreexplotado con abundante recarga y 5. Zona de recarga. Se ha identificado que para la región de estudio, la recarga del manto es casi nula; sin embargo, la sequía prolongada ha incrementado la extracción, por lo que la condición del acuífero ha pasado a categoría de manto sobreexplotado con mínima recarga.

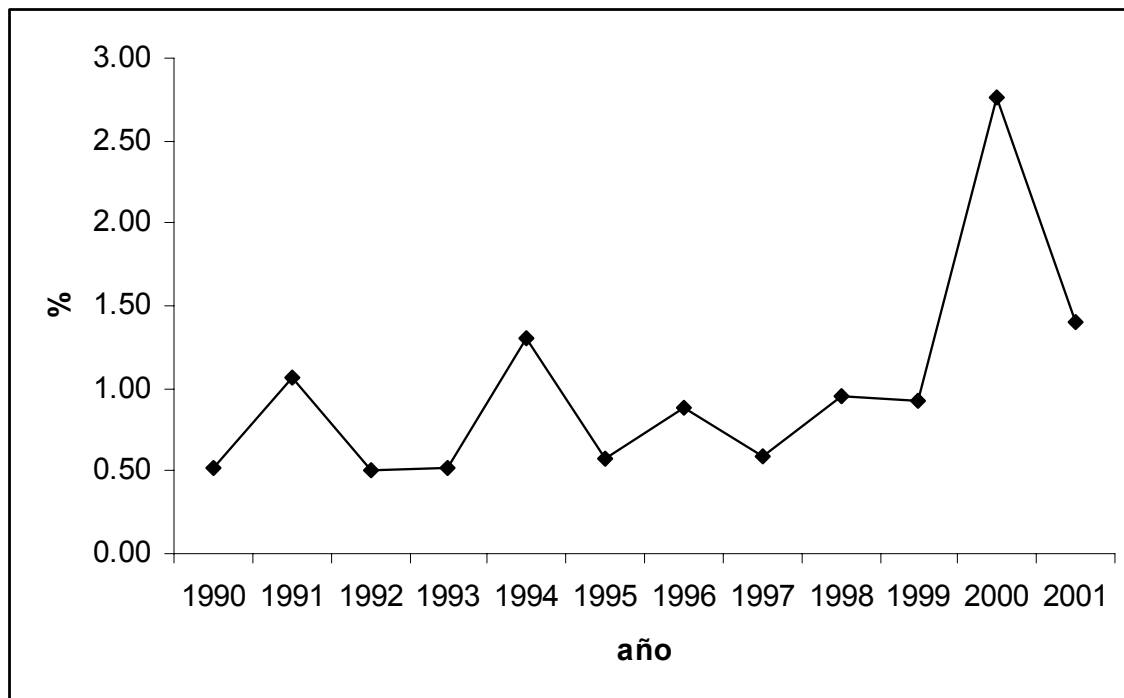
Las tendencias de los indicadores superficie aprovechada de Agaves y superficie reforestada (Gráfica 10) se muestran de forma semejante; se observan los menores aprovechamientos en el periodo 1990 – 1994, incrementando el grado de aprovechamiento a partir de 1997; de manera semejante se han realizado plantaciones en el periodo 1990 – 1993 y posteriormente se han implementado plantaciones a partir del año 1997. El incremento en ambos indicadores se debe principalmente al intenso

aprovechamiento de Agave que se realizó para abastecer la industria tequilera en los últimos años.

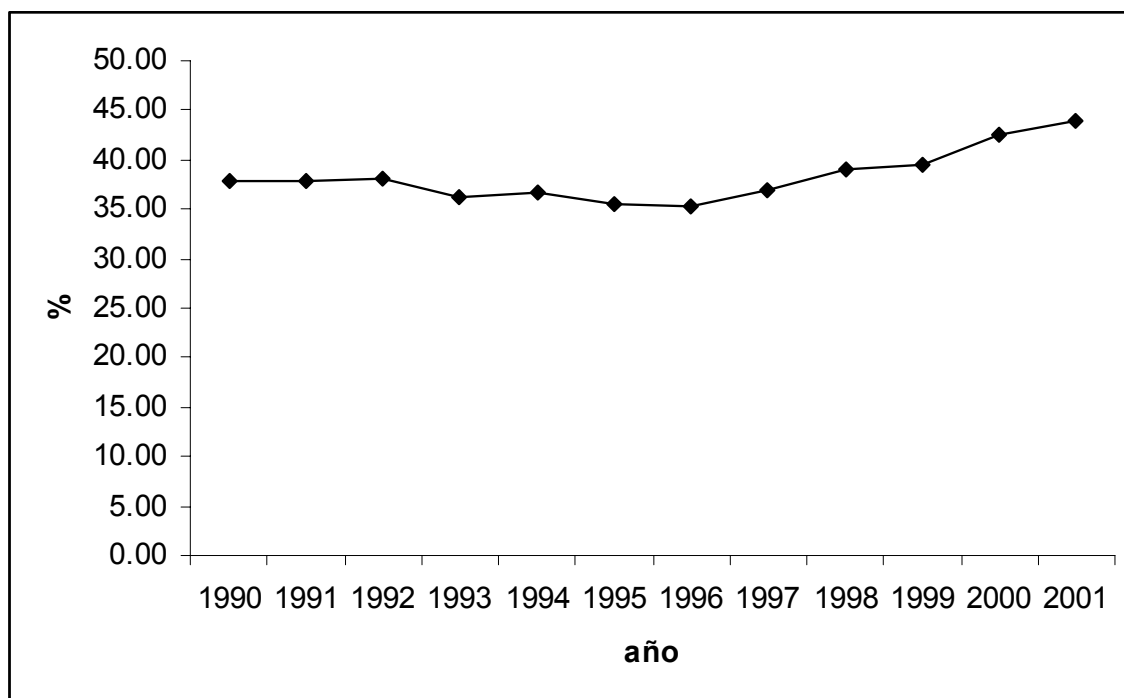
La estructura y dinámica poblacional de las poblaciones de especies forestales de uso comercial, son dos atributos ecológicos que indican la estabilidad de las especies, el riesgo de sobre aprovechamiento y el momento adecuado en el que se debe iniciar un proceso de manejo y aplicación de técnicas forestales. Esta razón funcional de los atributos ecológicos de las poblaciones de Agave llevaron a generar dos Indicadores de Sustentabilidad incorporados a la lista: Densidad de Agaves (Gráfica 11), el cual hace referencia a la cantidad de magueyes adultos, ya que el grado de aprovechamiento de la especie depende del número de magueyes adultos que se tengan y Tasa de reclutamiento (Gráfica 12), el cual hace referencia al porcentaje de Agaves juveniles que han logrado establecerse con respecto del total de Agaves por unidad de superficie (ha). La información de estos dos indicadores se obtuvo mediante un estudio de estructura de las poblaciones de Agave en la región de estudio (Anexo C). Las proyecciones de ambos indicadores para estimar su valor a partir de 1990 se realizaron mediante el apoyo del indicador superficie aprovechada de Agave.

Mediante el conocimiento de la estructura de las poblaciones de Agave y conociendo su grado de aprovechamiento fue posible realizar una análisis de simulación para estimar el comportamiento de sus poblaciones en el Futuro (Anexo D).

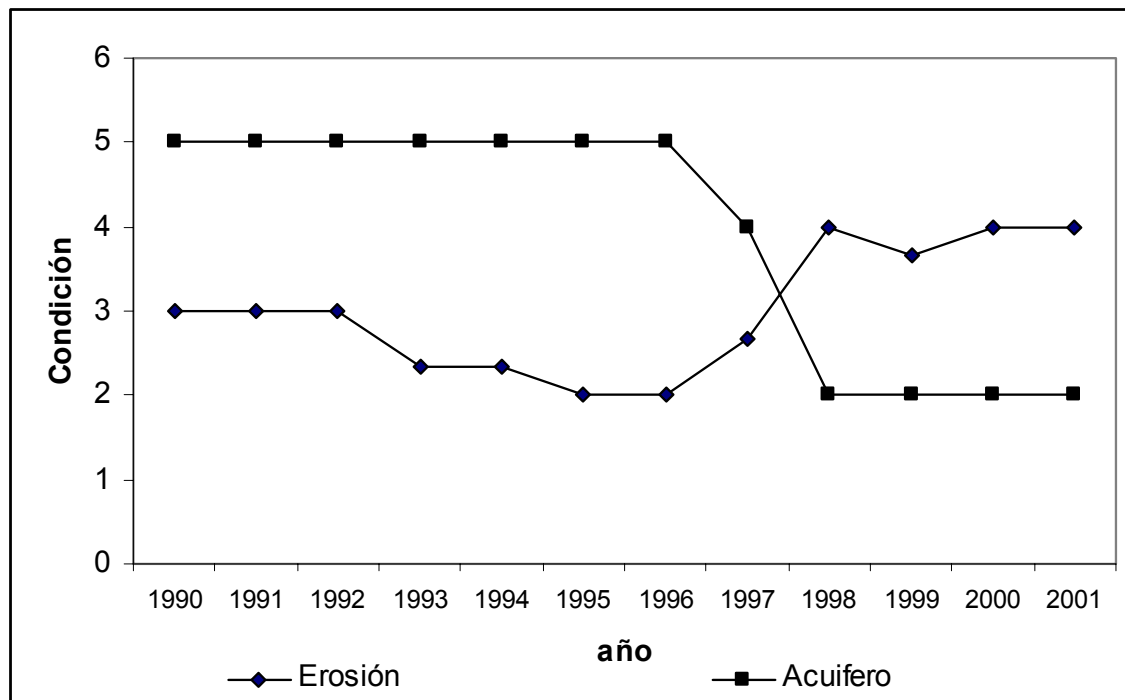
Los indicadores densidad de Agaves y tasa de reclutamiento muestran un descenso constante, con un incremento negativo en la pendiente al final del periodo estudiado. Se asume que este comportamiento se debe a la falta de programas de manejo de la especie que permita mantener o incrementar el número de individuos establecidos.



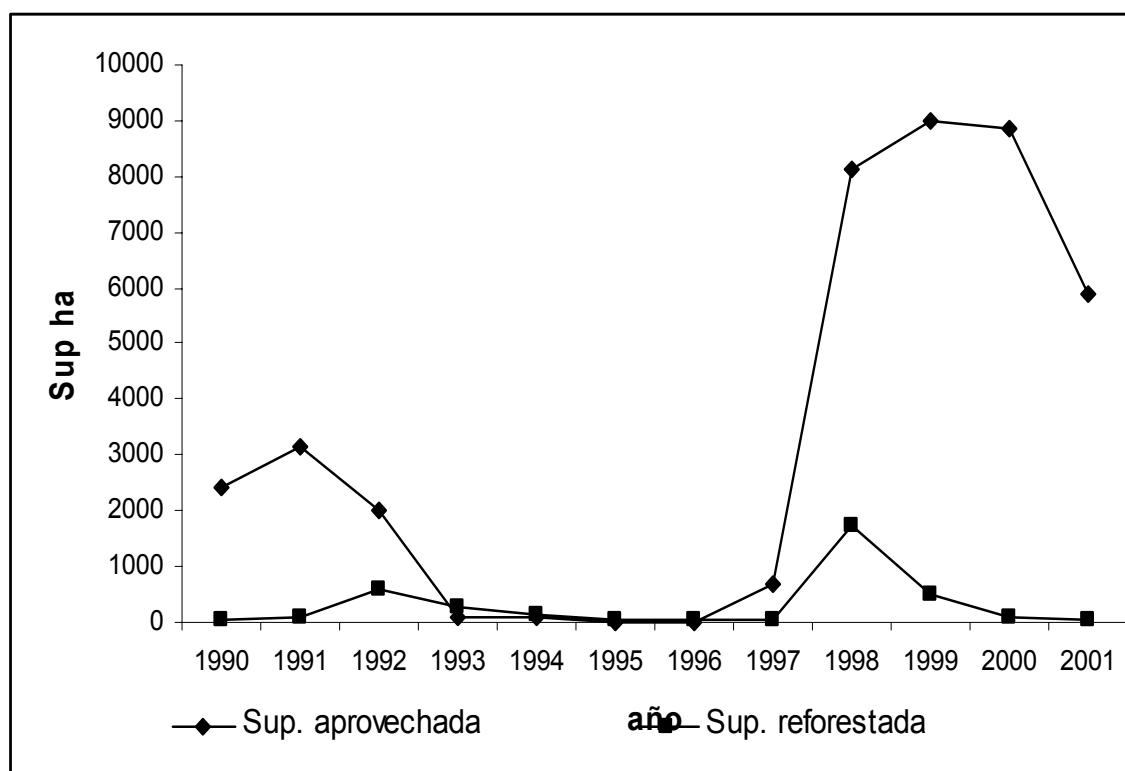
Gráfica 7. Indicador ecológico Porcentaje de cambio de uso del suelo que muestra tendencias con el índice de sustentabilidad para la región de distribución del Agave para el periodo 1990 - 2001.



Gráfica 8. Indicador ecológico Porcentaje de cobertura vegetal que muestra tendencias con el índice de sustentabilidad para la región de distribución del Agave para el periodo 1990 - 2001.

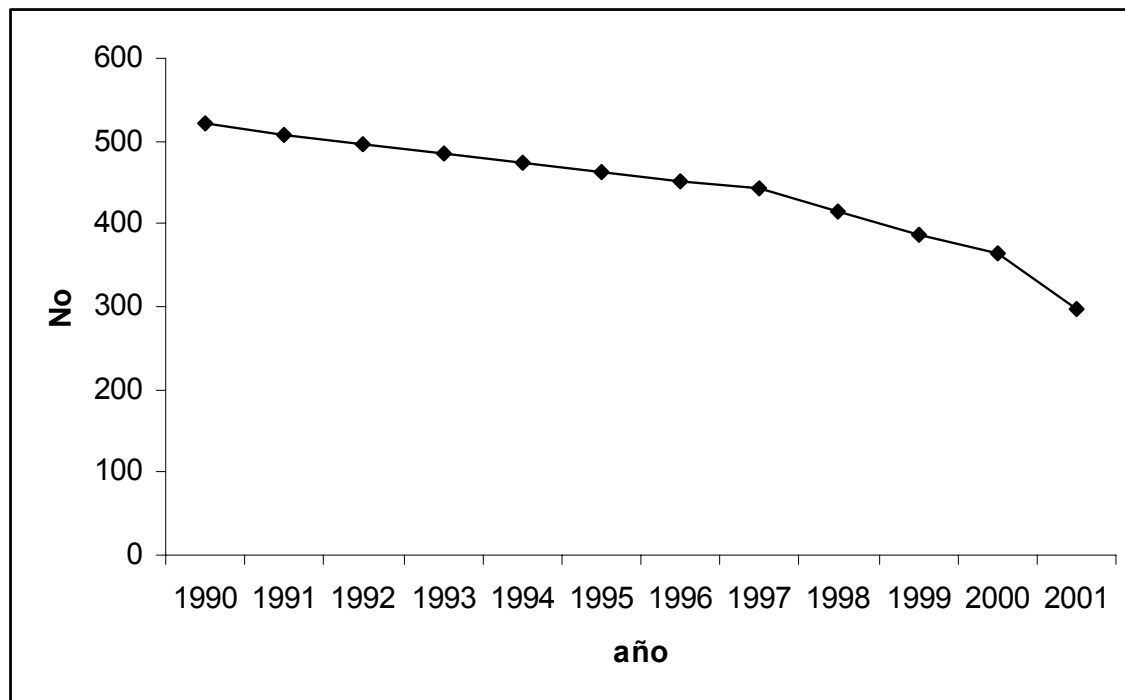


Gráfica 9. Indicador ecológico condición de erosión de suelo y Manto freático que muestra tendencias con el índice de sustentabilidad para la región de distribución del Agave para el periodo 1990 - 2001.

