



Universidad Autónoma Chapingo
División de Ciencias Forestales

**ÍNDICES GENERALES PARA
EVALUAR LA SUSTENTABILIDAD
EN SISTEMAS FORESTALES**



Tesis que presenta:

Martina Esparza Alvarado

DIRECCION ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

como requisito parcial
para obtener el grado de:

**Maestro en Ciencias
en Ciencias Forestales**

853121

Chapingo, Edo. de México
1997



ÍNDICES GENERALES PARA EVALUAR LA SUSTENTABILIDAD EN SISTEMAS FORESTALES

Tesis realizada por **Martina Esparza Alvarado** bajo la dirección del Comité
Asesor indicado, aprobado por el mismo y aceptado como requisito parcial para
obtener el grado de: _____

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

DIRECTOR: _____

DR. FRANCISCO JOSÉ ZAMUDIO SÁNCHEZ

ASESOR: _____

DR. JOSÉ LUIS ROMO LOZANO

ASESOR: _____

M.C. BALDEMAR ARTEAGA MARTÍNEZ

ÍNDICES GENERALES PARA EVALUAR LA SUSTENTABILIDAD EN SISTEMAS FORESTALES

El jurado que revisó y aprobó el examen de grado de la C. **Martina Esparza Alvarado** autor de la presente tesis de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales estuvo constituido por:

PRESIDENTE: _____

DR. FRANCISCO JOSÉ ZAMUDIO SÁNCHEZ

ASESOR: _____

DR. JOSÉ LUIS ROMO LOZANO

ASESOR: _____

M.C. BALDEMAR ARTEAGA MARTÍNEZ

DEDICATORIA

**A LA LUZ DIVINA
FUERZA INQUEBRANTABLE
QUE ME ACOMPAÑA**

CON CARÍÑO
A MI HIJO Mermíto, A MI ESPOSO ,
A MIS PADRES Y HERMANOS (AS)

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), y a la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) por el financiamiento y la oportunidad que se me dio para realizar mis estudios de postgrado.

Al Dr. Francisco José Zamudio Sánchez, por el apoyo que me brindo con su tiempo, consejos y orientación, en la dirección y redacción de esta tesis.

“Gracias”

Al Dr. José Luis Romo Lozano, por sus conocimientos brindados en el aula, revisión y sugerencias en este trabajo.

Al Mc. Baldemar Arteaga Martínez, por su disposición para la revisión del presente trabajo.

A la Dra. Amparo Borja de la Rosa, por su motivación, en los momentos difíciles en mi estancia como estudiante en esta Universidad.

A todos los maestros que me dieron la oportunidad de aprender de sus conocimientos.

A todas las personas, que de alguna manera me brindaron su apoyo y comprensión durante el desarrollo de mis estudios y de la presente tesis.

RESUMEN

INDICES GENERALES PARA EVALUAR LA SUSTENTABILIDAD EN SISTEMAS FORESTALES

Martina Esparza Alvarado: Maestro en Ciencias en Ciencias Forestales
Universidad Autónoma Chapingo
Dr. Francisco José Zamudio Sánchez

Se desarrollan índices de sustentabilidad bajo criterios económicos, estadísticos y biológicos, para evaluar sistemas forestales, éstos consideran características principales y relevantes en el crecimiento de una masa forestal. Se describen diferentes alternativas de aplicación de los índices generados, que considera un bosque establecido, el manejo deseado y la medición del término sustentabilidad en el manejo de las masas forestales y recursos asociados. Se genera una metodología para las medidas que se desarrollan, con el propósito de valorar la no sustentabilidad del sistema. La finalidad es detectar, anticipadamente los cambios que se presenten en un sistema donde se ha introducido una estrategia silvícola y decidir apropiadamente los cambios que se requieren. El estudio es de importancia, si se considera que existe gran incertidumbre acerca de los resultados que se tendrán en las decisiones que el hombre toma, fuera y dentro de un sistema, para aprovechar una masa forestal. La determinación de las componentes que involucran las medidas, se apoyó en ideas generalmente usadas en la silvicultura, economía y estadística.

Palabras-clave: Índices, sustentabilidad, aspectos económicos, estadísticos, biológicos, bosques.

SUMMARY

Martina Esparza Alvarado

GENERAL INDEXES TO EVALUATE THE SUSTAINABILITY IN FOREST SYSTEMS (1997)

(Under the direction of: Francisco José Zamudio Sánchez, Ph.D.)

Sustainability indexes are developed under economic, statistical and biological criteria, in order to evaluate a forest system where main and relevant characteristics in the growth of a forest are considered. Several alternative applications are described for the generated indexes which involve an established forest, the required management and the measurement of the term sustainability in forest management and their associated resources. In order to value the no-sustainability of a system, a methodology is generated for the measures that are developed. The objective is to detect previous changes that are presented in systems where a silvicultural strategy has been introduced and decide the appropriate changes that are required. The study is specially important, because it is supposed that there is a great uncertainty about results on decisions done by man, outside and inside the system, for improvement of established forest. Components involved in the measures were based in ideas generally used in economic, statistic and silviculture.

Index words: Sustainability, indexes, economic, statistical, biological aspect, forest.

CAPITULO	PAGINA
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN.	vi
SUMMARY	vii
 I INTRODUCCIÓN	 01
1.1 Objetivos	06
1.2 Hipótesis	06
 II REVISIÓN DE LITERATURA.	 07
2.1 Antecedentes.	07
2.2 Desarrollo sustentable	07
2.3 Sustentabilidad	09
2.3.1 Espacio	09
2.3.2 Tiempo	10
2.3.3 Dimensión biológica	11
2.3.4 Dimensión social	11
2.3.5 Dimensión económica	11
2.4 Medidas de la sustentabilidad.	15
2.4.1 Productividad total de los factores (PTF)	15
2.4.2 Productividad total social de los factores (PTSF)	16
2.5 Productividad	17
2.6 Componentes físicos de la productividad.	19
2.6.1 El medio ambiente operacional.	20

CAPITULO	PAGINA
2.6.2 Principales variables operacionales.	22
2.6.3 El suelo como un elemento de la productividad.	24
2.7 Externalidades.	24
2.7.1 Externalidades negativas en la producción	25
2.7.2 Externalidades negativas en el consumo	25
2.7.3 Externalidades positivas en la producción	25
2.7.4 Externalidades positivas en el consumo	26
2.8 Productividad total de los factores (PTF)	28
2.8.1 Números índices	30
2.9 Importancia de la composición de especies, crecimiento y manejo de una masa forestal	33
III METODOLOGÍA	36
3.1 Aspectos considerados de la sustentabilidad	36
3.1.1 Espacio	36
3.1.1.1 Nivel	36
3.1.1.2 Sistema	37
3.1.2 Tiempo	37
3.1.3 Dimensiones	38
3.2 Criterios técnicos que se siguieron para generar medidas e índices para evaluar la no sustentabilidad	39
3.3 Principales indicadores para intervenir en un bosque	40
3.4 Información requerida al manejador del bosque	40
3.5 Actividades de campo necesarias	42
3.5.1 Selección del área de estudio	42
3.5.2 Distribución de los sitios	43
3.5.3 Número de sitios	43
3.5.4 Dimensión de los sitios	43
3.5.5 Tipo de sitios de muestreo	44