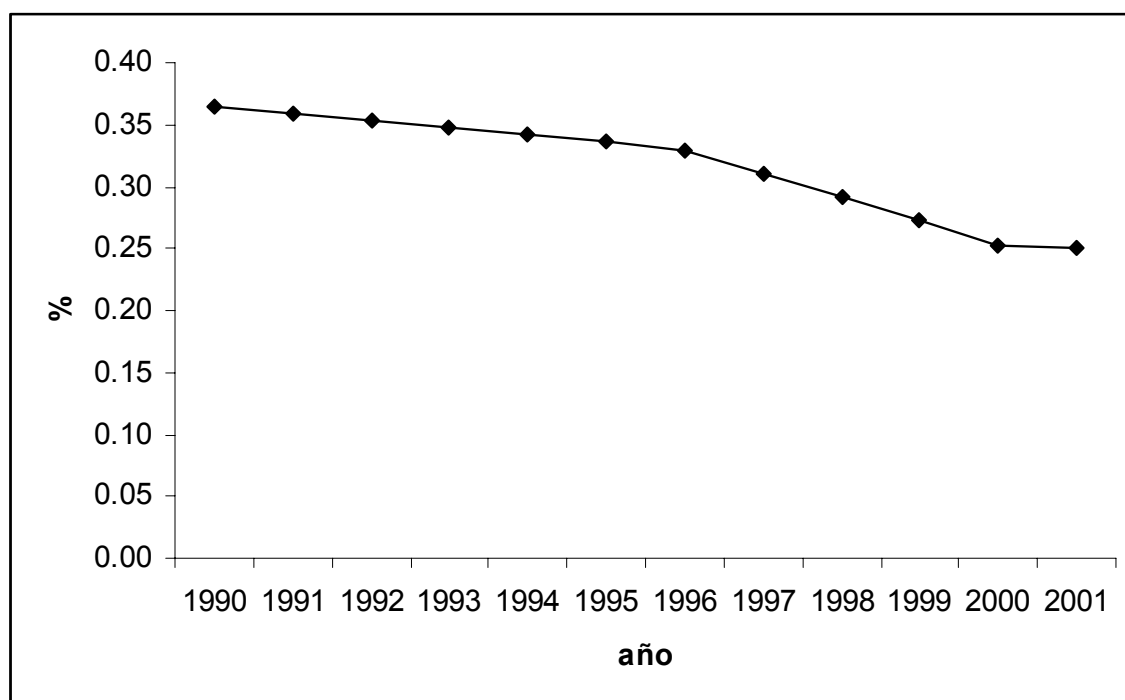


Gráfica 10. Indicador ecológico superficies aprovechada y reforestada de Agaves que muestra tendencias con el índice de sustentabilidad para la región de distribución del Agave para el periodo 1990 - 2001.





Gráfica 11. Indicador ecológico densidad de Agaves que muestra tendencias con el índice de sustentabilidad para la región de distribución del Agave para el periodo 1990 - 2001.



Gráfica 12. Indicador ecológico tasa de reclutamiento que muestra tendencias con el índice de sustentabilidad para la región de distribución del Agave para el periodo 1990 - 2001.

Tanto la densidad de Agaves como la tasa de reclutamiento muestran una tendencia de correlación positiva con el índice de sustentabilidad y ambos indicadores fueron considerados con la misma ponderación que el resto de los indicadores para la construcción del índice.

El coeficiente de correlación de Pearson (Tabla VI) muestra correlaciones significativas con cuatro indicadores sociales (Tasa de crecimiento poblacional, Número de habitantes por vivienda, Densidad de población y % Población con acceso a agua potable), tendencias marcadas con dos indicadores económicos (PEA y Tasa de desempleo), así como correlaciones significativas y tendencias con seis indicadores del sistema ecológico forestal (Superficie de Agaves, Superficie Aprovechada, Tasa de reclutamiento, Densidad de Agaves, Número de plantas por ha, % de cobertura vegetal).

Los indicadores sociales de población muestran correlación negativa que se interpretan como presión sobre los recursos naturales, mientras que los de servicios muestran tendencias positivas, lo cual indica que un incremento en los servicios que la sociedad recibe se refleja obviamente en un incremento en el índice de sustentabilidad.

Los indicadores económicos (Tabla VI) muestran tendencias positivas con correlaciones espurias, con excepción de la tasa de desempleo que muestra correlación negativa con el índice de sustentabilidad. El comportamiento de los indicadores económicos con el índice de sustentabilidad muestra que el aprovechamiento de los recursos no necesariamente está generando crecimiento económico.

Al observar el comportamiento de los indicadores del sistema ecológico se aprecian las tendencias negativas en los indicadores cambio en el uso del suelo, condición de erosión

de suelo, carga animal y superficie aprovechada, lo cual demuestra la tendencia lógica de que a mayor presión sobre los recursos, la sustentabilidad se hace más débil.

Tabla VI. Coeficientes de correlación de los indicadores de sustentabilidad con el índice de sustentabilidad construido para el área de distribución del Agave.

<b>INDICADOR</b>	<b>Coefficiente de correlación</b>
Tasa de crecimiento poblacional	<b>-0.9090</b>
Numero de habitantes por vivienda	<b>-0.9030</b>
Densidad de población	<b>-0.7101</b>
% de población con acceso a agua potable	<b>0.9452</b>
% de población con acceso a luz	0.0957
% de viviendas con acceso a drenaje	<b>0.6132</b>
Tasa de analfabetismo	-0.2476
Valor de la producción de Agaves / sector primario	0.1527
Población Económicamente Activa	0.7557
Tasa de desempleo	<b>-0.6889</b>
Salario mínimo regional	0.3163
Ingreso mensual por jefe de familia	0.3447
Riqueza específica	0.2990
Índice de diversidad	0.2667
Numero de plantas por ha	<b>0.8227</b>
% de cobertura vegetal	<b>0.6149</b>
Superficie forestal	0.5032
Superficie de agostadero	-0.2001
Densidad de Agaves	<b>0.7037</b>
Tasa de reclutamiento	<b>0.8731</b>
% de cambio en el uso del suelo	-0.3804
Condición de erosión de suelo	-0.4666
Condición del manto freático	<b>0.8376</b>
Carga animal	-0.1372
Superficie Aprovechada	<b>-0.7186</b>
Superficie reforestada	0.1949
Superficie de Agaves	<b>0.8743</b>

Los Indicadores F1, F2, F3, F4, corresponden a tipo de suelo, relieve, precipitación y temperatura,, corresponden al criterio atributos de hábitat, estos indicadores son descriptivos del hábitat de la especie, y adquieren un solo valor para todo el periodo estudiado por lo que no se realizó el análisis de correlación con el índice. Los indicadores F13, F14, F15 y F16, corresponden a la estructura poblacional de los Agaves, la cual se obtuvo mediante un estudio de las poblaciones de la especie en el área de estudio, el valor de estos indicadores es exclusivo para el año 2001, por lo que no se incluye una correlación en el periodo estudiado.

Los indicadores riqueza específica, índice de diversidad, superficie forestal, superficie reforestada muestran tendencias positivas con respecto al índice de sustentabilidad, ya que el aumento en el valor de estos indicadores se traduce en una mejora del sistema

ecológico en su conjunto. Por su parte, los indicadores Superficie de Agostadero, Cambio en el uso del suelo, Condición de erosión de suelos y Superficie aprovechada muestran tendencias negativas con el índice, refiriendo impacto sobre los recursos naturales.

### **3.3 Índice de sustentabilidad**

En este apartado se describen los resultados encontrados al construir el índice de sustentabilidad para la región de estudio a partir de una serie histórica de los valores de indicadores de sustentabilidad previamente seleccionados.

Cada indicador ejerció la misma importancia y peso sobre la construcción del índice; sin embargo, se ha considerado un mayor número de indicadores del sistema ecológico forestal, al que se han sumado indicadores de hábitat, comunidad, población y uso, los cuales tienen relación con la estructura y dinámica de las poblaciones de Agave en la región sureste del estado de Zacatecas.

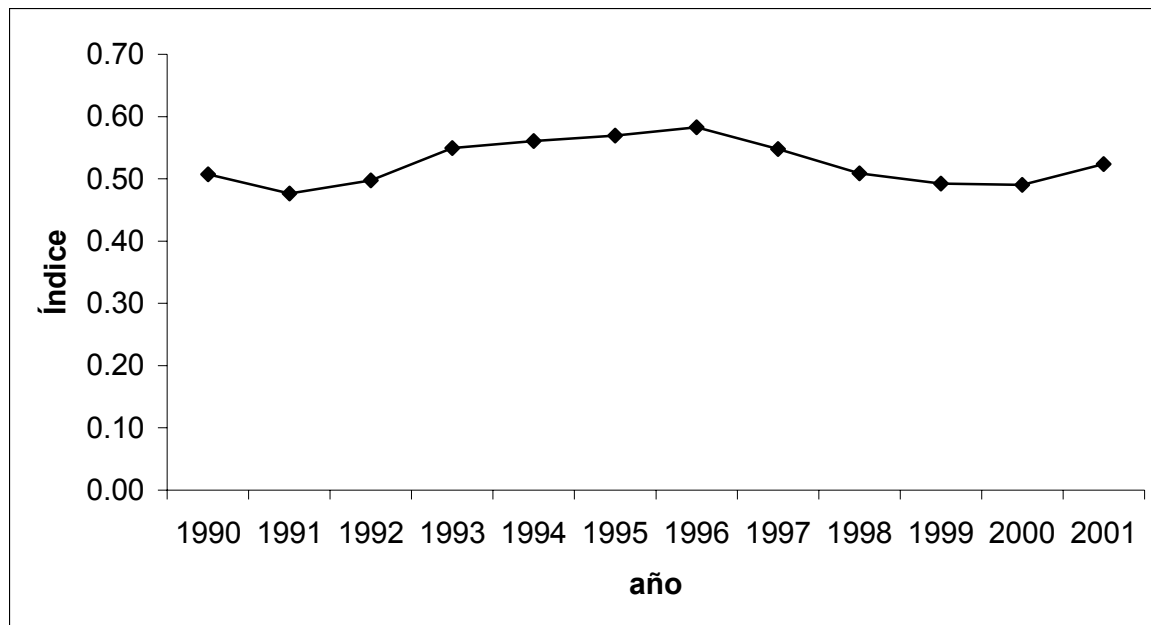
Se ha propuesto como Modelo el estudio del desempeño de la sustentabilidad en la región donde se distribuyen la especie *Agave salmiana* ssp *crassispina*, como una alternativa para describir los efectos del incremento en las tasas de aprovechamiento de Agave en los últimos años; sin embargo, el método para estimar la sustentabilidad y el modelo seguido en la presente investigación puede acoplarse para evaluar el desempeño de la sustentabilidad en diferentes ecosistemas donde se tengan especies comerciales con manejo.

La aplicación de las ecuaciones a partir del uso de los indicadores de sustentabilidad han dado como resultado la obtención del índice de sustentabilidad, el cual obtiene valores

continuos dentro de un intervalo comprendido entre 0 y 1 (cero y uno). Los valores del índice han sido clasificados jerárquicamente de la siguiente manera: 0-0.5 bajo, 0.51 – 0.7 medio bajo, 0.71 – 0.8 medio alto, 0.81 – 1.0 alto.

La grafica 13 muestra el desempeño del índice de sustentabilidad en el periodo (1990-2001). Se observa un incremento en el índice de sustentabilidad en los primeros cinco años del periodo. Al comparar el índice con los indicadores de sustentabilidad se observan tasas de crecimiento poblacional menores en los años 1990 – 1995; por otra parte, la presión sobre los recursos naturales (cobertura vegetal, Número de plantas, % de cambio en el uso del suelo) fue menor en ese periodo; sin embargo, el índice en este periodo no presenta cambios fuertes, de tal manera que permanece en la misma categoría MEDIO BAJO, inicia en 1990 con un valor de 0.52 y alcanza su máximo en 1996 con 0.60 como se muestra en la Tabla VII.

En el periodo de 1997 – 2000 se observa un decremento en el índice. Este decremento se atribuye al aprovechamiento mayor que se tuvo sobre el Agave en especial en este periodo, ya que a partir de 1997 de una superficie aprovechada de 705 ha se pasa a superficies de 8 000 ha y más, disminuyendo a 5 888 en el año 2001 (cifras reportadas a la SEMARNAT y las otorgadas por la Organización de Magueyeros Zacatecanos). Este incremento en la superficie y volumen aprovechado tiene una clara influencia en el comportamiento de otros indicadores como la Densidad de Agaves, Tasa de reclutamiento, cambio en el uso del suelo y Número de plantas por ha, lo cual genera que el índice de sustentabilidad disminuya gradualmente.



Grafica 13. Índice de sustentabilidad para el área de distribución del Agave.

Muestra una representación gráfica del desempeño de la sustentabilidad, se observa que a pesar de los leves incrementos y decrementos del índice, este se mantiene en el mismo intervalo jerárquico de sustentabilidad (0.5 – 0.7 MEDIO BAJO).