CAPITULO	PAGINA
3.5.6 Seguimiento e intervalos de evaluación	44
3.6 Metodología propuesta para un bosque con una condición ideal sin manejo (<i>primera alternativa</i>)	45
3.6.1 Número total de árboles por especie	47
3.6.1.1 Número total de árboles por especie con la misma importancia para cada una de ellas	47
3.6.1.2 Número total de árboles por especie con diferente importancia para cada una de ellas	49
3.6.2 Distribución del número total de árboles por especie	51
3.6.2.1 Para un bosque con igual importancia para cada especie y clase	52
3.6.2.2 Para un bosque con diferente importancia para cada especie y clase	53
3.7 Metodología propuesta para un bosque sin condición ideal y con manejo (<i>segunda alternativa</i>)	55
3.7.1 Número total de árboles por especie	57
3.7.1.1 Número total de árboles por especie con la misma importancia para cada una de ellas	57
3.7.1.2 Número total de árboles por especie con diferente importancia para cada una de ellas	59
3.7.2 Distribución del número total de árboles por especie	60
3.7.2.1 Para un bosque con igual importancia para cada especie y clase	60
3.7.2.2 Para un bosque con diferente importancia para cada especie y clase	62
3.8 Metodología propuesta para un bosque con una condición ideal y manejo (<i>tercera alternativa</i>)	63
3.8.1 Número total de árboles por especie	65
3.8.1.1 Número total de árboles por especie con la misma	

CAPITULO	PAGINA
importancia para cada una de ellas	65
3.8.1.2 Número total de árboles por especie con diferente importancia para cada una de ellas	67
3.8.2 Distribución del número total de árboles por especie	69
3.8.2.1 Para un bosque con igual importancia para cada especie y clase	69
3.8.2.2 Para un bosque con diferente importancia para cada especie y clase	71
3.9 Impactos negativos temporales en el bosque	72
3.10 Sobre la forma de evaluación	75
IV RESULTADOS Y DISCUSIONES	82
4.1 Medidas para totales y distribuciones de totales de especies sobre una condición ideal sin manejo (<i>primera alternativa</i>)	91
4.1.1 Medidas para el número total de árboles por especie	92
4.1.1.1 Medidas para el número total de árboles por especie con la misma importancia para cada una de ellas	94
4.1.1.1.a1 Medida de lejanía cuadrática	95
4.1.1.1.a2 Medida de lejanía absoluta	96
4.1.1.1.b1 Índice de lejanía cuadrático	98
4.1.1.1.b2 Índice de lejanía absoluto	99
4.1.1.1.c1 Índice de comparación entre los años r y t cuadrático con $r > t$	99
4.1.1.1.c2 Índice de comparación entre los años r y t absoluto con $r > t$	101
4.1.1.2 Medidas para el número total de árboles por especie con diferente importancia para cada una de ellas	101
4.1.1.2.a1 Medida de lejanía cuadrática	102
4.1.1.2.a2 Medida de lejanía absoluta	102

CAPITULO	PAGINA
4.1.1.2.b1 Índice de lejanía cuadrático	103
4.1.1.2.b2 Índice de lejanía absoluto	103
4.1.1.2.c1 Índice de comparación entre los años r y t cuadrático con $r > t$	103
4.1.1.2.c2 Índice de comparación entre los años r y t absoluto con $r > t$	103
4.1.2 Medidas para la distribución del número total de árboles por especie	104
4.1.2.1 Medidas para un bosque con la misma importancia para cada especie y clase	111
4.1.2.1.a1 Medida de lejanía cuadrática	111
4.1.2.1.a2 Medida de lejanía absoluta	111
4.1.2.1.b1 Vector de lejanías por especie cuadráticas	112
4.1.2.1.b2 Vector de lejanías por especie absolutas	112
4.1.2.1.c1 Índice de lejanía total cuadrático	112
4.1.2.1.c2 Índice de lejanía total absoluto	113
4.1.2.1.d1 Vector de índices de lejanía por especie cuadráticos	113
4.1.2.1.d2 Vector de índices de lejanía por especie absolutos	113
4.1.2.1.e1 Índice de comparación entre los años r y t cuadrático con $r > t$	113
4.1.2.1.e2 Índice de comparación entre los años r y t con absoluto $r > t$	114
4.1.2.1.f1 Vector de índices de comparación por especie cuadráticos	114
4.1.2.1.f2 Vector de índices de comparación por especie absolutos	114

CAPITULO	PAGINA
4.1.2.2 Medidas para un bosque con diferente importancia	
para cada especie y clase	114
4.1.2.2.a1 Medida de lejanía cuadrática	116
4.1.2.2.a2 Medida de lejanía absoluta	116
4.1.2.2.b1 Vector de lejanías por especie	
cuadráticas	117
4.1.2.2.b2 Vector de lejanías por especie	
absolutas	117
4.1.2.2.c1 Índice de lejanía total cuadrática	117
4.1.2.2.c2 Índice de lejanía total absoluta	117
4.1.2.2.d1 Vector de índices de lejanía por	
especie cuadráticos	118
4.1.2.2.d2 Vector de índices de lejanía por especie	
absolutos	118
4.1.2.2.e1 Índice de comparación entre los años	
r y t cuadrático con $r > t$	118
4.1.2.2.e2 Índice de comparación entre los años	
r y t absoluto con $r > t$	118
4.1.2.2.f1 Vector de índices de comparación por	
especie cuadráticos	119
4.1.2.2.f2 Vector de índices de comparación por	
especie absolutos	119
4.2 Medidas para totales y distribución de totales de especies para	
un bosque sin condición ideal y manejo (<i>segunda alternativa</i>)	119
4.2.1 Medidas para el número total de árboles por especie	119
4.2.1.1 Medidas para el número total de árboles por especie con	
la misma importancia para cada una de ellas	121
4.2.1.1.a Tamaño del bosque	121
4.2.1.1.b Índice de comparación de tamaños del	

CAPITULO	PAGINA
bosque entre los años r y t con $r > t$	122
4.2.1.1 Medidas para el número total de árboles por especie con diferente importancia para cada una de ellas	123
4.2.1.1.a Tamaño del bosque	123
4.2.1.1.b Índice de comparación de tamaños del bosque entre los años r y t con $r > t$	124
4.2.2 Medidas para la distribución del número total de árboles por especie	124
4.2.2.1 Medidas para un bosque con igual importancia para cada especie y clase	125
4.2.2.1.a Tamaño del bosque	125
4.2.2.1.b Vector de tamaños por especie	125
4.2.2.1.c Índice de comparación de tamaños del bosque entre los años r y t con $r > t$	125
4.2.2.1.d Vector de índices de comparación por especie	125
4.2.2.2 Medidas para un bosque con diferente importancia para cada especie y clase	125
4.2.2.2.a Tamaño del bosque	126
4.2.2.2.b Vector de tamaños por especie	126
4.2.2.2.c Índice de comparación de tamaños del bosque entre los años r y t con $r > t$	126
4.2.2.2.d Vector de índices de comparación por especie	126
4.3 Medidas para totales y distribución de totales de especies para un con una condición ideal y manejo (<i>tercera alternativa</i>)	126
V CONCLUSIONES	128
VI LITERATURA CITADA	132

I INTRODUCCIÓN

Los bosques son el recurso renovable más copioso y versátil que la naturaleza proporciona a la humanidad simultáneamente con toda una amplia gama de beneficios y servicios económicos, sociales, ambientales y culturales. Con el crecimiento demográfico aumenta la demanda de sus numerosos productos y funciones, trayendo como consecuencia directa la disminución de los recursos forestales. De modo indirecto el crecimiento demográfico afecta a los bosques a través de las externalidades ocasionadas por, otras actividades que se incrementan para responder a este crecimiento, como es el caso de los desechos de la industria, la contaminación ocasionada por el transporte, la contaminación de aguas superficiales y subterráneas por la basura y el deterioro de la atmósfera por los aerosoles. Es por eso que se han instrumentando diferentes prácticas, tal como, el uso integral y múltiple de los bosques para lograr un rendimiento sostenido de los mismos, de tal forma, que permita un desarrollo sostenible, pasando de la ordenación de bosques a la ordenación de ecosistemas forestales. Sin embargo, se carece de medidas para valorar la sustentabilidad de los diferentes sistemas de manejo forestal, las que ya existen en sistemas agrícolas a pesar de las críticas que estas puedan tener.

Considerando como sustentabilidad al 'mantenimiento del *potencial* para nuestros bosques y ecosistemas acuáticos asociados para producir la misma cantidad y calidad de bienes y servicios a perpetuidad' (Franklin, 1995) se desprenden consideraciones necesarias para construir medidas que valoren la sustentabilidad de una determinada estrategia silvícola, aún aquella de no intervenir en forma alguna al bosque.

Cuando se habla de mantener a perpetuidad un bosque y sus ecosistemas acuáticos asociados, para obtener el mismo producto, resulta deseable pero demasiado atrevido. Cualquier periodo de tiempo u horizonte de planeación, a no ser uno muy pequeño, para asegurar la sustentabilidad de un sistema, sería sólo un buen propósito, pero hasta hoy no existen bases científicas para lograrlo. Por consiguiente, habrá que conformarse con un enfoque menos ambicioso pero más realista.

El enfoque adoptado en otros sistemas, por ejemplo los agrícolas, (véase Barnett *et al.*, 1995) el monitoreo es uno de los principales elementos operacionales (luz, bióxido de carbono, temperatura, humedad, nutrientes, fuerzas mecánicas y químicos tóxicos) y variables físicas (suelo y elevación) para medir los cambios que se suscitan por la incorporación de insumos al sistema o impactos de otras actividades, buscando mantener o incrementar la productividad del mismo. Mientras, la productividad se mantenga o incremente, el sistema se

podría considerar sustentable, de otra manera no lo es y se procede a buscar la causa del descenso en el contexto de los elementos operacionales y variables físicas. Las medidas de productividad que se han propuesto son cada vez más incluyentes, considerando externalidades tanto positivas como negativas; dadas por un índice resultante del cociente entre un producto agregado y un insumo agregado que conduce a una productividad total social de los factores (PTSF).

El enfoque usado en este trabajo tampoco nos asegura la perpetuidad de la producción de los recursos forestales, simplemente nos garantiza detectar a tiempo, los cambios negativos que pongan en riesgo la sustentabilidad del sistema. Si además se tiene un seguimiento de los elementos operacionales y las variables físicas, se hace posible determinar cuáles están ocasionando el efecto negativo para corregirlos y modificarlos, de ser posible, la caída en la productividad del bosque. Aunado a esto, sería importante la inclusión de las externalidades positivas y negativas del sistema para generar una medida más completa de la sustentabilidad del mismo. Son pocos los intentos para medir e incluir en la productividad de un sistema, aún menos si es forestal, los productos no comercializables. Si éstos son considerados en el análisis, la componente ambiental puede ser incorporada, aumentando la precisión de la medida que se construya para valorar la sustentabilidad del mismo, ya que esta componente es esencial en la productividad de los sistemas que nos ocupan. La ausencia de estos intentos, claramente, es la dificultad de valorar bienes

que no tienen ningún valor de mercado pues si bien tienen un valor de uso no es evidente cual es su valor de cambio. En ciertos trabajos (Steiner *et al*; (1995) citado por Barnett *et al* (1995)) se han integrado costos y beneficios de las externalidades negativas y positivas en las medidas de productividad consideradas en estudios de sustentabilidad agrícola. Los precios asignados en estos trabajos a los efectos negativos o positivos de externalidades en cierto modo fueron seleccionados en forma arbitraria, por ejemplo, se fija un costo por el uso de insecticidas, que contaminarán de algún modo las aguas superficiales y subterráneas, igual a un determinado porcentaje (*viz.* 30%) del costo del insecticida. Esta forma de asignación ha sido sujeta a un sin número de críticas, ya que trata de establecer los precios valorando lo que sería necesario ahorrar, como porcentaje del precio del producto contaminador, para limpiar su efecto negativo en el futuro cuando sea requerido. Sin embargo, esta provisión ha obedecido a criterios prácticos, careciendo de bases científicas que den alguna seguridad de que ésta aliviará la contaminación que ahora se produce con el uso de, por ejemplo, los insecticidas. Por ello, siendo este trabajo una propuesta inicial no se han incluido en las medidas, para dar seguimiento al estado del bosque, externalidades de ninguna clase.

Lo que sí se desea son formas para detectar anticipadamente, por medio de índices resultantes del monitoreo la posible caída o destrucción de un sistema forestal, favoreciendo con ello el criterio biológico sobre el económico.

Es claro que si se alude a lo incorrecto de nuestro conocimiento como una excusa para ignorar externalidades se comete un error importante y no hay duda que son necesarios los mejoramientos, especialmente cuando se sabe que se está fallando en incluir elementos esenciales tal como el cuidado del medio ambiente. No obstante, las limitaciones a que este trabajo está sujeto y el estado actual del tratamiento de las externalidades hacen infactible su incorporación.

De acuerdo con Frayler *et al.* (1995) donde la construcción de índices para parcelas agrícolas se hizo en función del análisis de productividad, los índices propuestos serán contruidos siguiendo una forma semejante ya que la principal ventaja de su uso está en la relativa facilidad con que las medidas de desempeño pueden ser desarrolladas y comparadas.

Esencialmente, entre otras cosas, la sustentabilidad está interesada con la conservación de la capacidad productiva de un sistema para un futuro previsible. Por tal razón aquí no estamos interesados en confrontar ideas generales sino concentrarnos en medidas apropiadas del desarrollo de un sistema forestal como las principales indicadores de la sustentabilidad. Así, poder mantener un sistema generador de bienes vigilando permanentemente su estado para, demostrar alguna disminución en su capacidad, detectar las causas que lo afecten negativamente y corregirlas en lo posible.

1.1 OBJETIVOS

1. Generar índices de sustentabilidad para un sistema forestal bajo criterios económicos, estadísticos y biológicos, considerando como punto de partida las características principales para el crecimiento de un bosque, el manejo deseado para el sistema, y la complejidad de la dinámica de la población.

2. Promover la medición del término sustentabilidad en el manejo de una masa forestal y recursos asociados en los bosques mexicanos.

1.2 HIPOTESIS

1. Los índices propuestos en general, ya que son medidas que valoran la sustentabilidad, serán de utilidad para detectar con mayor certeza y anticipación cambios bruscos en el sistema ocasionados por la estrategia silvícola que se use o variable exógenas a ésta y consecuentemente decidir los cambios o acciones que se requieran.

2. La sustentabilidad esta dada, por un lado, como la evaluación de las decisiones que el hombre toma para el manejo de una masa forestal establecida, y por otro, como la evaluación de los efectos en la masa forestal de fuerzas que se originan fuera del lugar.

II REVISION DE LITERATURA

2.1.- Antecedentes

Actualmente son escasos los trabajos realizados para medir la sustentabilidad forestal, considerando aspectos económicos, ambientales y estadísticos, por lo que se ha recurrido a fuentes recientes de información donde se han involucrado estos aspectos en casos particulares de estudio, todos ellos enfocados a sistemas agrícolas, ya que en la actualidad es de gran preocupación para toda la humanidad la conservación de la capacidad productiva de los sistemas de alimentación para sostener en el futuro, a una población creciente.

2.2 Desarrollo sustentable

De acuerdo a la FAO (1988) se señala que desarrollo sustentable es el manejo y la conservación del recurso base natural y la orientación del cambio institucional tecnológico en tal forma que se asegure la consecución y la satisfacción continua de las necesidades humanas presentes y futuras; tal desarrollo en diferentes sectores conserva la tierra, el agua, los recursos

genéticos, animales y vegetales, es ambientalmente no degradante, tecnológicamente apropiado, económicamente viable y socialmente aceptable.

La Comisión Mundial sobre el Medio ambiente y Desarrollo CMMD (1987) indica que el Desarrollo Sustentable es aquel que satisface las necesidades del presente sin comprometer la habilidad de futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades.