Tabla VII. Desempeño del índice de sustentabilidad en el área de distribución del Agave

AÑO	Índice de sustentabilidad
1990	0.51
1991	0.48
1992	0.50
1993	0.55
1994	0.56
1995	0.57
1996	0.58
1997	0.55
1998	0.51
1999	0.49
2000	0.49
2001	0.52

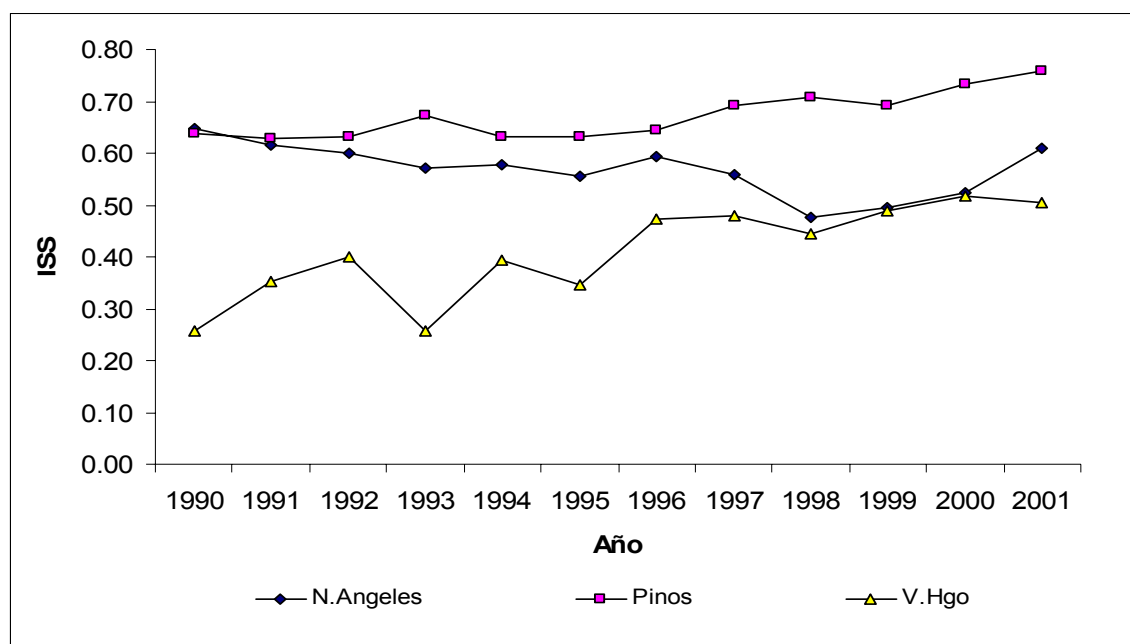
La Tabla VII muestra los valores que adquirió el índice de sustentabilidad a partir de 1990 hasta el año 2001, se observa un incremento en el periodo 1990-1996 y un decremento en el periodo 1996-2000, volviendo a incrementar en el año 2001. Al contrastar el comportamiento del índice con los indicadores de sustentabilidad a partir de los cuales fue construido, se asume que los indicadores de presión del sistema ecológico forestal y los indicadores de crecimiento poblacional, densidad de población y número de habitantes por vivienda, son los que ejercen mayor influencia en el incremento o decremento del índice de sustentabilidad.

### **3.3.1 Índice de Sustentabilidad Ecológico Forestal y su relación con los índices Social y económico**

Con la finalidad de evaluar el desempeño de índices para cada sistema que integra la teoría de sustentabilidad, se evaluaron de manera independiente los índices de los sistemas social, económico y ecológico forestal, comparando además el comportamiento de los índices entre los municipios estudiados.

El índice de sustentabilidad social (Gráfica 14) muestra tendencias de crecimiento positivas para los tres municipios y se observa un crecimiento continuo durante todo el periodo; sin embargo, al realizar comparaciones entre municipios existen diferencias marcadas, de tal manera que el municipio de Pinos presentó los índices más altos, con un incremento de 0.64 a 0.76 en el periodo 1990 – 2000; sin embargo, fue a partir del año 1998 que el índice arrojó valores clasificados en el intervalo de sustentabilidad medio alto, lo cual muestra el reflejo de una mejora en el acceso a servicios y decrementos en la tasa de crecimiento poblacional para este municipio. Por su parte, para el municipio de Villa Hidalgo se han estimado los índices sociales más bajos; en este caso la tasa de crecimiento poblacional ha tenido gran influencia, ya que para 1990 – 1995 se reportan valores superiores al 3.5 %, casi cuatro veces mayor a las tasas de crecimiento reportadas en los municipios de Pinos y Noria de Ángeles. Estos incrementos en población generaron aumentos en los valores de densidad de habitantes y refleja menores proporciones en el acceso a servicios; por lo tanto, los indicadores muestran valores más bajos que en los otros dos municipios estudiados, finalmente, se refleja en valores bajos al construir los índices de sustentabilidad exclusivamente con los indicadores sociales. Para el municipio de Noria de Ángeles se observa un decremento continuo y estable en el

índice de sustentabilidad social pasando de 0.65 en 1990 a 0.48 en 1998 y, posteriormente, de nuevo se incrementa hasta 0.61 en el año 2001. El índice no mostró variaciones grandes en el periodo estudiado manteniéndose en el nivel MEDIO BAJO con excepción de los años 1996 y 1997 en los que bajó de 0.5 a el nivel BAJO.



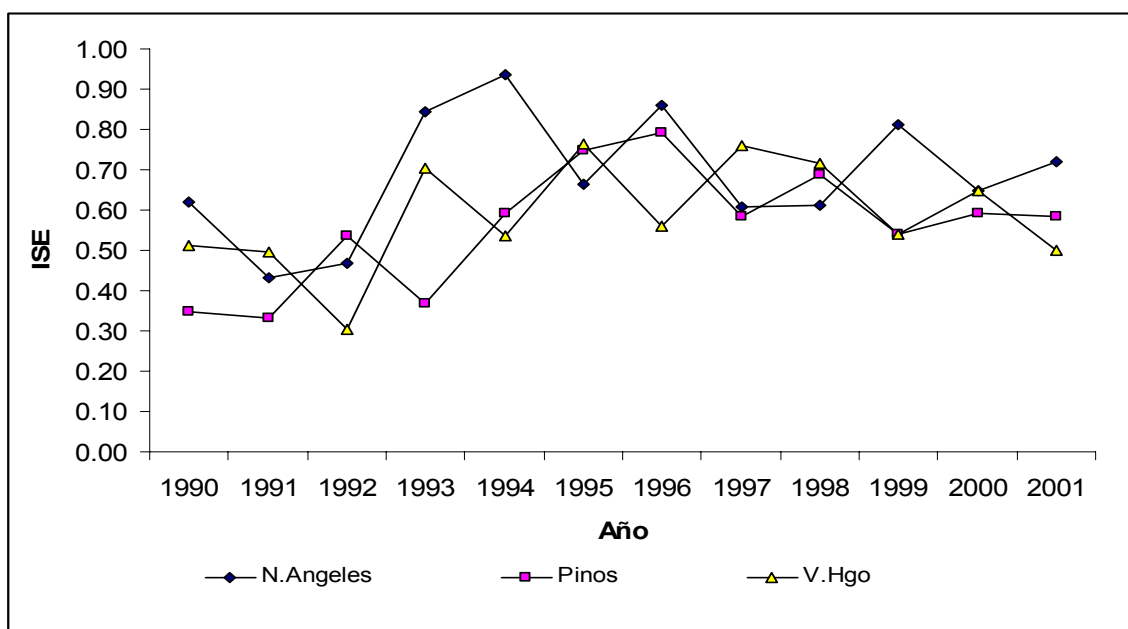
Gráfica 14. Desempeño del índice de sustentabilidad social para cada municipio del área de distribución del Agave.

Al graficar los índices del sistema económico (Gráfica 15), para los tres municipios en los que se realizó el estudio, se observa un incremento en el periodo 1990 – 1994 y posteriormente un comportamiento más estable a partir de 1995.

A diferencia del índice social, el índice económico presentó los valores más altos en los municipios de Noria de Ángeles y Villa Hidalgo y los valores más bajos en el municipio de Pinos. En el municipio de Villa Hidalgo se presentó el índice social más bajo; sin embargo, el índice económico presenta, en general, valores superiores a 0.5, lo que indica que valores superiores en los indicadores económicos no necesariamente generan un



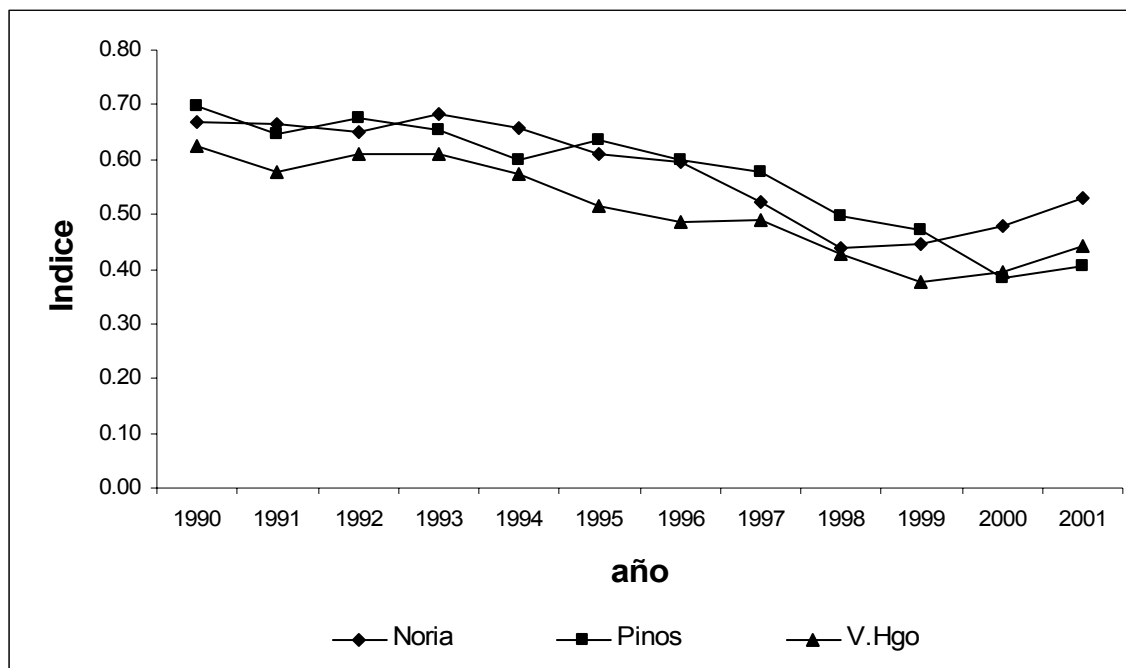
incremento en los valores de los indicadores sociales y viceversa, pues en el municipio de Pinos el índice de sustentabilidad social fue superior a 0.6, mientras que el índice de sustentabilidad económico presenta valores menores a 0.5 en el periodo 1990-1993 y valores en promedio de 0.59 el resto del periodo. Por su parte, el municipio de Noria de Ángeles presenta los índices económicos más altos con valores de sustentabilidad calificados como medios altos (mayores a 0.7).



Grafica 15. Desempeño del índice de sustentabilidad económico para cada municipio del área de distribución el Agave.

Con relación al índice de sustentabilidad ecológico forestal (Gráfica 16), el desempeño en el periodo 1990 – 2000 mostró un decremento generalizado, con un decremento más acelerado a partir de 1997. El municipio que presenta los más altos índices en el periodo 1990 – 1997 es Noria de Ángeles; en este municipio, las poblaciones de Agave presentan media densidad y las tasas de reclutamiento son aceptables; sin embargo, el incremento en las tasas de aprovechamiento, a partir de 1997, ocasiona que el índice de

sustentabilidad disminuya más rápidamente. Una situación similar se presenta con los municipios de Villa Hidalgo y Pinos.



Grafica 16. Desempeño del índice de sustentabilidad Ecológico Forestal para cada municipio del área de distribución del Agave.

Es notable que mientras los índices social y económico crecen y en algunos periodos permanecen constantes en el tiempo, el índice de sustentabilidad forestal disminuye gradualmente. La Gráfica 16 muestra que ha existido deterioro en el ecosistema ecológico forestal, el cual se encuentra en niveles de sustentabilidad considerados como BAJOS y que el deterioro fue causado por un aprovechamiento de recursos carente de manejo, ya que las tasas de reforestación o manejo no son semejantes a las de aprovechamiento; el cambio en el uso del suelo también se incrementa negativamente y cambia la condición de erosión del suelo, lo cual indica una falta de planeación en el manejo de los recursos. Por otra parte, se aprecia también que el aprovechamiento de los

recursos forestales no muestra un impacto directo en el nivel de vida de la sociedad, al menos en el sector primario.

## Capítulo 4. DISCUSIÓN

La evaluación de sustentabilidad usando indicadores ecológicos, económicos y sociales se ha convertido en un área de constante investigación a nivel internacional. La intención es evaluar la relación de cambios ambientales y sociales relacionados con las actividades económicas en las que la sociedad hace uso de recursos naturales (Morse *et al.*, 2004).

Diferentes organizaciones y programas de la Organización de Naciones Unidas han implementado procesos y protocolos para la generación de indicadores a fin de evaluar la sustentabilidad en diferentes regiones del mundo. Estos esfuerzos han concluido en su mayoría en la generación de indicadores para evaluar sustentabilidad a nivel nacional.

Existen, además, compromisos entre las naciones para cuantificar los indicadores generados, implementar nuevos métodos de monitoreo que propicien la generación de información y establecer políticas para disminuir los niveles de contaminación, propiciar la conservación de los recursos naturales e incrementar la calidad de vida de la sociedad.

En materia forestal, México forma parte del protocolo conocido como Proceso de Montreal, en el que se compromete a realizar periódicamente informes sobre el estado actual que guardan los recursos forestales del País (Narváez *et al.*, 2003); sin embargo, este proceso hace referencia únicamente a los bosques templados y boreales, por lo que es necesario el implementar procesos que intervengan en el manejo de los bosques tropicales, zonas áridas, selvas bajas y zonas costeras.

Un factor importante en el proceso de evaluación de sustentabilidad corresponde al nivel espacial de la evaluación (escala) (Martin y Lemon, 2001), ya que de ello dependerá en gran medida la disponibilidad de información para realizar las evaluaciones.

La gran mayoría de los indicadores propuestos en el mundo se aplican a nivel nacional y muy pocos de ellos son monitoreados a escala local. Los informes de sustentabilidad que realizan los países son por lo tanto un reflejo de la suma de las condiciones locales que dan como resultado un panorama general de la situación actual; no obstante, existen numerosos casos especiales a escala local, los cuales requieren de la aplicación de estrategias que propicien un mejor uso de los recursos, como es el caso de las especies comerciales forestales (Pinos, Encinos, Mezquites, Magueyes, Nopales, Cedros, Caoba, etc.).

El grupo de indicadores evaluados en la presente investigación representa una alternativa sencilla para evaluar el desempeño de sustentabilidad de especies con algún tipo de aprovechamiento.