Maini (1992) indica que el desarrollo sostenible de tierras forestales y de sus múltiples valores económicos y ambientales implican mantener indefinidamente, sin mengua inaceptable, tanto la capacidad para producir y renovarse, como las especies y la diversidad ecológica de los ecosistemas forestales. Un umbral de la mengua de aceptabilidad quedará determinado por decisiones de personas, instituciones y naciones, así como de toda la comunidad internacional, basada en principios de ecología y de los imperativos socioeconómicos. Para decidir habrá que compensar los riesgos de la acción con los costos de la inacción.

Maini (1992) señala que la formulación de métodos de desarrollo sostenible exige armonizar las actividades humanas con los aspectos biológicos y físicos de los ecosistemas forestales. La actividad del hombre y los ecosistemas forestales, así como su interacción, son dinámicos y cambian en el espacio y tiempo, por tal razón, la práctica de un desarrollo forestal sustentable exige

vigilar ambos sistemas y su interacción implicando una serie de consideraciones ecológicas, socioeconómicas, técnicas y políticas.

2.3.- Sustentabilidad

La humanidad ha sido testigo de avances sin precedentes en el desarrollo y aplicación de prácticas de producción agrícola y forestal, basadas en la ciencia. A consecuencia del crecimiento demográfico se ha incrementado la demanda de numerosos productos, por tal motivo, tanto los recursos forestales como agrícolas, están sufriendo un excesivo deterioro, resultado del mal manejo y el abuso de su aprovechamiento, lo que ha dado origen a buscar la sustentabilidad de los ecosistemas.

Leynam y Herdt (1995) señalan que la sustentabilidad es el resultado de la relación entre tecnologías, insumos y manejo, usados sobre un recurso base particular dentro de un contexto socioeconómico dado. La sustentabilidad al menos involucra tres aspectos: espacio, tiempo y lo que se denomina dimensión.

2.3.1 Espacio

Uno puede considerar los sistemas a través de un rango infinito de espacios que va desde un nivel global hasta uno microscópico, a menor nivel mayor

número de sistemas y viceversa, pero también, a menor nivel mayor importancia tendrán las externalidades y viceversa. Dado el nivel existirán varios sistemas, por tal razón se hace presente la necesidad de una definición clara del sistema particular de interés y así no confundir con otros tipos del mismo nivel, porque la característica que presentan los sistemas es ser únicos o sólo algo representativos de otros sistemas relacionados (Herdt y Steiner 1995).

2.3.2 Tiempo

Es necesario considerarlo ya que la sustentabilidad solo puede pensarse en un periodo de tiempo definido pues en un extremo, la vida depende del sol y al ser esta una estrella agonizante ningún proceso es sustentable, no obstante el periodo calculado para que el sol muera es tan largo que resulta insignificante el tiempo de vida de un sistema forestal por muy largo que este tiempo pueda considerarse. Además los sistemas cambian sus prácticas con el tiempo (Herdt y Steiner 1995).

Herdt y Steiner (1995) señalan que las dimensiones económica, biológica y social, ayuda a hacer concreta la discusión de la sustentabilidad en su definición, ya que se trata de incorporar estos aspectos simultáneamente en la medición de la sustentabilidad, a continuación dichas dimensiones son definidas.

2.3.3 Dimensión biológica

Aquella que participa en determinar la cantidad de producto, por ejemplo, el clima o las enfermedades. Al evaluar la cantidad de producto indirectamente se miden los cambios en la dimensión biológica que pueden llevar a un sistema hasta el momento sustentable a uno no sustentable, vea por ejemplo el caso de una enfermedad difícil de erradicar que paulatinamente haga decrecer la cantidad de producto.

2.3.4 Dimensión social

Aquella que determina si un sistema es adecuado para sostener a la comunidad asociada a éste. Por ejemplo, políticas de trabajo, formas de tenencia de la tierra, programas de incentivos, son algunas de las componentes de esta dimensión que pueden influir en que un sistema sea o no sustentable (Herdt y Steiner 1995).

2.3.5 Dimensión económica

Es aquella que refleja el valor de cambio del producto, básicamente el precio. Así, un sistema que produzca una cantidad constante de producto puede verse deteriorado por precios bajos del mismo a tal punto de que no sea económicamente sustentable (Herdt y Steiner 1995).

Leyman y Herdt (1989) definieron la sustentabilidad como la capacidad de un sistema para mantener la producción a un nivel aproximadamente igual a, o mayor que, su promedio histórico, con la aproximación determinada por su nivel histórico de variabilidad.

Rayner y Welham (1995) señalan que para propósitos operativos, la sustentabilidad puede ser evaluada en relación al índice de productividad total de los factores (PTF), con posibles concesiones para externalidades, tal que un sistema sostenible tenga una tendencia no negativa en su productividad total de los factores (PTF) a través del tiempo.

Se debe considerar que en el largo plazo un sistema sostenible forestal o agrícola deberá exhibir elasticidad ante eventos externos (Rayner y Welham 1995). Entiéndase por elasticidad la capacidad que un sistema tiene de recobrar, en un lapso razonablemente breve, su antigua condición, después de que algún factor (elementos operacionales o variables físicas) sufrió un cambio drástico y regresa a su nivel anterior. Un ejemplo inmediato es la sequía en un determinado sistema. De esta forma será posible mantener la productividad constante (con una tendencia positiva) al término de cualquier evento que modifique drásticamente algún factor.

En relación a este concepto, Maini (1992) señala que es de gran importancia señalar que la mayor parte de los bosques, siendo ecosistemas de

larga vida y gran capacidad para renovarse, no son ecológicamente frágiles. Pueden resistir una amplia gama de alteraciones naturales, como rigores del clima (períodos de sequía y de mucha humedad), tempestades, incendios, insectos, enfermedades etc). Estas alteraciones forman parte de la naturaleza de los ecosistemas forestales.

Si la productividad total de los factores varía mucho alrededor de su tendencia se tiene un sistema inestable del cual es difícil asegurar su sustentabilidad. Ya que la influencia de los disturbios en los sistemas conducirán a modificar abruptamente la variabilidad en la productividad, será necesario evaluar y cuantificar las tendencias en las productividades totales de los factores por medio de métodos estadísticos (Rayner y Welham 1995).

La estabilidad de la productividad de los factores total alrededor de una tendencia puede también ser considerada como un indicador relevante de la conducta del sistema. Por tal razón se requiere de procedimientos estadísticos para generar la información sobre la dispersión de la PTF, lo que no es una tarea fácil por los requerimientos de información.

Brown *et al.* (1995) indican en su estudio que un sistema agrícola sustentable debe ser económica y ecológicamente viable a través del tiempo. Además, la productividad del recurso suelo no debe depreciarse a través del tiempo. Esta faceta es difícil de medir porque los cambios en la tecnología

pueden enmascarar la degradación del suelo. En cuanto a la sustentabilidad económica la midieron en dos formas: la relación producto/insumo con precios reales para insumos y productos en cada período establecido, la cual refleja la ganancia a corto plazo, y un índice de la productividad total de los factores (PTF). Estas medidas pueden ser aplicadas a cualquier sistema, para medir el desarrollo del mismo.

Brown *et al.* (1995) señalan que es de gran importancia cuantificar el impacto del cambio tecnológico (que generalmente reemplaza a la mano de obra) y como afecta el crecimiento de la producción. Una alternativa para medir el valor real tradicional del producto agregado y el valor medio de las productividades de la mano de obra es medir el crecimiento de la productividad total de los factores.

Rayner y Welham (1995) definen que un cambio en el estado de la tecnología ocurre cuando hay un desplazamiento en la relación entre el producto (bienes y servicios) y los insumos dados (materiales y trabajos). La innovación tecnológica esta frecuentemente incorporada en diseñar mejoras en insumos existentes, por ejemplo, si se desarrolla un producto de mayor calidad al antes desarrollado. Un cambio tecnológico incorporado implica que la calidad de insumos se altera y centra la atención en medir correctamente los flujos de servicios del insumo. Un cambio en la calidad afecta todos los insumos (como capital, mano de obra, etc) utilizados en la producción. La

innovación tecnológica afecta el antiguo uso de insumos.

El uso del índice Tornqvist, para estimar el crecimiento de la productividad total de los factores, se ha extendido ampliamente (Gollop y Jorgenson 1980).

Brown *et al.* (1995) indican que el uso del cociente producto/insumo y el índice Tornqvist (PTF) muestran que el manejo de nutrientes balanceados influyen en la sustentabilidad de la producción de cultivos. Lo mismo es probable que ocurra en un sistema forestal.

2.4.- Medidas de la sustentabilidad

2.4.1 Productividad total de los factores (PTF)

Mide un índice de producto total relativo a un índice de insumos totales, es considerada una mejor medida de productividad por reconocer el uso de todos los insumos manejados y refleja la relación entre los productos y los insumos. Sin embargo, la PTF como usualmente es medida no considera los insumos y productos que son externos a las unidades de producción en la toma de decisiones. Es decir, no consideran externalidades; que son cantidades externas a quienes recibieron el producto de un proceso de producción. Es claro que los productos externos de una unidad económica pueden llegar a ser insumos externos de otra. Por ejemplo la lluvia ácida generada por la industria (Herdt y Steiner 1995).

2.4.2 Productividad total social de los factores (PTSF)

Se ha definido como la PTF pero considera no sólo los insumos manejados sino también las externalidades. Los productos incluyen aquellos obtenidos en el sitio (como madera), y aquellos que son externos al sitio (como contaminación de agua subterránea y superficial, cambio en la arquitectura del paisaje, etc), (Herdt y Lynam 1992).

De esta forma para medir la sustentabilidad usando este enfoque, se requiere medir el flujo de insumos y productos a través de los límites del sistema en el tiempo, cuidando incluir todos los productos y los insumos.

Herdt y Steiner (1995) señalan que otra medida aceptable de la sustentabilidad de un sistema es la salud del ecosistema, porque aún cuando se de una buena medida de todos los insumos y todos los productos, es necesario conocer que le está ocurriendo a la calidad del recurso base, ya que se espera que afecte la producción física /biológica futura de cualquier sistema agrícola ó forestal, y de esto depende que el sistema sea o no sustentable. Algunas de las medidas universalmente aceptables de la salud de un ecosistema, que reflejan varias propiedades del suelo son: la materia orgánica del suelo, la estructura del suelo, los microorganismos del suelo, el pH y la temperatura del suelo; los que pueden cambiar como una consecuencia

de los insumos aplicados y los productos removidos. Entre otros indicadores, se considera a la erosión como un producto del sistema valuado negativamente. Así también, la presencia de plagas y organismos benéficos en el medio ambiente es otro indicador. Los indicadores de la salud del ecosistema deben permanecer en valores aceptables. Si los problemas de medición pueden ser resueltos, tanto el aspecto salud del ecosistema como el producto/insumo, pueden ser evaluados para cualquier sistema. Si estos enfoques son igualmente válidos y consistentes, cualquier ecosistema que sea saludable deberá tener una tendencia no decreciente en la PTSF y viceversa. Algunos de los criterios pueden ser malos para unos sistemas y otros no serlo, por tal razón, la salud del recurso base debe ser medida para un sistema particular sobre un campo particular.

2.5 Productividad

Steiner *et al.* (1995) señalan que actualmente el concepto de productividad es de bastante interés, ya que es la medida básica de la eficiencia de un sistema productivo. El desarrollo de la productividad es reconocido como esencial para el mantenimiento de la rentabilidad y salud económica de un cultivo agrícola o una masa forestal.

Rayner y Welham (1995) señalan que el crecimiento de la productividad es un concepto estrechamente relacionado a la noción de cambio tecnológico. Si el cambio técnico incrementa la efectividad por la cual una combinación dada

de insumos (materiales y trabajo) es trasformada en producto entonces se dice que ocurre un incremento en la productividad del paquete de insumos o insumo agregado.

Los científicos e ingenieros consideran la productividad en términos del flujo de materiales y energía usadas para producir mercancías útiles. Los economistas miden la productividad relacionando los productos comercializados a insumos comprados. En el futuro se requiere incluir los productos e insumos no comercializables tales como las externalidades, para determinar su significancia en la productividad económica.

Rayner y Welham (1995) señalan que las medidas de productividad intentan proporcionar un número o calificar a través del tiempo el producto en relación a los insumos usados, esto es, evaluar movimientos en las relaciones producto/insumo. Se dice que la productividad se incrementa cuando mayores cantidades de producto (bienes y servicios) son producidas de las mismas cantidades de insumos (materiales y trabajo) o cuando las mismas cantidades de bienes y servicios son producidas con cantidades más pequeñas de materiales y trabajo.

La productividad de un sistema agrícola o forestal requiere el monitoreo de los principales elementos operacionales y variables físicas, para poder medir y

analizar los posibles cambios drásticos que se susciten por la agregación de insumos o impactos causados por otras actividades buscando incrementar la productividad del mismo. Esto no asegura la perpetuidad del sistema, sólo nos garantiza detectar a tiempo los cambios negativos que pongan en riesgo la sustentabilidad del sistema y así poder anticipadamente buscar alternativas para modificar la caída en la productividad. Desde la perspectiva económica, la productividad representa una medida reducida del potencial del sistema, aunque no es lo más adecuado desde el punto de vista biológico.

Brown *et al.* (1995) citan que en 1888, J W Sanborn inició un estudio para demostrar las técnicas que los agricultores pudieran utilizar para compensar la declinación en la productividad del suelo en Missouri, el cual involucró el uso de abonos de origen animal y diferentes sucesiones de cultivos o rotación donde pronto se demostró el valor de la rotación y uso de abono que les permitió la aplicación de técnicas más novedosas para sostener la productividad. A pesar de otros cambios a través del tiempo, notaron que el reducir insumos quizá no mantenga la habilidad de los suelos para sostener la capacidad productiva del recurso suelo.

2.6 Componentes físicos de la productividad

Franklin (1995) señala que la productividad comprende elementos físicos (el medio ambiente operacional) y variables físicas (tales como suelo y elevación)

haciendo de éstos, las siguientes consideraciones:

2.6.1 El medio ambiente operacional

Al nivel más fundamental, la biota reacciona a un conjunto relativamente pequeño de factores físicos: luz, bióxido de carbono, temperatura, humedad, nutrientes, fuerzas mecánicas, y químicos tóxicos. Esto incluye aquella parte de la biota responsable de proporcionar la energía base para el ecosistema en su conjunto, por ejemplo, organismos con clorofila que son capaces de captar fotosintéticamente la energía del sol. Estos elementos físicos son a veces referidos como el medio ambiente operacional para distinguirlos de las variables físicas, tales como suelo, elevación, o aspecto, que indirectamente influyen en la actividad biótica a través de su efecto sobre estos factores operacionales.

Algunas de estas variables son vistas como constantes en regiones de bosque templado y por ende pueden descartarse del análisis. La luz, no se considera como factor limitante en estas regiones. Generalmente, hay suficiente luz disponible durante todo el año, aunque la intensidad es obviamente mayor en el verano que en el invierno. Por lo tanto, la luz no es un obstáculo serio para la actividad fotosintética incluso durante los meses de invierno, asumiendo que las condiciones de temperatura y humedad son las indicadas.

El contenido de bióxido de carbono en la atmósfera es, en contraste, con frecuencia visto como un factor limitante para la productividad y, por un período corto, como una constante. La concentración atmosférica de bióxido de carbono se está incrementando gradualmente, y el impacto potencial de este incremento sobre la productividad de las plantas, es un tema polémico que actualmente esta siendo discutido y debatido para valorar los impactos del cambio global sobre la productividad.