Es necesario incorporar indicadores relacionados con el uso y manejo de la especie y resulta de utilidad estratificar los indicadores según el criterio al que pertenezcan. Para el caso del ecosistemas forestales se ha establecido incorporar criterios e indicadores en cuatro grupos: **Atributos de hábitat**, Tipo de suelo, Tipo de relieve, Precipitación, Temperatura, **Atributos de comunidad**, Riqueza, Índice de diversidad, Número de plantas por hectárea, Porcentaje de cobertura vegetal, Superficie forestal, Superficie de agostadero **Atributos de población**. Densidad de Agaves, Tasa de reclutamiento, Juveniles, Prerreproductivos, Reproductivos, Maduros. **Atributos de Uso**. Porcentaje Cambio en el uso del suelo, Unidades animal en agostadero, Condición de erosión de suelo, Condición del manto freático, Superficie aprovechada, Superficie reforestada y Superficie de Agaves.

Una de las características más importantes de un indicador está relacionada con su sensibilidad a los cambios (Narváez, 2003). En este sentido algunos indicadores como tipo de suelo, tipo de relieve, precipitación, y temperatura, no son muy sensibles a cambios ocasionados por el aprovechamiento de las especies, al menos en periodos cortos de evaluación; sin embargo, es importante considerar indicadores para caracterizar el ecosistema estudiado, dada su gran utilidad para determinar áreas de máximo potencial para el establecimiento y desarrollo de las especies. Del análisis de tales indicadores partirá la primera recomendación para el aprovechamiento de cualquier especie estudiada, ya que el esquema ideal de manejo supone el aprovechamiento de especies solo en aquellos sitios con características idóneas para su establecimiento y desarrollo. En el caso de la región de estudio, se ha estimado que existen aproximadamente 28 000 ha con potencial apropiado para el desarrollo de poblaciones de Agave (Anexo A).

Otro aspecto primordial a considerar en el estudio de sustentabilidad para especies espontáneas de interés comercial es la inclusión de atributos de la estructura y dinámica de las poblaciones, como una alternativa para identificar las posibilidades de aprovechamiento de la especie. En el caso de los Agaves se han incluido cuatro indicadores relacionados con la estructura de su población, cada indicador está relacionado con clases de edad de la especie (Agaves Juveniles, Prerreproductivos, Reproductivos y Maduros); por otra parte se han incluido dos indicadores relacionados con dinámica de las poblaciones, 1. Tasa de reclutamiento que corresponde al porcentaje de Agaves juveniles establecidos en relación con el total de la población (Regeneración), y 2. Densidad de Agaves, que corresponde al número de individuos por hectárea.

El principal problema en el método de evaluación es la disponibilidad de información, ya que este proceso requiere de series históricas de datos. Se ha detectado que solo algunas variables que componen a los indicadores económicos y sociales son periódicamente monitoreadas y tienen información disponible en la escala más baja a nivel municipal; en cambio, para el caso de los indicadores ecológico forestales propuestos, solo Cambio en el uso del suelo, Condición de erosión de suelo, Tipo de suelo, Tipo de relieve, Precipitación, Temperatura, Condición del acuífero y Carga animal son monitoreados en periodos discontinuos, mientras que el resto de los indicadores no son monitoreados para ninguna de las especies de uso forestal. Es recomendable entonces que los manejadores de los recursos forestales implementen estrategias para su medición; además, el gobierno deberá realizar grandes esfuerzos para monitorear el comportamiento de variables socioeconómicas a nivel de localidad o unidad de producción.

En el caso específico del presente trabajo, el desempeño del índice de sustentabilidad estimado sugiere que el crecimiento de la población tiene gran influencia en el uso de los recursos; sin embargo, el aprovechamiento de los recursos no tiene influencia en el desarrollo económico al menos del sector primario en la región de estudio. Este fenómeno puede deberse a que el valor que se da a los recursos no es el apropiado y que los beneficios generados por el aprovechamiento de la especie se retienen en el proceso de transformación de la materia prima. Esta situación puede ser una constante en el proceso de aprovechamiento de los recursos forestales de cualquier ecosistema del país.

El construir índices independientes por sistema (económico, social y ecológico forestal), hace posible observar la condición de estabilidad que presenta cada sistema, de tal manera que los valores de los índices económicos y sociales en general fueron menores a

0.7 (MEDIO BAJO); en el caso del índice de sustentabilidad forestal, éste tuvo valores incluso menores a 0.5 (BAJO). Este comportamiento de los índices indica, por una parte, que se requieren grandes esfuerzos por incrementar el nivel de vida de la gente y hacer del aprovechamiento de los recursos una actividad rentable; y por la otra, que se trata de ecosistemas altamente frágiles, en los que la falta de manejo en el aprovechamiento de recuráoslas especies pone en riesgo la estabilidad del ecosistema.

El desempeño del índice en el tiempo muestra una disminución más pronunciado a partir de 1998 hasta el año 2000; al comparar este comportamiento con los indicadores, se observa que fue en estas fechas que el aprovechamiento del recurso se disparó considerablemente.

Al respecto y como parte del estudio realizado para la obtención de información de los indicadores ecológico forestales, los datos de estructura y dinámica poblacional de los Agaves muestran el grado de mortalidad o aprovechamiento de la especie en etapas intermedias de crecimiento y ponen de manifiesto la fragilidad de sus poblaciones silvestres ante un esquema inadecuado de aprovechamiento; en este sentido, Nobel (1998) menciona que el aprovechamiento de piñas para la elaboración de mezcal, cuando se realiza en poblaciones espontáneas de Agaves tiene consecuencias ecológicas severas. Para el caso de la región de estudio, el aprovechamiento de individuos que aún no han alcanzado la madurez y el sobrepastoreo disminuyen la reproducción por semilla y afectan también a la reproducción asexual, ya que las plantas de tamaños intermedios son las de mayor aporte por su alta densidad (Tello, 1988).

Se ha estimado que existen más de 12 millones de Agaves en etapa reproductiva y casi diez millones de Agaves maduros, por lo que se tiene un promedio de 22 millones de



Agaves con posibilidades de generar vástagos y en este caso coincidimos con la investigación realizada por Martínez (1988) en la que resuelve que la producción de vástagos sería suficiente para reemplazar a los adultos removidos por recolección; sin embargo, la mortalidad de plantas juveniles es alta en las poblaciones, lo que puede llegar a constituir un serio problema en un futuro; en consecuencia, se considera que sería necesario un adecuado programa de aclareos y trasplantes para lograr mantener la regeneración continua de las poblaciones de esta especie. Estas prácticas resultarían de gran importancia ya que la producción vegetativa mediante la producción de vástagos es determinante en el mantenimiento de las poblaciones de maguey, ya que constituye el único medio seguro de producción de nuevas plantas ante la escasa producción de semilla (Martínez, 1985), dado que en condiciones normales solo una semilla de medio millón a un millón germina y la planta originada crece hasta la madurez (Gentry, 1982).

Finalmente, el análisis del índice de sustentabilidad y las comparaciones entre sistemas y municipios muestran que el municipio que tiene más recursos (Pinos), no es el que tiene mejor situación económica, mientras que el que tiene menos recursos Noria de Ángeles es el que presentó mejores niveles en sus índices económicos y sociales. Esto puede deberse a que la mayoría de las familias de cada municipio, aunque realizan presión sobre los recursos naturales, no basan su sustento en el aprovechamiento de los mismos y obtienen ingresos de alguna otra actividad productiva o, en su caso, de remesas que sus familiares envían del extranjero.

El modelo usado para la construcción del índice puede ser validado para diferentes especies y a nivel de predio bajo manejo, sobre todo en aquellos predios que cuentan con programas de manejo forestal autorizados por la SEMARNAT.

## Capítulo 5. CONCLUSIONES.

El modelo usado para medir la sustentabilidad representa una alternativa sencilla para evaluar el desempeño de cualesquier actividad productiva que realice la sociedad en la que involucre el aprovechamiento de una especie; sin embargo, para no cometer errores de interpretación se deberá tener especial atención en:

- a). Contar con series históricas de información para cada entidad estudiada
- b). Contar con información confiable y clara.
- c). Poner especial atención al sentido de los indicadores, e.g. una cobertura vegetal menor afectará negativamente a la sustentabilidad; sin embargo, a mayores tasas de reforestación, el efecto sobre el índice de sustentabilidad será mayor, por lo tanto cada indicador se debe evaluar de manera independiente con las ecuaciones propuestas.

En materia forestal, al igual que algunos indicadores sociales y económicos, los indicadores densidad de Agaves, tasa de reclutamiento, cobertura vegetal, número de plantas por hectárea, no son medidos periódicamente por instancias de gobierno, por lo que se requieren de arduo trabajo de campo para obtenerlos.

Las instituciones gubernamentales del sector deberán hacer un gran esfuerzo por monitorear periódicamente indicadores que revelen la dirección del cambio en los tres sistemas que integran la teoría de sustentabilidad, de tal manera que en el mediano plazo sea posible contar con información confiable y series que permitan implementar no solo procesos de evaluación, sino procesos de simulación que permitan generar información sobre tendencias a futuro, lo cual sería de gran utilidad para elaborar planes de manejo de los recursos.

La conservación y el manejo de los ecosistemas forestales es de vital importancia ya que de ello dependen recursos que se han convertido en temas de seguridad nacional como el agua, el suelo y la biodiversidad.

La evaluación del desempeño de sustentabilidad del uso y manejo de especies de interés comercial que habitan en ecosistemas espontáneos, requiere de información de atributos de la población en estudio (Estructura poblacional, regeneración o Tasa de reclutamiento, densidades), así como atributos de su hábitat (precipitación, temperatura, suelos, relieve), ambos atributos son de gran utilidad para evaluar el estado actual de la especie, la posibilidad de aprovechamiento, así como las áreas de mejor potencial para el desarrollo de la especie.

Ante la inexistencia de información relacionada con el ecosistema, la estructura y dinámica de las poblaciones de uso comercial, es necesario el realizar muestreos dirigidos a las áreas de distribución de las especies, lo cual encarece los costos en el proceso de evaluación.

En el caso especial del Agave, se ha identificado que la tasa de crecimiento poblacional e los seres humanos tiene un efecto negativo sobre la sustentabilidad y afecta considerablemente al ecosistema ecológico forestal; sin embargo, el aprovechamiento de los recursos no se refleja en un incremento significativo en el nivel de vida de la sociedad, ni en un crecimiento en los indicadores económicos del sector primario.

La estructura y dinámica de las poblaciones del Agave, al igual que algunos atributos del ecosistema como cobertura vegetal, cambio en el uso del suelo, condición de erosión del suelo y condición del manto freático están altamente influenciadas por las tasas de aprovechamiento de la especie. Esto se reflejó en disminución del índice de

sustentabilidad forestal a partir de 1997, año en el que se incrementó considerablemente la superficie aprovechada de Agave.

El índice de sustentabilidad fue menor a 0.60 para todo el periodo estudiado, este valor lo ubica en un grado de sustentabilidad MEDIO BAJO, lo cual indica que se requieren grandes esfuerzos por mejorar la calidad de vida de los habitantes de la región, elevar los niveles de desarrollo económico, así como la promoción de un mejor control sobre el aprovechamiento de los recursos.

Los índices de sustentabilidad referidos al sistema social y económico no mejoran en el tiempo al hacer uso de los recursos naturales, lo cual indica que la riqueza generada por el aprovechamiento de los recursos no esta siendo retribuida al sistema primario, por lo que sería recomendable realizar una valoración económica del recurso a fin de incrementar el valor de la materia prima que representan los Agaves en la región.

Es posible aplicar la metodología para evaluar el desempeño de la sustentabilidad en ecosistemas forestales referidos a cualquier ambiente (árido, templado ó tropical) y puede ser aplicada tanto a nivel municipal como a nivel de unidades de producción o predios bajo manejo, como es el caso de las autorizaciones y ejecuciones de Programas de Manejo Forestal para el aprovechamiento de recursos forestales maderables y Estudios Técnicos Justificativos para el aprovechamiento de recursos forestales no maderables, los cuales son autorizados y verificados por la SEMARNAT.

## Capítulo 6. LITERATURA CITADA

- Aguirre, R. J., H. Salazar C. y Flores F. J. 2001. El Maguey Mezcalero Potosino. Consejo Potosino de Ciencia y Tecnología, Gobierno del Estado de San Luis Potosí. Instituto de Investigaciones de Zonas Desérticas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 87. pp.
- Barrera, J. y R. Schwarze. 2004. Does the CDM contribute to sustainable development? Evidence from the AIJ Pilot Phase. *International Journal of Sustainable Development*. 7(4):353 - 368.
- Bartelmus, P. 2000. Sustainable development: paradigm or paranoia?. *International Journal of Sustainable Development*. 3(4):358-369.
- Bolay, J. 2004. World globalisation, sustainable development and scientific cooperation. *International Journal of Sustainable Development*. 7(2):99 - 120.
- Boyle, T. J. B., M. Lawes, N. Manokaran, R. Prabhu, J. Ghazoul, S. Sastrapradja, H. C. Thang, V. Dale, H. Eeley, B. Finegan, J. Soberon y N. E. Stork.. 2001. *Criteria y indicadores for assessing the sustainability of forest management: A practical Approach to Assessment of Biodiversity*, CIFOR, Bogor.
- Bridge, S., P. Wright, y R. Ríos. 2002. *Criterios e indicadores del manejo sustentable de los bosques: relaciones entre las iniciativas de escalas múltiples*. Documento distribuido en la XXI Sesión de la Comisión Forestal de América del Norte del 22 al 25 de octubre de 2002.

- CCFM. 2000. Criteria and indicators of sustainable forest Management in Canada: National Status 2000. Canadian Council of Forest Ministres. Natural Resources Canada. Ottawa. 122 p.
- CETENAL. 1972. Carta Edafológica. Comisión de Estudios del Territorio Nacional. Presidencia de la República. CETENAL, México.
- Colunga-García. M. & F. May-Pat. 1993. Agave studies in Yucatan, Mexico, I. Past and present germoplasm diversity and uses. *Economic Botany* 47: 312-327.
- DETENAL. 1969. Carta de uso del suelo. Esc. 1:50 000. Departamento de Estudios del Territorio Nacional. DETENAL. México.
- Domínguez, X. A. 1980. Quimiotaxonomía del género *Yucca*. In: *Yuca* Centro de Investigación de Química Aplicada. Comisión Nacional de Zonas Áridas. Saltillo, Coah. Méx. pp 185-198.
- Floyd, D. W., S. L. Vonhof, H. E. Seyfang, J. Heissenbuttel, R. Cantrell, L. Stocker, B. Wilkinson, y K. Connaughton. 2001. "Forest sustainability: A discussion guide for profesional resource managers". *Journal of Forestry* 99 (2) 8-31.
- Franco, L. J. 1989. Manual de Ecología. Editorial Trillas. México D. F. 266 p.
- Franco, M. I. 1995. Conservación *In-situ* y *Exsitu* de las agaváceas y nolináceas mexicanas. *Bol. Soc. Bot. México* 57: 27-36.
- Friends A. y D. Raport. 1979. Towards a Comprehensive Framework for Environment Statistics: A Stress-Response Approach, Statistics Canada, Ottawa, Canada.