Las fuerzas mecánicas cubren una variedad de efectos mecánicos que pueden limitar la productividad por su impacto directo sobre las plantas verdes o en otros procesos del ecosistema. Por ejemplo, fuertes nevadas, granizadas, vientos e inundaciones que dañan ramas y troncos de los árboles. Se excluyen del medio ambiente operacional los disturbios mecánicos catastróficos tal como un intenso incendio o una erupción volcánica, que esencialmente destruyen la existencia de un ecosistema e inician uno nuevo.

Los materiales tóxicos proporcionan un equivalente químico a las fuerzas físicas en el medio ambiente operacional del bosque. Estos pueden ser materiales naturales encontrados en el suelo o atmósfera de una región. Por ejemplo, niveles excesivos de magnesio en la roca ultrabásica de tipo metamorfósico, conocida como serpentine eficazmente excluye muchos organismos y retarda el crecimiento de muchos otros.

2.6.2 Principales variables operacionales

Franklin (1995) señala que los elementos del medio ambiente operacional, temperatura, humedad y nutrientes, son las variables responsables de la mayor parte de la variabilidad en la productividad entre ecosistemas de bosque templado. El análisis multivariado del medio ambiente operacional invariablemente identifica alguna combinación de temperatura, humedad y nutrientes como la principal controladora de la distribución y la productividad de la comunidad forestal.

La temperatura es el principal factor operacional físico que controla la distribución y productividad de ecosistemas forestales a través de regiones y gradientes de elevación. La temperatura controla directamente varios procesos físicos y químicos (tal como fotosíntesis, descomposición y absorción de agua), e indirectamente, mediante sus efectos sobre la humedad, controla el potencial de evapotranspiración.

La humedad, como un elemento operacional afecta árboles y otras plantas en términos del esfuerzo hídrico interno de la planta (Waring y Schlesinger (1985), citados por Franklin (1995)). Sin embargo, el régimen de humedad es el resultado de una compleja interacción que involucra el balance entre la

absorción de agua, que es generalmente agua almacenada en el suelo, y la pérdida de agua, que es principalmente la pérdida de agua hacia la atmósfera a través de los estomas y aberturas en las hojas. Muchas medidas indirectas son usadas para proveer un índice integrado de las condiciones generales de humedad en un sitio forestal. Las medidas directas típicamente señalan el esfuerzo hídrico interno de la planta en épocas del año seleccionadas, usando cámaras presurizadas.

Los nutrientes son una tercera variable operacional que controla la productividad del bosque. Los nutrientes han recibido una extraordinaria atención de los forestales debido a que estos son a menudo la única variable del medio ambiente fácilmente manipulable por el hombre. Aquí se incluyen los macronutrientes y micronutrientes que las plantas requieren. Hay una varianza regional substancial en la importancia relativa de los nutrientes y la humedad como factores limitantes sobre la productividad.

Franklin (1995) concluye que el medio ambiente físico operacional de un bosque puede ser definido en términos de relativamente pocas variables, siendo, la temperatura, humedad y nutrientes las que modifican la productividad.

2.6.3 El suelo como un elemento de la productividad

Franklin (1995) señala que los forestales con frecuencia señalan al suelo como la base física para la productividad, dada la relación directa que el suelo tiene con dos de las tres principales variables operacionales: humedad y nutrientes.

Como un medio físico, el suelo proporciona algunas funciones: almacenaje de humedad, fuente y almacén de nutrientes, sitio para el anclaje de plantas, y hábitat para plantas simbiotes críticas, tal como hongos y otros organismos esenciales en los procesos del ecosistema. Los aspectos físicos del suelo incluyen variables como profundidad, drenaje, volumen, densidad, porosidad, textura y temperatura; estas variables tienen influencia en condiciones críticas para la biota, tal como aireación, capacidad de retención de humedad y disponibilidad de humedad. Los aspectos químicos importantes del suelo incluyen cantidad y calidad de varios macronutrientes y micronutrientes, y las tasas a las cuales se hacen disponibles (Franklin 1995).

2.7 Externalidades

Maddala y Mille (1993) definen dos tipos de externalidades para la producción y el consumo:

2.7.1 Externalidades negativas en la producción

Como aquellas que imponen costos a las personas ajenas al proceso de producción. Por ejemplo, una industria de aserrío instalada en el bosque con el ruido generado afecta la fauna del lugar provocando el abandono de su hábitat, y, con sus desechos, contamina las aguas subterráneas y superficiales.

2.7.2 Externalidades negativas en el consumo

Como aquellas que imponen costos a personas ajenas al consumo de ese bien. Por ejemplo, los costos que se les imponen a los habitantes de una comunidad en el bosque (por destrucción de su hábitat), provocado por el corte de madera, que el industrial obtiene para la fabricación de muebles que otras personas podrán consumir.

2.7.3 Externalidades positivas en la producción

Como aquellas que generan un bien a las personas en el proceso de producción sin ningún costo del beneficio que este da. Por ejemplo, en un bosque en el que la lluvia proporciona un beneficio a la vegetación incrementando la producción, también beneficia a todas aquellas personas que viven en el bosque y del bosque, sin ningún costo, por el beneficio que estos reciben.

2.7.4 Externalidades positivas en el consumo

Son aquellas que generan un beneficio directo a los consumidores de ese bien e indirectamente a las personas ajenas al consumo de ese bien. Por ejemplo los habitantes cercanos a una masa forestal, que utilizan ciertas plantas para consumo diario o bien como medicamentos directamente estas son beneficiadas con el consumo de ese bien, y al mismo tiempo están favoreciendo al bosque ya que generalmente esas plantas forman el sotobosque, y al eliminar parte de éste le permiten al bosque regenerarse con mayor facilidad al eliminar parte de la competencia por otras hierbas, esto es principalmente válido para suelos no muy accidentados.

Faeth *et al.* (1991) señalan que los costos reales de las externalidades para la sociedad, (tales como la contaminación del agua subterránea y la erosión del suelo), son también importantes especialmente para aquellos sectores dependientes de recursos tales como la agricultura y el bosque. Steiner *et al.* (1995) señalan que lo descrito anteriormente es especialmente cierto para experimentos agronómicos a largo plazo debido al tiempo implicado y al efecto acumulativo de las externalidades en el ambiente.

Cabe señalar que los bosques son sistemas forestales que incluyen los recursos que por su naturaleza generalmente requieren de un período de tiempo bastante amplio para alcanzar su desarrollo, lograr su reproducción y

aprovechamiento. Se requiere explorar formas apropiadas para medir los costos de las externalidades y así poder considerarlos en el análisis económico producto/insumo, de estos experimentos.

Steiner *et al* (1995) señalan que valorar el costo de externalidades es una ciencia todavía en su infancia. Mucho del conocimiento básico y metodológico de investigación requiere ser estudiado con mayor profundidad para entender el efecto de las externalidades. Aún cuando los efectos de éstas, son bien entendidos, el cálculo de sus costos para la sociedad es una tarea difícil. Algunos costos en principio pueden ser cuantificados, pero otros suponen bienes sin mercado y dependen sobre juicios altamente polémicos, tal como el valor monetario de la vida humana. Los costos de las externalidades pueden ser sólo calculados sobre una base específica de la localidad, que actualmente es imposible debido a la escasez de información. Los mismos autores señalan que en su estudio (incorporando costos de externalidades en las medidas de productividad), desarrollaron rangos de costos para las externalidades a nivel nacional en los Estados Unidos porque esta información es más fácilmente obtenible. Examinaron costos de externalidades de pesticidas, fertilizantes y erosión del suelo y exploraron maneras en que estos pueden incorporarse en el análisis de productividad. Señalan que su metodología tendría que ser repetida para ser aplicada a otros países.

2.8 Productividad total de los factores

Rayner y Welham (1995), definen a la PTF como el cociente de un índice de producto agregado y un índice de insumo agregado. Asimismo, señalan que al construir un índice de la PTF, es posible determinar objetivamente la productividad del sistema a través del tiempo. El cociente de la PTF para un par de años, denotados por r y s está definido por:

$$\frac{PTF_s}{PTF_r} = \frac{Q_s/X_s}{Q_r/X_r} \quad \text{ó} \quad \ln \left[\frac{PTF_s}{PTF_r} \right] = \ln \left[\frac{Q_s}{Q_r} \right] - \ln \left[\frac{X_s}{X_r} \right]$$

Donde: Q_t es un índice de producto agregado en el año $t = r, s$.

X_t es un índice de insumo agregado en el año $t = r, s$.

Las funciones agregadoras Q_s y X_s más comunes son las siguientes. Si se obtienen del sistema m productos, cuyas cantidades sean $Q_{1s}, \dots, Q_{ms}$, con el uso de n insumos, cuyas cantidades sean $X_{1s}, \dots, X_{ns}$ en el año s , donde los precios unitarios de los productos sean $p_{1s}, \dots, p_{ms}$ y los precios unitarios de los insumos sean $w_{1s}, \dots, w_{ns}$, respectivamente, entonces

$$Q_s = \sum_{j=1}^m p_{js} Q_{js} \quad \text{y} \quad X_s = \sum_{i=1}^n w_{is} X_{is}$$

Cuando se comparan diferentes años, para que la comparación se realice sobre una misma base de precios, se utilizan los precios del año r , o los del año s , o un promedio de ambos en los dos años bajo contraste. Si en el año s se usan los precios del año r , se tienen funciones producto e insumo agregadas como sigue

$$Q_s(r) = \sum_{j=1}^m p_{jr} Q_{js} \quad \text{y} \quad X_s(r) = \sum_{i=1}^n w_{ir} X_{is}.$$

Traxler *et al.* (1995) señalan que la PTF es un indicador más informativo que las medidas de productividad parcial, tales como producto por unidad de tierra o producto por unidad de trabajo. La razón intuitiva del índice de la PTF es que puede ser interpretado como producto por unidad de insumo.

Rayner y Welham (1995) señalan que construir un índice de la PTF para un ensayo de producción de biomasa (sea forestal o agrícola) a largo plazo, permite evaluar la habilidad que el sistema de manejo tiene para mantener la productividad a través del tiempo. Para poder cuantificar la trayectoria a través del tiempo de la cambiante PTF promedio y evaluar la variabilidad, es necesario el ajuste de una tendencia al índice PTF, ayudados de modelos estadísticos. El índice de la PTF, consistirá de una tendencia que refleje los cambios por las condiciones cambiantes, de esta forma si se proporciona una serie de índices de la PTF, es posible el uso de métodos estadísticos para

estimar la tendencia y la variabilidad, esto a su vez ayudará a detectar cambios en la tendencia, principalmente aquellos negativos, y consecuentemente actuar en forma apropiada cuando sea necesario abatir el problema. Estos mismos autores indican que la construcción del índice de la PTF requiere el conocimiento de la forma de la función de producción (ya que depende de los insumos) para generar el índice agregado de los insumos. Suponiendo una forma específica de la función de producción y equilibrio competitivo en la producción conduce a una función agregadora específica expresada en términos de los precios y cantidades de los insumos. Para una discusión más completa de la correspondencia entre las formas funcionales específicas de la función de producción y la función agregadora apropiada para los insumos en la medición de la PTF bajo suposiciones de equilibrio competitivo ver (pagina 27 de Barnett *et al.* 1995)

2.8.1 Números índices

Rayner y Welham (1995) señalan que dados los requerimientos del conocimiento de la función de producción, se han ideado medidas mediante una forma funcional agregadora que corresponda a una forma funcional flexible para la función de producción. Indican que para evitar estos problemas con el enfoque de la función de producción para medir la PTF, una alternativa es apoyarse en un enfoque de números índices, en donde los números índices parten de considerar un proceso de producción simple, donde un solo producto (q) es producido de un solo insumo (x). Por ejemplo, si un sólo producto es

producido por un sólo insumo, para un par de años r y s ($r < s$), se tiene que el crecimiento de la productividad entre ese período es.

$$\frac{PTF_s}{PTF_r} = \frac{q_s/x_s}{q_r/x_r}$$

Donde, la tasa de crecimiento del producto entre r y s es q_s/q_r , y la tasa de crecimiento del insumo entre r y s es x_s/x_r . Si el crecimiento del producto excede al del insumo, entonces se dice que hay una mejoría en la productividad en el período de tiempo de r a s . En el caso de producto múltiple, e insumo múltiple, el cociente del producto es reemplazado por un índice de cantidad del producto Q_s/Q_r y el cociente del insumo por un índice de cantidad de insumo X_s/X_r , donde Q_s y Q_r (X_s y X_r) son números índices agregados sobre productos (insumos) individuales.

Los anteriores autores señalan que la construcción del índice del producto o insumo agregado requiere una selección de ponderaciones y la forma funcional específica para la función agregadora. Se utilizan precios relevantes para definir las ponderaciones en el enfoque económico para la medición en la productividad. En la situación usual donde los precios relativos de los productos o insumos cambian entre los períodos de tiempo r y s , es posible obtener índices diferentes, dependiendo del período base seleccionado para definir las ponderaciones a precios constantes (o ponderaciones derivadas de los precios). Las formas funcionales aritméticas y logarítmicas son formas

funcionales alternativas que pueden generar diferentes resultados de productividad. Ellos mismos señalan que los números índices aritméticos más usuales suponen que r es el período base ($r < s$):

$$\text{Laspeyres} = \frac{Q_s(r)/X_s(r)}{Q_r(r)/X_r(r)} = L_{rs}$$

el cual considera como ponderaciones a los precios del período r :

$$\text{Paasche} = \frac{Q_s(s)/X_s(s)}{Q_r(s)/X_r(s)} = P_{rs}$$

donde; ahora, se consideran como ponderaciones a los precios del período s . Aquí $Q_i(j)$ ($X_i(j)$) denota la función agregadora del producto (insumo) en el tiempo i calculado con los precios del tiempo j .

En general, los precios no se mueven proporcionalmente entre los períodos r y s , por tanto, promedios de los números índices L_{rs} y P_{rs} han sido propuestos, siendo el de Fisher el más ampliamente usado. El número índice agregado de Fisher está definido como:

$$\text{Fisher} = \frac{\left[\frac{Q_s(r)}{Q_r(r)} \frac{Q_s(s)}{Q_r(s)} \right]^{1/2}}{\left[\frac{X_s(r)}{X_r(r)} \frac{X_s(s)}{X_r(s)} \right]^{1/2}} = (L_{rs} P_{rs})^{1/2} = F_{rs}$$

es decir, la media geométrica de los números índices de Laspeyres y Paasche.

También señalan que la selección de un número índice particular está a menudo justificada con respecto a propiedades estadísticas y económicas. El enfoque estadístico evalúa sesgos de un índice particular en relación a pruebas estipuladas. De los números índices señalados anteriormente el de Fisher es usualmente superior en este aspecto a los otros (Diewer, 1989). El enfoque económico interpreta el crecimiento en la productividad, como un cambio en la función de producción subyacente. Para este enfoque se recomienda el índice de Tornqvist (Rayner y Welham, 1995) basado en la forma funcional logarítmica cuadrática. Para la construcción de números índices de producto/insumo agregado de cualquier forma, con el propósito de evaluar la tendencia a largo plazo de la PTF se requiere de una base de datos adecuada sobre productos producidos e insumos usados en el sistema que se trate (agrícola o forestal).