- Froger, G. P. Meral and V. Herimandimby. 2004. The expansion of participatory governance in the environmental policies of developing countries: the example of Madagascar. *International Journal of Sustainable Development*. 7 (2): 164-184.
- Frayre, Z. I. 1996. Proyecto de Desarrollo Rural de las comunidades marginadas de las áreas ixtleras en el Estado de Zacatecas (Proyecto F.I.D.A. zona ixtlera). Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Metropolitana, División de Ciencias Sociales y Humanidades, 151 p.
- García, E. 1981. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen. (para adaptarlo a las condiciones de la republica mexicana). 3ra. Edición, México, D.F.
- García–Mendoza, A. 1995. Riqueza y endemismo de la familia *Agavaceae* en México, pp 51 – 75, en E. Linares, P. F. Dávila, R. B. Chiang y T. Elías, eds. Conservación de plantas en peligro de extinción: diferentes enfoques. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Gentry, H. S. 1980. The nature of Yucca and problems whit their explotation. En *Yucca*. Serie El Desierto. Centro de Investigación Química Aplicada. Comisión Nacional de Zonas Áridas. Saltillo, Coahuila.
- Gentry, H. S. 1982. Agaves of continental North America. Arizona University Press, Tucson, Arizona.
- Granados, S. D. 1993. Los Agaves en México. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Méx. 252 p.

- Hens, L. y J. De Wit. 2003. The development of indicators and core indicators for sustainable development: a state of the art review. *International Journal of Sustainable Development*. 6(4):436 – 459.
- Herrera U. A., Lluch C. S. , Hernán Ramírez A. S. , Hernández V. S., y Ortega R. A. 2003. Desempeño sustentable de la industria turística en el estado de Baja California Sur, México. Resúmenes de los artículos de la revista *Interciencia*. (28)5: 268.
- Holden, E. 2004. Towards sustainable consumption: do green households have smaller ecological footprints?. *International Journal of Sustainable Development*. 7(1):44 - 58.
- INE. 2000. Cartografía Espacial del Inventario Nacional Forestal. Información digital. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAT, Méx. D. F.
- INEGI-INE. 1998. Indicadores de desarrollo sustentable en México. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, Aguascalientes, Méx. 336 p.
- Kyelars, P. P. A. A. H. Y J. C. J. M. Van den Bergh. 2001. A survey of material flows in economic models. *International Journal of Sustainable Development*. 4(3):282 - 303.
- Lorek, S. y J. H. Spangenberg. 2001. Indicators for environmentally sustainable household consumption. *International Journal of Sustainable Development*. 4(1):101-120.
- Manta, C. M. 2003. The process of planning for sustainable development: dimensions, comparisons, y insights. *International Journal of Sustainable Development*. 6(4):460 – 477.



- Martin, A. y M. Lemon. 2001. Gender and forestry: integrating local knowledge into environmental planning and management. *International Journal of Sustainable Development*. 4(3):265 - 281.
- Martínez, M. R. 1985. Demografía de una población silvestre de maguey mezcalero (*Agave salmiana* ssp. *Crassispina* (Trel.) Gentry) bajo condiciones de utilización intensiva. Tesis profesional. Facultad de Ciencias Agrícolas. Universidad Veracruzana. Cordoba, Veracruz. 61 p.
- Martínez, M. R. 1988. Dinámica poblacional de las magueyeras silvestres en el altiplano Potosino-Zacatecano. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Chapingo. México.
- Martínez, S. M. 2000. Estudio sinecológico y económico del orégano (*Lippia berlyieri* Schauer) en el municipio de Mapimí, Durango. Tesis de maestría. Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales. Chapingo, Méx. 167 p.
- Martínez–Morales, R. & E. Meyer, S. 1985. A demographic study of maguey verde (*Agave salmiana* spp. *Crassispina*) under conditions of intense utilization. *Desert plants* (7): 61-64, 101 – 103.
- Martínez–Palacios, A., E. Eguiarte, L. & R. Furnier, G. 1999. Genetic Diversity of the endangered endemic *Agave victoriae – reginae* (Agavaceae) in the Chihuahuan Desert. *American Journal of Botany* 86 (8): 1093 – 1098.
- Masera, O., M. Astier, y S. López-Ridaura. 1999. Sustentabilidad y manejo de recursos naturales, el marco de evaluación MESMIS. MUNDI-PRENSA. GIRA e Instituto de Ecología UNAM. México D.F.109.

- Mollard, A. y A. Torre. 2004. Proximity, territory and sustainable management at the local level: an introduction. *International Journal of Sustainable Development*. 7(3):221 - 236.
- Morse, S., N. McNamara, y M. Acholo. 2004. Soils, souls and agricultural sustainability: the need for connection. *International Journal of Sustainable Development*. 7(4):410 - 432.
- Narváez, F. R., P. Wright, M. Martínez S., S. Alvidrez V., L. Iglesias G., L. A. Domínguez P., S. V. Gómez H., S. G. Rodríguez G., G. Montes O., J. A. Molina S., C. I. Martínez B., y A. Bojórquez Ch. 2003. Criterios e Indicadores: Una Herramienta Para Evaluar la Sustentabilidad del Manejo Forestal en Bosques Templados y Tropicales. Tema didáctico Núm. 2. SAGARPA-INIFAP-CIRNOC-Campo Experimental Madera, 53p. Chihuahua, México.
- Nobel, P. S. 1998. Los incomparables Agaves and cactos. Trillas. México- 213 p.
- OCDE. 1991. Environmental Indicators for Agricultura Methods and Results. Vol. 3. OCDE. Paris, Francia.
- OCDE. 1993. Core of Indicators for Environmental Performance Reviews. OCDE. Paris, Francia.
- Parto, S. 2004. Sustainability and the local scale: squaring the peg?. *International Journal of Sustainable Development*. 7(1):76 - 97.
- Partridge, E. 2003. In search of sustainable values. *International Journal of Sustainable Development*. 6(1):25 – 41.
- Pearce, D.W. y Atkinson, G. 1993. Capital theory and the Measurement of Weak Sustainability. En: *Ecological Economics*, num. 8, pp. 103-108.

- Pearce, D.W., D. Atkinson G. y R. Dubourg W. 1994. The Economics of Sustainable Development. En: Annual Review of Energy and Environment. 19:457-474.
- Pedroza, S. A. 1998. Desarrollo Rural Sustentable, experiencias enfoques y perspectivas. URUZA, Universidad Autónoma Chapingo. Bermejillo, Dgo. Méx. 183.
- Pfahl, S. 2005. Institutional sustainability. International Journal of Sustainable Development. 8(1/2):80 - 96.
- Piña, L. I. 1980. Algunas especies del género *Yuca* en: Yucatán Serie El Desierto. Centro de Investigación de Química Aplicada. Comisión Nacional de las Zonas Áridas. Saltillos, Coah., Méx.
- Prabhu, R., C.J.P. Colfer, P. Venkaterswarlu, L.C. Tan, R Soekmadi, E. Wollenberg. 1996. Testing criteria and indicators for sustainable management of the forest: Phase I Final Report. Jakarta, Indonesia: Center of international Forestry Research.
- Reyes, A. J. 1987. Evaluación de plantaciones de maguey mezcalero (*Agave salmiana* Otto ex Salm., *Spp. crassispina* (Trel) Gentry) en el municipio de Pinos, Zacatecas, México. Tesis Profesional. Escuela de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Mich. 87 p.
- Rodríguez, F. C. 1997. Criterios e indicadores de la actividad forestal sustentable. Memoria del Seminario sobre Sistemas de Manejo Sustentable de los Recursos Forestales. AMPF. SEMARNAP. INIFAP. CNIM. 15-25p. México.
- Rzedowski, R. J. 1978. Vegetación de México. LIMUSA. México D.F. 432 p.
- Rzedowsky, R. J. 1993. Diversidad y orígenes de la flora fanerogámica de México. Pages 129-148 in T. P. Ramamoorthy, R. Bye, A. Lot, y J. Fa, editors. Diversidad

- Biológica de México. Orígenes y Distribución. México: Instituto de Biología, UNAM.
- Sigrid, S. y S. U. O'Hara. 2001. Preferences, needs and sustainability. *International Journal of Sustainable Development*. 4(1):4-21.
- Slauson, L. A. 2000. Polination biology of two Chiropterophilous Agaves in Arizona. *A Journal of Botany* 87(6): 825-836.
- Spangerberg, J. H. 2005. Economic sustainability of the economy: concepts and indicators. *International Journal of Sustainable Development*. 8(1/2):47 - 64.
- Tello, B. J. J. 1988. Análisis gráfico – tabular de dos poblaciones silvestres de maquey mezcalero (*Agave salmiana* Otto ex Salm, ssp. *Crassispina* (trel) Gentry) en el altiplano Potosino – Zacatecano. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- UNAM. 1970. Carta de Climas “San Luis Potosí 14 Q-I” escala 1:500,000. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. Secretaría de la Presidencia. Gobierno de la República.
- USDA. 2000. Sourcebook on criteria and indicators of forest sustainability in the northeastern area. USDA Forest Service northeastern area State and private forestry and northeastern forest resource planners association.
- Van Dieren. 1995. Taking nature into Account. Toward a Sustainable National Income. New York, Springer-Verlag.
- Winograd, M. 1995. Marco conceptual para el desarrollo y uso de indicadores ambientales y de sustentabilidad para toma de decisiones en Latinoamérica y el

- Caribe. Documento para discusión Taller regional sobre uso y desarrollo de indicadores ambientales y de sustentabilidad. PNUMA-CIAT. México. 14-16 de Febrero 1996.
- Wright, P. A., G. Alward, T. W. Hoekstra, B. Tegler and M. Turner. 2002. Monitoring for forest management unit scale sustainability: The local unit criteria and indicators development (LUCID) Test (management edition). Fort Collins, CO: USDA Forest Service Inventory y Monitoring Report No. 4.
- Zhang, K., X. He y Z. Wen. 2003. Study of indicators of urban environmentally sustainable development in China. *International Journal of Sustainable Development*. 6(2):170-182.

## ANEXO A. DESCRIPCIÓN CARTOGRÁFICA DE LA REGIÓN DE ESTUDIO.

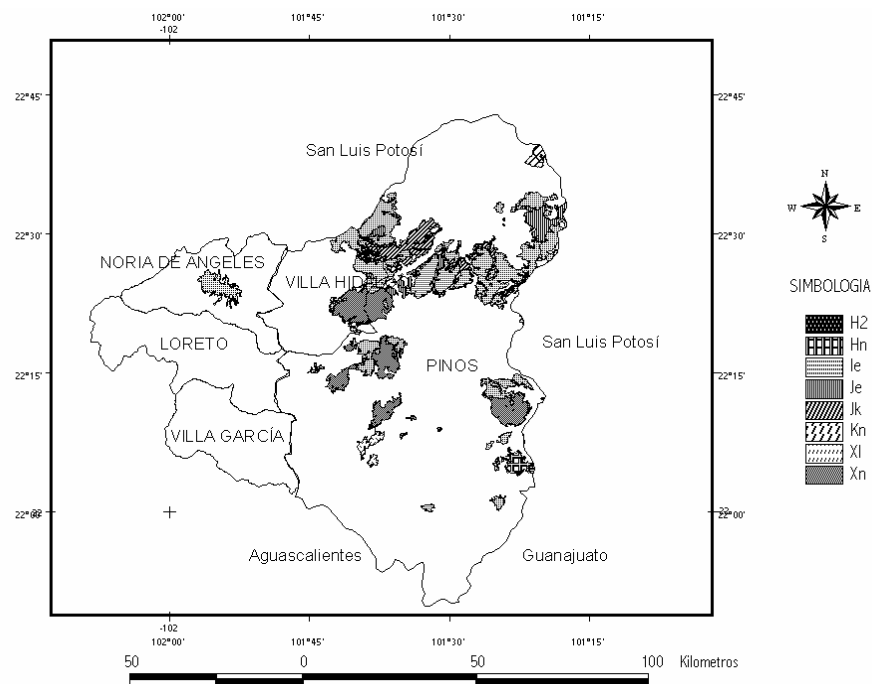


Fig. A1. Tipos de suelo de la región de distribución del maguey verde en el sureste de Zacatecas, México

El Agave se distribuye preferentemente en suelos de tipo Litosol eútrico (61.18%), Xerosol Háptico (20.34%), Fluvisol eútrico (7.30%) y Fluvisol calcárico (7.26%), y el resto en otros tipos de suelo como se muestra en la Tabla A1, los tipos Litosol y Xerosol son típicos de las regiones áridas, poco profundos, con bajo contenido de materia orgánica. En el caso del área de distribución del Agave presentan fase calcárica y sódica (con contenido de carbonatos de calcio), estos suelos, se encuentran en lomeríos y pie de monte, así como en valles donde las pendientes son superiores al 6 % y para el caso del sureste de Zacatecas, la distribución de suelos se ilustra en la figura A1.

Tabla A1. Tipo de suelos en la superficie de distribución del maguey, según condición de asociación en el sureste de Zacatecas, México.

<i>Suelo</i>	<i>Superficie (ha)</i>	<i>%</i>
Phaeozem (H)	147	0.25
Fluvisol eútrico (Je)	4372	7.30
Fluvisol calcárico (Jk)	4348	7.26
Castañozem háplico (Kn)	1050	1.75
Litosol eútrico (Ie)	36652	61.18
Xerosol lúvico (XI)	1146	1.91
Xerosol háplico (Xn)	12185	20.34
sup. Total (ha)	59905	100.00

Tabla A1. De acuerdo con la clasificación de suelos realizada por la FAO y modificada (DETENAL, 19679) para el caso específico de México, los tipos de suelo en la región de distribución de Agave en la zona de estudio son: Litosol eútrico, es un suelo con espesor promedio de 10 cm, descansa sobre la roca madre o rocas con contenido de carbonatos de calcio, no es apto para cultivos tradicionales y tiene presencia de grava; Xerosol háplico, es un suelo con contenido moderado de materia orgánica y muy permeables, relativamente delgado y en el caso de la distribución del Agave presenta fase sódica; Pheozem, es un suelo con capa rica en materia orgánica y nutrientes, tolera excedentes de agua, presenta buen drenaje, fertilidad moderada, en la región de distribución del Agave presenta textura media; Fluvisoles, estos son suelos aluviales, de fácil manejo, necesitan fertilización en el caso de establecer regiones agrícolas, son muy permeables, arenosos y con textura de media a gruesa; Fluvisol eútrico, es un suelo con nutrientes moderados o altos, muy permeables, textura media y generalmente franco; Fluvisol calcárico, este es un suelo fértil, calcárico en la superficie, de fácil manejo, permeable y ligero; Castañozem háplico, es un suelo de color pardo oscuro, con fertilidad moderada, de acumulación calcárea, permeable y bueno para la agricultura. La superficie que ocupan cada uno de estos tipos de suelo en el área de distribución del Agave .

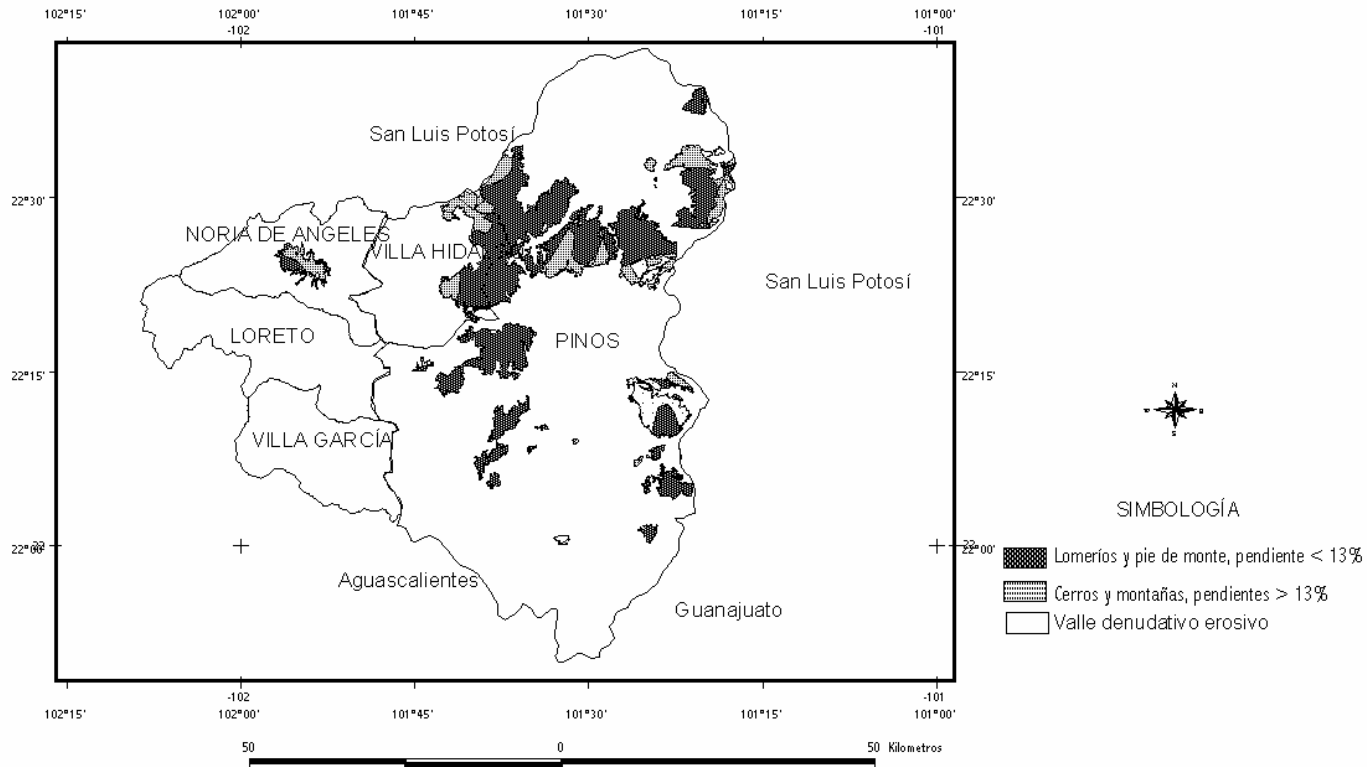


Fig. A2. Topoformas de la región de distribución del maguey verde en el sureste de Zacatecas, México

El 72.55% de la superficie de distribución de los Agaves se encuentra en pie de monte y lomeríos suaves con pendientes menores al 13% y con alturas entre 1,950 y 2,300 msnm, mientras que en el tipo de topoformas clasificado como cerros y montañas con pendientes mayores al 13% y con alturas mayores a 2,200 metros sobre el nivel del mar la superficie con presencia de Agave ocupa el 20.43%. Otro tipo de topoforma en la que encontramos poblaciones de Agave en la región aunque solo en pequeñas superficies, es en los valles denudativos erosivos de la parte sureste y noreste del municipio de Pinos y representan solo el 7.02% de la superficie de distribución como se ilustra en la Figura A2.



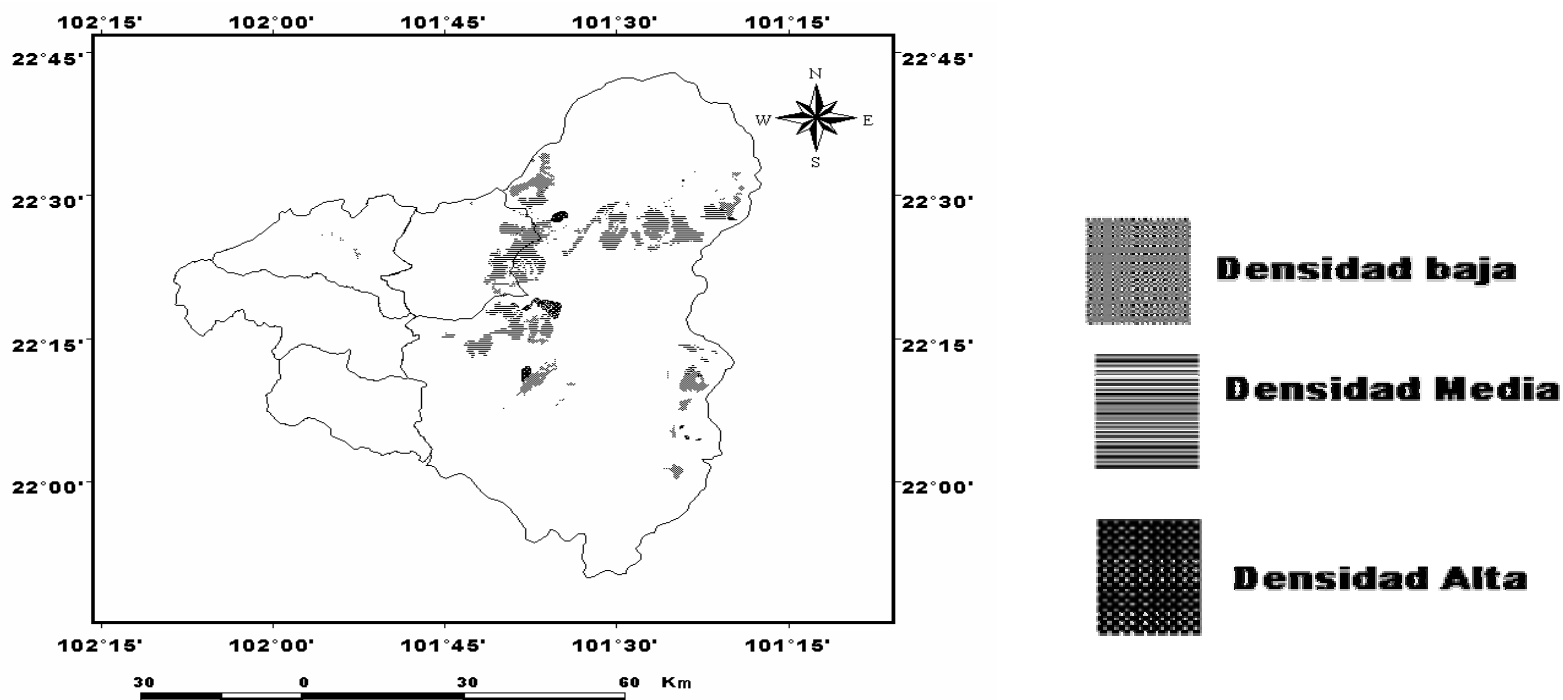


Fig. A3. Superficies potenciales para realizar plantaciones de Agave

La superficie estimada con potencial para realizar plantaciones de Agave es de 28, 180 ha, la cual se distribuye en tres municipios de la región de estudio (Figura A3), la mayor superficie (19, 925) corresponde al estrato donde las poblaciones actuales presentan baja y moderada densidad; ya que, en las áreas con alta densidad aunque presenta zonas con potencial para plantaciones lo más adecuado será dar manejo a las poblaciones actuales, extraer Agaves en etapa juvenil y trasladarlos para su establecimiento en estratos con menor densidad de población.

## ANEXO B. CAMBIO EN EL USO DEL SUELO

Tabla B1. Porcentaje de cambio en el uso del suelo en el sureste de Zacatecas, Méx.

MUNICIPIO	1990 (%)			1996 (%)			2000 (%)		
	Agrícola	Forestal	Pastizal	Agrícola	Forestal	Pastizal	Agrícola	Forestal	Pastizal
NORIA DE ANGELES	55	36	9	57	35	7	56	39	5
PINOS	43	30	27	51	24	26	39	33	28
VILLA GARCIA	33	9	57	36	12	52	35	15	50
LORETO	51	37	11	53	37	10	53	38	9
VILLA HIDALGO	57	32	10	61	29	11	59	33	8

Según muestran la Figura 6 y la Tabla 7 se puede observar que en el periodo 1990-1996 el porcentaje de superficie forestal y de pastizales disminuyó gradualmente, mientras que la superficie agrícola incrementó para todos los municipios de la región; sin embargo, se ha estimado nuevamente un incremento de la superficie de agostadero y forestal en el periodo 1996 – 2000, lo cual sucedió probablemente por la sequía prolongada que se presentó en el periodo 1993 – 2000, lo que generó el abandono de tierras agrícolas. Posteriormente en la superficie abandonada se dio un proceso de repoblación en un esquema de sucesión natural, por lo que se han establecido pastizales, algunas especies arbustivas, y en algunas superficies el desarrollo de huisaches y mezquites.

## ANEXO C. CARACTERIZACIÓN DE LAS COMUNIDADES VEGETALES EN LA REGIÓN DE DISTRIBUCIÓN DEL AGAVE

### Comunidad con densidad alta de Agaves.

En esta comunidad vegetal *Agave salmiana* aunque es la especie dominante (42%) se encuentra asociada principalmente con poblaciones de gobernadora (*Larrea divaricata*) y sangre de drago (*Jatropha dioica*) estas dos especies representan el 18% del total de individuos en el estrato, mientras que cinco especies de la familia cactaceae (*Opuntia cochineria*, *Opuntia robusta*, *Opuntia rastrera*, *Opuntia leucotricha* y *Ferocactus histrix*) que forman parte de una comunidad denominada “nopaleras” representan el 18% de individuos en la comunidad vegetal, y el resto de las especies representan solo el 12% de los individuos totales.

Existe variación en las características fenotípicas de los Agaves (Tabla C1) para cada etapa de desarrollo. Se estima para todos los casos un coeficiente de variación menor al 24.79% siendo en los Agaves juveniles en los que se presenta una mayor variación, mientras que en los Agaves maduros la variación fue menor. Por otra parte, con excepción de los Agaves juveniles en el resto de las etapas fenológicas la variación en el diámetro basal fue mayor que la variación en altura y diámetro de cobertura.

En relación con la variación de la abundancia de las especies de esta comunidad, en la mayoría de ellas el c.v. fue menor a 30%; no obstante, en algunos casos como *O. cochineria* y *Ferocactus histrix* el c.v. es superior al 50%, esto indica que la distribución en el espacio de estas dos especies es mas heterogénea que en el resto de las otras, este dato resulta interesante ya que, *F. histrix* es una especie incluida en la NOM-059 en la que se le otorga el estatus de especie en peligro de extinción; por lo que será necesario elaborar programas de manejo que garanticen la recuperación de dicha especie.

### Comunidad con densidad media de Agaves.

En la información contenida en la Tabla C2 se presentan asociaciones vegetales en las que la comunidad dominante es caracterizada como matorral xerófito subinerme (poblaciones arbustivas con hojas pequeñas caedizas o perenes en las que menos del 25 % de las especies que forman esta comunidad tienen presencia de espinas), en este caso *Buddlea scorpioides*, *Jatropha dioica*, *Mimosa biuncifera* y *Larrea divaricata* representan el 53.56% de los individuos de la comunidad. Por su parte las poblaciones de Agave representan solo el 11% de la comunidad vegetal. Una comunidad mas en asociación con el Agave son las nopaleras, integrada por especies de la familia cactaceae, las cuales representan el 25.63% de la comunidad vegetal, y el resto de las especies representan solo el 9.04% de los individuos totales.

La abundancia de los Agaves disminuye a medida que las plantas crecen, de tal manera que al igual que en el estrato anterior el numero de Agaves juveniles es mayor que el numero de Agaves maduros (Agaves juveniles  $267.69 \pm 68.50$ , Agaves prerreproductivos  $212.31 \pm 43.50$ , Agaves reproductivos  $273.85 \pm 64.73$ , Agaves maduros  $138.46 \pm 46.63$ ) y la abundancia presenta una variabilidad entre el 20.48% y el 33.67%. La baja abundancia con alta variabilidad, indica que en este estrato las poblaciones de Agave tienen una

distribución espacial más heterogénea, esto ocasiona que se encuentren vulnerables a intensidades altas de aprovechamiento, por lo que será necesario establecer esquemas de manejo que garanticen la preservación del recurso. Por otra parte en la Tabla 4 muestra que en esta región el porte de los individuos es menor que en la región de dominancia de la especie y que las características de los Agaves presentan alta variabilidad a pesar de ser plantas que se propagan principalmente a partir de rizomas.

### **Comunidad con densidad baja de Agaves.**

La Tabla C3 muestra la abundancia de las poblaciones en el estrato donde se considera una abundancia baja de Agave. En este caso el número de individuos de Agave por hectárea es de 725, representando el 9.73% del total de individuos de la comunidad, en este estrato la especie con mayor abundancia es *Larrea divaricata*, la cual domina el matorral inerme en el que siete especies ocupan el 56.78% de los individuos de la comunidad (*Opuntia leucotricha*, *Jatropha dioica*, *Mimosa biuncifera*, *Buddleia scorpioides*, *Flourenzia cernua*, *Acacia vernicosa*). En el caso de las especies de la familia cactáceae (*Opuntia rastrera*, *O. imbricata*, *O. robusta*, *Ferocactus histrix*, *O. cantabrigansis*, *O. streptacantha*, *O. microdasys*, *Mammillaria* spp.) representan el 23.85% del total de la comunidad, mientras que el 9.74% restante corresponde a individuos de otras ocho especies.

Al diferenciar la abundancia en los Agaves de acuerdo con su etapa fenológica, observamos que al igual que en los otros casos, el número de individuos / ha disminuye gradualmente a medida que estos crecen y maduran. Por otra parte la abundancia del maguey presenta un c.v. de entre 30 y 40%, por lo que consideramos que los Agaves se encuentran distribuidos de manera heterogénea. Se observa además que dentro de cada una de las etapas fenológicas estudiadas, las dimensiones de las plantas muestran variación superior al 20%.

### **Comunidad con densidad muy baja de Agaves.**

La Tabla C4 muestra un resumen de las características de la comunidad vegetal arbustiva del estrato que es considerado como el que presenta abundancia mínima de Agave, dicha comunidad tiene una riqueza de 28 especies arbustivas; nosotros observamos que en este estrato la comunidad es dominada por asociaciones entre nopaleras y matorral micrófilo subinerme, ya que nueve especies (*Jatropha dioica*, *Opuntia leucotricha*, *Opuntia robusta*, *Larrea divaricata*, *Mimosa biuncifera*, *Flourenzia cernua*, *Opuntia imbricata*, *Acacia vernicosa*, *Acacia shaffineri*) representan el 62.81% de los individuos de la comunidad, *Agave salmiana* presenta una abundancia de 652.5 individuos y sus poblaciones representan el 11.30% de la comunidad vegetal, mientras que las 18 especies restantes representan solo el 25.89%, lo cual significa que la equitatividad entre las poblaciones más heterogénea, lo cual tiene relación directa con la disminución de la diversidad.

Al igual que en los casos anteriores, *Agave salmiana* en este estrato presenta disminución en cuanto al número de individuos por hectárea en etapas más avanzadas de maduración

de la planta, de manera que la abundancia de Agaves juveniles es de (198.75±67), los prerreproductivos (161.25±62.94), reproductivos (162.50±56.78) y maduros (130±44.87).

**Tabla CI. Atributos de las poblaciones vegetales en un estrato con densidad alta de Agaves en el sureste de Zacatecas, Méx.**

Condición	Especie	Numero de individuos		Altura		Diametro de copa		Diametro basal	
		Media cm	Dev. Std.	Media cm	Dev. Std.	Media cm	Dev. Std.	Media cm	Dev. Std.
Región con dominancia de Agave salmiana	<i>Agave salmiana (D)</i>	993.3	66.11	22.96	4.58	24.88	6.17	15.83	3.14
	<i>Agave salmiana (C)</i>	828.3	66.85	51.67	4.45	54.92	8.18	31.79	6.47
	<i>Jatropha dioica</i>	813.3	314.77	38.58	13.01	59.92	19.08	31.75	14.69
	<i>Agave salmiana (B)</i>	696.7	48.96	73.75	3.93	77.50	6.20	46.17	9.26
	<i>Agave salmiana (A)</i>	606.7	34.22	108.29	7.33	118.29	14.40	60.63	12.61
	<i>Larrea divaricata</i>	260.0	67.82	109.67	45.71	142.00	44.56	18.17	11.02
	<i>Opuntia cochinera</i>	220.0	127.28	58.50	14.85	172.50	60.10	139.00	57.98
	<i>Opuntia robusta</i>	200.0	77.61	66.72	28.46	149.78	82.58	122.94	83.32
	<i>Ferocactus histrix</i>	173.3	98.66	32.33	8.02	38.33	11.68	32.33	6.35
	<i>Opuntia rastrera</i>	157.1	57.89	46.14	17.08	110.64	52.49	78.79	55.61
	<i>Opuntia microdasys</i>	120.0	16.33	34.00	12.11	69.00	39.55	49.00	32.92
	<i>Mimosa biuncifera</i>	116.7	33.53	108.00	46.64	159.67	58.77	18.67	10.92
	<i>Opuntia leucotricha</i>	100.0	23.90	99.63	64.82	86.75	60.84	21.00	13.76
	<i>Opuntia imbricata</i>	98.2	25.87	119.82	43.33	96.73	53.62	17.09	19.10
	<i>Berberis trifoliata</i>	85.3	26.04	102.87	37.73	116.27	40.28	34.00	42.20
	<i>Opuntia cantabrigensis</i>	75.6	35.28	69.89	26.64	98.67	69.73	50.33	65.81
	<i>Acacia farneciana</i>	74.3	17.99	270.43	61.30	355.71	128.82	23.86	14.12
	<i>Prosopis velutina</i>	64.0	10.95	151.20	41.29	192.00	77.95	9.20	3.77
	<i>Ferocactus latispinus</i>	60.0	14.14	29.00	31.11	25.50	12.02	20.50	4.95
	<i>Acacia vernicosa</i>	48.0	8.94	134.80	53.53	174.60	40.99	21.00	4.74
<i>Dasyllirion wheeleri</i>	42.0	6.53	114.00	48.08	102.50	17.68	62.00	32.53	
<i>Opuntia tunicata</i>	40.0	3.56	24.50	6.36	46.50	2.12	34.00	15.56	
<i>Opuntia streptocantha</i>	38.0	3.28	170.00	155.56	157.50	201.53	28.00	31.11	
<i>Echinocereus stramineus</i>	36.0	4.52	25.50	6.36	177.50	159.10	175.00	162.63	

Agaves maduros (A), Agaves reproductivos (B), Agaves prerreproductivos (C), Agaves juveniles (D).

**Tabla C2. Atributos de las poblaciones vegetales en un estrato con densidad media de Agaves en el sureste de Zacatecas, Méx.**

Condición	Especie	Número de individuos		Altura		Diámetro de copa		Diámetro basal	
		Media cm	Dev. Std.	Media cm	Dev. Std.	Media cm	Dev. Std.	Media cm	Dev. Std.
Agave en asociación con otras especies (Región con abundancia media)	<i>Buddleia scorpioides</i>	1216.00	436.72	29.00	9.46	38.00	6.20	16.20	5.93
	<i>Jatropha dioica</i>	1062.86	374.72	32.00	9.90	46.07	17.09	19.71	12.96
	<i>Mimosa biuncifera</i>	954.29	398.91	45.57	23.93	59.50	24.43	10.64	3.71
	<i>Larrea divaricata</i>	826.67	380.04	68.17	14.27	90.50	17.95	13.67	3.56
	<i>Microrhamnus ericoides</i>	480.00	226.27	47.50	4.95	59.00	21.21	19.50	3.54
	<i>Echinocereus stramineus</i>	426.67	122.20	24.67	2.89	38.00	9.54	34.67	8.50
	<b><i>Opuntia rastrera</i></b>	360.00	76.59	33.00	11.80	97.00	51.04	28.25	23.64
	<i>Agave salmiana (B)</i>	273.85	64.73	70.38	3.64	79.54	4.61	42.15	3.89
	<i>Agave salmiana (D)</i>	267.69	68.50	17.08	3.90	20.15	3.41	14.08	5.85
	<b><i>Opuntia leucotricha</i></b>	266.67	41.31	98.50	37.73	147.17	69.15	42.83	42.57
	<i>Opuntia robusta</i>	266.67	92.38	69.00	12.12	113.00	15.87	38.00	13.86
	<i>Opuntia streptacantha</i>	213.33	46.19	103.67	17.67	126.00	19.31	73.33	46.19
	<i>Agave salmiana (C)</i>	212.31	43.50	46.46	6.24	52.85	7.29	32.31	7.10
	<b><i>Opuntia imbricata</i></b>	164.00	18.59	111.00	48.57	100.57	66.81	11.43	4.39
	<i>Opuntia microdasys</i>	158.00	22.50	20.33	2.31	54.00	38.43	40.67	42.91
	<i>Agave salmiana (A)</i>	138.46	46.63	83.46	37.11	89.54	40.64	44.54	21.25
	<i>Lowania sp</i>	114.20	0.65	55.80	2.59	64.00	1.58	30.20	2.59
	<i>Opuntia cantabrigensis</i>	87.40	1.35	34.00	2.35	17.40	3.51	11.20	1.30
	<i>Berberis trifoliata</i>	52.80	2.48	63.80	1.79	82.80	4.97	15.00	0.71
	<i>Acacia farneciana</i>	37.60	1.04	141.60	2.07	128.60	5.59	19.20	2.77

Agaves maduros (A), Agaves reproductivos (B), Agaves prerreproductivos (C), Agaves juveniles (D).

**Tabla C3. Atributos de las poblaciones vegetales en un estrato con densidad baja de Agaves en el sureste de Zacatecas, Méx.**

Condición	Especie	Numero de individuos		Altura		Diámetro de copa		Diámetro basal	
		Media cm	Dev. Std.	Media cm	Dev. Std.	Media cm	Dev. Std.	Media cm	Dev. Std.
Agave en asociación con otras especies (Región con abundancia baja)	<i>Larrea divaricata</i>	1164.44	407.74	75.56	22.31	97.50	34.48	9.78	3.99
	<i>Opuntia leucotricha</i>	660.00	321.16	62.13	14.23	62.75	31.52	20.13	13.50
	<i>Jatropha dioica</i>	617.93	261.62	34.93	11.72	64.86	32.47	39.34	35.07
	<i>Mimosa biuncifera</i>	490.32	188.11	42.55	18.12	72.71	25.53	26.61	16.64
	<i>Budleia scorpioides</i>	453.67	10.25	16.67	4.23	24.00	2.37	7.33	1.51
	<i>Fluorencia cernua</i>	444.44	279.36	50.00	12.61	63.89	14.53	12.67	5.34
	<i>Acacia vernicosa</i>	400.00	165.89	84.50	39.24	148.33	64.52	18.00	12.85
	<i>Opuntia rastrera</i>	381.54	120.17	23.38	10.12	56.54	25.16	31.54	24.40
	<i>Opuntia imbricata</i>	360.00	100.66	80.25	54.96	58.25	42.02	6.25	3.20
	<i>Opuntia robusta</i>	272.00	100.13	57.50	23.75	70.80	32.75	33.20	21.14
	<i>Ferocactus histrix</i>	213.33	46.19	37.00	17.06	40.33	9.50	40.33	9.50
	<i>Opuntia cantabrigensis</i>	213.33	65.32	59.83	21.58	70.00	40.65	24.83	18.98
	<i>Agave salmiana (D)</i>	209.03	66.47	16.16	4.73	19.23	5.54	12.23	2.97
	<i>Microrhamnus ericoides</i>	200.00	40.00	59.50	33.69	49.00	33.06	10.00	0.00
	<i>Agave salmiana (C)</i>	187.10	69.74	40.39	14.98	46.97	17.68	27.32	11.30
	<i>Echinocereus stramineus</i>	177.78	26.67	30.44	26.91	44.22	26.57	35.89	16.78
	<i>Agave salmiana (A)</i>	169.03	52.84	97.55	20.65	108.39	25.56	53.29	15.73
	<i>Opuntia streptacantha</i>	161.23	23.50	146.00	147.08	155.50	204.35	20.50	23.33
	<i>Agave salmiana (B)</i>	160.00	62.82	67.84	13.31	75.94	14.71	38.39	8.62
	<i>Berberis trifoliata</i>	152.36	26.50	83.00	17.69	100.00	45.97	23.33	15.28
<i>Acacia farneciana</i>	141.00	16.53	143.50	77.43	169.50	83.36	11.00	3.37	
<i>Mammillaria lasiacantha</i>	124.00	2.17	9.50	1.05	10.17	1.17	8.33	0.52	
<i>Opuntia microdasys</i>	51.83	0.74	34.83	1.17	53.67	3.93	21.67	4.89	
<i>Prosopis velutina</i>	46.83	1.39	161.00	10.62	257.00	14.34	21.67	4.18	

Agaves maduros (A), Agaves reproductivos (B), Agaves prerreproductivos (C), Agaves juveniles (D).

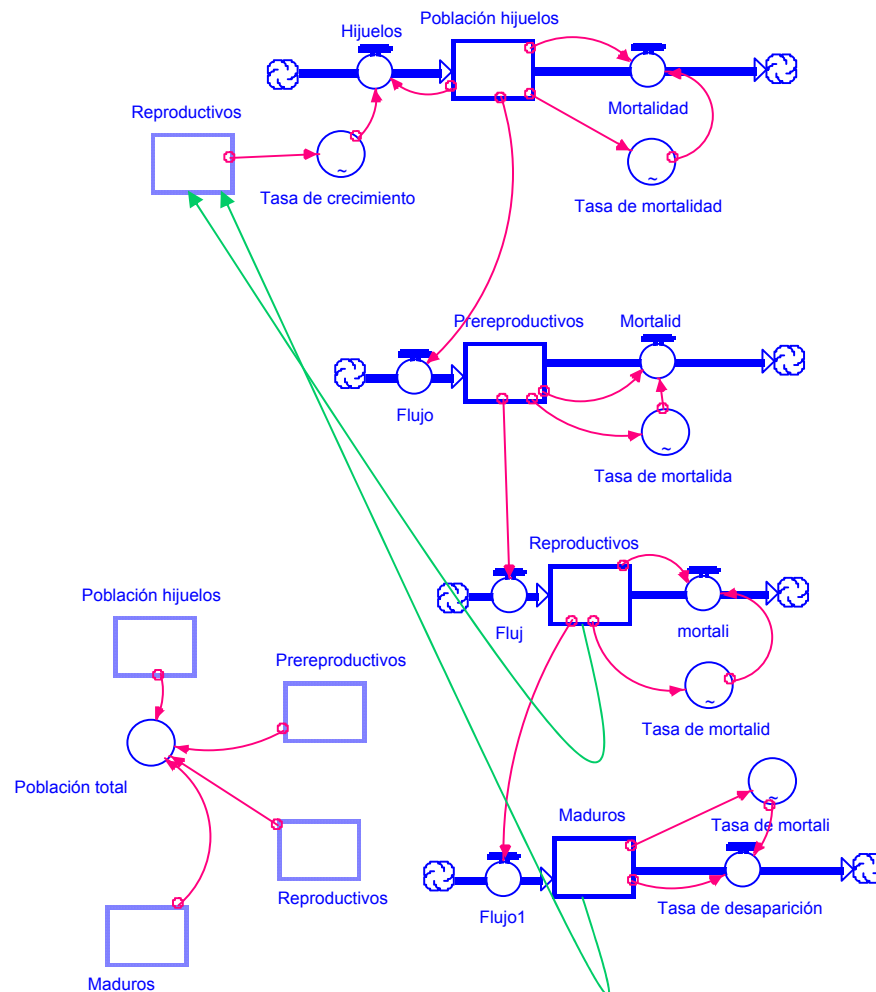
**Tabla C4. Atributos de las poblaciones vegetales en un estrato con densidad muy baja de Agaves en el sureste de Zacatecas, Méx.**

Condición	Especie	Numero de individuos		Altura		Diametro de copa		Diametro basal	
		Media cm	Dev. Std.	Media cm	Dev. Std.	Media cm	Dev. Std.	Media cm	Dev. Std.
Agave en asociación con otras especies (Región con abundancia mínima)	<i>Jatropha dioica</i>	726.67	269.92	33.83	6.86	71.06	25.02	39.44	25.27
	<i>Opuntia leucotricha</i>	613.33	294.94	85.33	37.43	90.83	31.75	10.33	2.07
	<i>Opuntia robusta</i>	485.33	245.86	53.73	18.23	75.27	40.26	38.07	40.72
	<i>Larrea divaricata</i>	424.00	221.78	89.07	28.74	113.87	44.51	11.73	4.37
	<i>Mimosa biuncifera</i>	400.00	154.40	67.09	38.30	88.45	36.88	10.36	5.85
	<i>Fluorencia cernua</i>	295.00	59.46	58.75	29.74	64.88	31.16	10.25	8.78
	<i>Opuntia imbricata</i>	240.00	80.00	65.75	17.17	67.25	22.95	10.25	4.50
	<i>Acacia vernicosa</i>	228.00	100.24	117.70	31.66	142.50	26.41	19.00	29.06
	<i>Acacia shaffneri</i>	213.33	46.19	115.67	53.20	130.33	66.08	20.67	16.86
	<i>Agave salmiana (D)</i>	198.75	67.10	16.69	6.65	18.78	7.37	11.66	4.58
	<i>Dalea bicolor</i>	195.86	0.98	100.43	3.21	115.29	9.16	16.00	1.63
	<i>Agave salmiana (B)</i>	162.50	56.78	66.00	18.16	72.66	21.97	37.84	13.46
	<i>Agave salmiana (C)</i>	161.25	62.94	39.00	19.57	42.09	22.06	24.19	12.86
	<i>Mammillaria lasiacantha</i>	160.00	0.00	10.50	3.54	8.50	2.12	7.00	4.24
	<i>Opuntia leptocaulis</i>	133.33	23.09	81.33	14.05	63.33	21.39	7.00	3.61
	<i>Agave salmiana (A)</i>	130.00	44.87	85.31	41.47	92.31	44.58	45.59	25.10
	<i>Lowania sp</i>	125.00	0.71	78.33	2.50	145.67	16.18	127.17	5.88
	<i>Opuntia rastrera</i>	120.00	36.51	29.00	11.60	68.75	2.50	52.75	12.53
	<i>Opuntia microdasys</i>	113.33	32.04	24.83	5.74	47.17	14.37	30.33	11.04
	<i>Buddleia scorpioides</i>	100.67	0.88	35.17	2.32	55.00	6.48	34.50	4.46
	<i>Berberis trifoliata</i>	100.00	20.00	98.25	37.93	110.75	53.12	25.25	30.06
	<i>Opuntia streptacantha</i>	100.00	42.43	116.00	76.37	82.50	57.28	15.50	6.36
	<i>Opuntia cantabrigensis</i>	89.14	1.21	31.71	1.60	31.71	2.06	11.71	1.89
	<i>Microrhammus ericoides</i>	81.17	0.58	41.00	2.28	53.00	4.69	13.67	19.28
	<i>Echinocereus stramineus</i>	80.00	28.28	18.75	6.70	41.00	19.36	38.00	17.96
	<i>Ferocactus histrix</i>	66.67	23.09	40.33	15.01	39.33	10.26	38.67	11.37
<i>Ferocactus latispinus</i>	18.60	0.91	8.80	0.84	11.60	1.14	12.40	1.14	
<i>Yuca filifera</i>	10.50	0.60	225.50	12.92	256.25	20.49	41.75	2.82	

Agaves maduros (A), Agaves reproductivos (B), Agaves prerreproductivos (C), Agaves juveniles (D).



## ANEXO D. PRONÓSTICO DEL COMPORTAMIENTO DE LAS POBLACIONES DE AGAVE.



**Figura D1. Flujo de vida de los Agaves.**

El Figura D1 muestra el marco conceptual del proceso de simulación realizado para estimar el comportamiento de las poblaciones de Agaves maduros, el cual considera diferentes tasas de aprovechamiento, y la estructura poblacional actual que integra los cuatro estados de crecimiento de los Agaves.

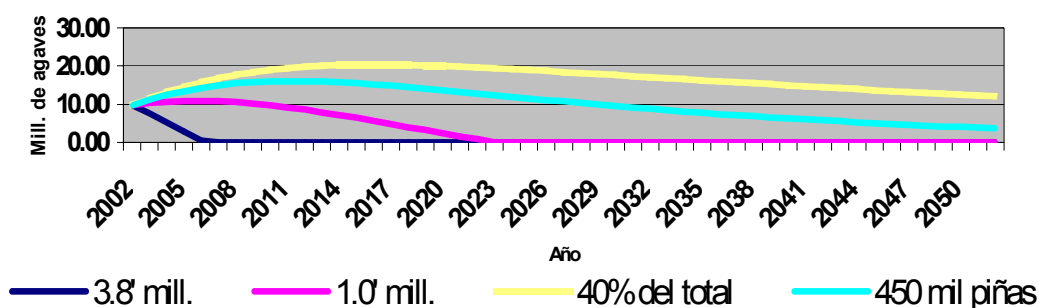
El modelo de simulación ha sido alimentado con los siguientes modelos concatenados en un modelo dinámico a partir de población actual (P.A.) en cada etapa de crecimiento de los magueyes: Población de Hijuelos = P.A. + Flujo reproductivo – tasa de mortalidad; Población de prerreproductivos = P.A. + Flujo de hijuelos – tasa de mortalidad; Población de prerreproductivos = P.A. + Flujo de prerreproductivos – Tasa de mortalidad; Población de maduros = P.A. + Flujo de reproductivos – Tasa de mortalidad – Tasa de aprovechamiento.

Con base en la estructura poblacional del maguey, se ha estimado que solo el 83% de los Agaves juveniles llegan a la etapa de prerreproductivos, el 84% de prerreproductivos

logran alcanzar la etapa de reproductivos, y el 81% de reproductivos alcanzan la etapa de madurez. Visto de otra manera, solo el 57 % de los magueyes que se establecen como juveniles, alcanzan la etapa de madurez.

El proceso de simulación fue realizado considerando las tasas de mortalidad que derivan de la información vertida en el párrafo anterior y las diferentes tasas de aprovechamiento las cuales fueron definidas con base en los siguientes atributos.

1. Reporte de aprovechamiento anual realizado por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (un promedio de 450 mil magueyes)
2. Necesidades de materia prima para abastecer a la industria mezcalera local (1.0 millones de magueyes anual)
3. Aprovechamiento anual del 40% de los Agaves que se encuentran en estado de madurez.
4. Considera individuos aprovechados para alimentar al ganado, individuos aprovechados en el proceso de aprovechamiento de gusano rojo\*\*\*, individuos extraídos para la elaboración de tequila, e individuos aprovechados para abastecer la industria local.



**Grafica D1. Pronóstico de las poblaciones de Agaves maduros según intensidad de aprovechamiento**

La Gráfica D1 muestra el comportamiento en el futuro de las poblaciones de magueyes maduros en la región de estudio, partiendo de la población actual a el año 2002, e integrando el flujo que de juveniles, prerreproductivos, y reproductivos se da hacia la etapa de madurez. Cada una de las líneas muestra el comportamiento poblacional en función de cada una de las tasas de aprovechamiento, se observa claramente que independientemente de lo conservador que resulte el aprovechamiento, cuyo este se realiza de manera comercial, la curva de crecimiento poblacional tiende a decrecer en el tiempo, lo cual indica que el ecosistema no tendrá la capacidad de reponer la energía extraída cuyo se realizan prácticas de uso comercial intensivo de los recursos naturales.

## ANEXO E. INDICES DE SUSTENTABILIDAD Y MATRICES DE CORRELACIÓN DE INDICADORES E INDICE.

Tabla E1. Índices Económicos, Ecológicos y Sociales a escala local.

AÑO	SOCIAL			ECONOMICO			ECOLOGICO-FORESTAL		
	*N. Ángeles	Pinos	*V. Hgo	*N. Ángeles	Pinos	*V. Hgo	*N. Ángeles	Pinos	*V. Hgo
1990	0.65	0.64	0.26	0.62	0.35	0.51	0.67	0.70	0.63
1991	0.62	0.63	0.35	0.43	0.33	0.50	0.67	0.65	0.58
1992	0.60	0.63	0.40	0.47	0.54	0.31	0.65	0.67	0.61
1993	0.57	0.67	0.26	0.84	0.37	0.70	0.68	0.65	0.61
1994	0.58	0.63	0.39	0.93	0.59	0.54	0.66	0.60	0.57
1995	0.56	0.63	0.35	0.66	0.75	0.76	0.61	0.64	0.52
1996	0.59	0.65	0.47	0.86	0.79	0.56	0.60	0.60	0.48
1997	0.56	0.69	0.48	0.61	0.58	0.76	0.52	0.58	0.49
1998	0.48	0.71	0.44	0.61	0.69	0.72	0.44	0.50	0.43
1999	0.49	0.69	0.49	0.81	0.54	0.54	0.45	0.47	0.38
2000	0.52	0.73	0.52	0.65	0.59	0.65	0.48	0.38	0.39
2001	0.61	0.76	0.50	0.72	0.59	0.50	0.53	0.41	0.44

\*Municipios de Noria de Ángeles y Villa Hidalgo, Zacatecas, Méx.

La tabla muestra el valor del índice desglosado por cada sistema (Social, Económico y Ecológico). Estos índices fueron estimados con los valores de la matriz de indicadores de cada sistema, y permiten observar el desempeño de la sustentabilidad, para el periodo estudiado (1990 – 2001), así como el desempeño del bienestar social, crecimiento económico, y bienestar ecológico entre cada uno de los municipios estudiados. Los valores del índice han sido clasificados jerárquicamente de la siguiente manera: 0-0.5 bajo, 0.51 – 0.7 medio bajo, 0.71 – 0.8 medio alto, 0.81 – 1.0 alto.

Tabla E2. Matriz de correlación del índice de sustentabilidad de los indicadores sociales.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	Índice
S1	1							
S2	0.772597318	1						
S3	0.654062446	0.554593501	1					
S4	-0.804014294	-0.828160312	-0.592061927	1				
S5	0.225986577	-0.120382354	-0.020737684	0.228650792	1			
S6	-0.757691824	-0.427543608	-0.312552974	0.550631328	-0.580358443	1		
S7	0.216960646	0.087365388	0.150061359	-0.223040968	0.031464539	-0.227258462	1	
Índice	-0.908952851	-0.903011851	-0.710103594	0.945205076	0.095704175	0.613231137	-0.247554219	1

S1. Tasa e crecimiento poblacional, S2. Densidad de población, S3. Numero de habitantes por vivienda, S4. Población con acceso a agua, S5. Población con acceso a luz, S6. Viviendas con acceso a drenaje, S7. Tasa de analfabetismo, Índice. Índice de Sustentabilidad.

Tabla E3. Matriz de correlación del índice de sustentabilidad de los indicadores económicos

	E1	E2	E3	E4	E5	Índice
E1	1					
E2	-0.2156933	1				
E3	0.16770295	-0.91629579	1			
E4	-0.10587109	0.5096755	-0.54378246	1		
E5	-0.11517567	0.5418632	-0.57774508	0.98561345	1	
Índice	0.15265154	0.75568304	-0.68890343	0.31633697	0.34468641	1

E1. Valor de la producción de Agave respecto a la producción del sector primario, E2. Población Económicamente Activa, E3. Tasa de desempleo, E4. Salario Mínimo Regional, E5, Salario mensual por jefe de familia, Índice. Índice de sustentabilidad.

Tabla E3. Matriz de correlación del índice de sustentabilidad de los indicadores ecológico forestales

	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F17	F18	F19	F20	F21	F22	F23	ÍNDICE
F5	1.0000															
F6	0.9115	1.0000														
F7	0.0000	0.0000	1.0000													
F8	-0.0225	0.0363	0.3859	1.0000												
F9	-0.2499	-0.3445	-0.6448	0.1537	1.0000											
F10	0.2388	0.1578	-0.3647	-0.3044	0.1706	1.0000										
F11	-0.1812	-0.2844	0.7029	0.4655	-0.3560	-0.3681	1.0000									
F12	-0.0867	-0.0817	0.8768	0.5529	-0.5483	-0.3946	0.8739	1.0000								
F17	-0.1810	-0.1501	0.2855	0.1152	-0.1965	-0.2231	0.2968	0.3492	1.0000							
F18	-0.1102	-0.0612	0.5762	0.0492	-0.5277	-0.1342	0.2615	0.4305	0.1639	1.0000						
F19	-0.0409	-0.0664	0.8805	0.4093	-0.6083	-0.3785	0.7828	0.8990	0.2664	0.7141	1.0000					
F20	0.1551	0.1103	-0.1198	0.5669	0.4907	0.0871	0.0647	0.0814	-0.0980	-0.6575	-0.2313	1.0000				
F21	0.1284	0.0884	0.7442	0.1868	-0.6380	-0.2677	0.4977	0.6976	0.2807	0.6834	0.7809	-0.2692	1.0000			
F22	-0.2789	-0.2896	-0.1191	-0.1377	0.1084	-0.0893	0.0164	-0.1051	0.3127	-0.3536	-0.2439	0.1276	-0.3473	1.0000		
F23	0.0141	0.0317	0.7939	0.7140	-0.4079	-0.4566	0.8565	0.9574	0.2952	0.2951	0.8209	0.2366	0.5425	-0.1180	1.0000	
ÍNDICE	0.2990	0.2667	0.8227	0.6149	0.5032	-0.2001	0.7037	0.8731	-0.3804	-0.4666	0.8376	-0.1372	-0.7186	-0.1949	0.8743	1.0000

F5. Riqueza, F6. Índice de Diversidad, F7. Numero de plantas por ha, F9. Superficie forestal, F10 Superficie de agostadero, F11. Densidad de Agaves, F12. Tasa de reclutamiento, F17 % de cambio en el uso del suelo, F18. Condición de erosión de suelo, F19 Condición del manto freático, F20. Unidades animales en agostadero, F21. Superficie aprovechada, F22. Superficie reforestada, F23. Superficie de Agaves