2.9 Importancia de la composición de especies, crecimiento y manejo de una masa forestal

Maini (1992) indica que desde el punto de vista ecológico, todos los bosques están compuestos por una amalgama de especies apoyadas en un sistema que les sirve de sostén y que tiene la capacidad de renovarse. La capacidad de un bosque para producir, es una función del número de especies y del número de individuos por especie que crecen en el, así como de la fertilidad del suelo y del clima. La capacidad que presenta un bosque para renovarse esta dado

por la diversidad de las especies y el grado en que sea intervenido o afectado. Los bosques son un rico depósito del patrimonio genético del planeta, es importante señalar que dada la importancia que estos tienen es necesario mantener la diversidad de especies para así mantener todas las posibilidades futuras de diversidad genética.

Raymund (1991) señala que en los bosques actualmente se está dando un énfasis bastante amplio a la composición, distribución y crecimiento de los árboles en el bosque, y está dado porque de esto depende principalmente su desarrollo, subsistencia y valor, esto a su vez depende en gran medida del tratamiento silvícola aplicado por un determinado periodo de tiempo. Generalmente en todo tratamiento silvícola el *principal objetivo* es la prioridad de ciertas especies de interés favorecidas por el tratamiento silvícola, sobre otras de menor interés, así como, regular el espaciamiento y la densidad de la masa, eliminar los árboles débiles o enfermos (mal formados), y fertilizar el suelo para aumentar las tasas de crecimiento.

Raymund (1991), señala también que una de las principales metas de la silvicultura es una predicción exacta del crecimiento forestal, pero actualmente no sólo es una meta, si no que se ha convertido en una preocupación, de acuerdo a las adversidades que actualmente se presentan. Para una predicción exacta del crecimiento sostenido del bosque es necesario conocer los factores y condiciones que estén siendo la principal limitante para el

desarrollo óptimo y sostenido de la masa forestal de que se trate, por tal razón es necesario un método moderno de predicción del crecimiento con un enfoque radicalmente diferente al utilizado en años anteriores. Generalmente se menciona que el primer paso para construir un modelo de crecimiento forestal es definir claramente las variables básicas y la interacción que se piensa existe. Comúnmente se expresa de la siguiente forma:

$$\text{Crecimiento} = f(\text{edad, calidad de estación y competencia})$$

La simulación del crecimiento no es una ciencia exacta, porque el crecimiento no obedece a simples leyes naturales. Dado lo anterior, el crecimiento y productividad sostenida de un sistema forestal claramente se encuentran influenciados por muchos factores y condiciones naturales del mismo, así es necesario iniciar una tarea de trabajo de investigación continua para lograr los objetivos propuestos en un manejo silvícola sustentable.

III METODOLOGIA

El presente trabajo se realizó con apoyo de la bibliografía más reciente sobre aspectos de sustentabilidad agropecuaria y forestal. Los trabajos en este sentido no son muy amplios, sobre todo para cuestiones forestales, sin embargo nos aportaron los suficientes elementos para construir una serie de índices con el propósito de medir la no sustentabilidad de un sistema forestal. La construcción de los índices se hizo de tal forma que puedan ser utilizados ya sea con un mínimo o con un amplio nivel de información sobre el sistema que se desee evaluar.

3.1 Aspectos considerados de la sustentabilidad

3.1.1 Espacio

3.1.1.1 Nivel.

Los índices propuestos son de una aplicación extensa en diferentes sistemas forestales con el ajuste correspondiente, ya que se han construido para aplicarse a nivel de un bosque independientemente de las especies, excepto que ellas deben ser de interés para el manejador del mismo.

3.1.1.2 Sistema.

La propuesta que se presenta no considera un sistema particular de manejo forestal o un conjunto de ellos. En su lugar se considera que el sistema de manejo que en ese bosque se siga, será evaluado a través de los índices propuestos para determinar su posible sustentabilidad o no, de acuerdo al criterio considerado para ello, pero un aspecto relevante es el que las medidas desarrolladas son para bosques ya establecidos que no estén en sus primeras etapas de crecimiento (cuyas tasas de crecimiento estén por encima de las iniciales para el establecimiento), de modo que las variaciones abruptas en los índices para medir sustentabilidad (principalmente declinaciones) sean acreditables a cambios en los elementos operacionales y variables físicas y no a la variabilidad propia del crecimiento del bosque.

3.1.2 Tiempo

Para los bosques, en particular, el horizonte de tiempo de estudio puede estar determinado por un número de veces el turno silvícola o técnico, (diferente al turno económico y biológico o físico) que se haya asignado a ese bosque, entendiendo por turno, el período completo de vida que se le asigna a un bosque para que cumpla un fin específico. Este número de veces será menor en especies de lento crecimiento que en especies de rápido crecimiento. Por ejemplo, para las primeras se puede pensar en un turno de 60 años y un

horizonte de tiempo de estudio para su sustentabilidad de dos veces su turno; para las segundas, con turno de 10 años podemos pensar en un horizonte de sustentabilidad de 5 a 7 veces su turno.

3.1.3 Dimensiones

En cuanto a las dimensiones biológica, económica y social, en el estudio presente se ha considerado a la primera como de mayor importancia pues se optó por un enfoque ecológico donde al bosque se le contempla como un valor de uso y no como un valor de cambio, por las dificultades que éste tiene. Como señala Gow (1992), los bosques pueden contribuir de manera óptima a la solución de los problemas de degradación del medio ambiente, gracias a las funciones de los árboles en la conservación de la naturaleza. Lo que indica que, en la actualidad la presencia de los bosques tiene un valor mayor con respecto a los productos maderables que pueden ser obtenidos y derivados de éste.

La dimensión económica es considerada indirectamente, ya que para la construcción de los índices se considera la biomasa producida por el bosque al establecer una condición ideal del mismo o a través del método de manejo utilizado.

La dimensión social estará considerada sólo en términos de los beneficios que el bosque proporcione a la población cercana a éste y aquellos que

incidan en el medio ambiente, partiendo de la idea de que para sostener el caudal básico de recursos naturales es preciso proceder de manera que beneficie a la población local. Se ha hecho esta consideración dado que las ciencias forestales pueden contribuir de manera óptima a la solución de los problemas de degradación del medio ambiente y de la falta de recursos económicos en el medio rural.

3.2 Criterios técnicos que se siguieron para generar medidas e índices para evaluar la sustentabilidad

Se ha hecho uso de las ideas de la productividad que la economía ha desarrollado a través de sus índices, las de equilibrio ecológico que la biología ha estudiado en las relaciones benefactor-beneficiario, y las de clases que la silvicultura utiliza para agrupar individuos con base en alguna característica sobre la formación de biomasa, principalmente producción de fibra de madera si se habla de árboles. Para evaluar la posible sustentabilidad en plantaciones la metodología a usar es la utilizada en los sistemas agrícolas, pues esencialmente se les puede considerar como cultivos a mediano plazo; para el caso específico de bosques o selvas, dado que la actividad silvícola es reducida, se puede seguir otro enfoque el cual es de interés para este estudio. Se han desarrollado una serie de índices para medir la biomasa producida en un determinado tiempo para poder compararla con la de otro período.

3.3 Principales indicadores para intervenir en un bosque

Se presume que el manejador de un bosque; cuando éste asegura que la productividad de la biomasa de un bosque se está deteriorando por determinadas prácticas o impactos naturales y sociales, declara indirectamente que dicho sistema no es sustentable bajo esas circunstancias. Indirectamente, también, reconoce cómo debe ser el bosque bajo referencia, aunque sea de manera aproximada, a través de cierta información sobre el mismo que él proporcione.

3.4 Información requerida al manejador del bosque

Una primer alternativa para construir las medidas y evaluar el comportamiento de un bosque, consiste que el manejador, según su conocimiento derivado de las experiencias como silvicultor del mismo, nombre las especies (vegetales y animales si se considera fauna) que idealmente deben estar y el número de individuos de cada una de ellas; en otras palabras, se espera que el manejador proporcione el vector $\mathbf{f}'_0 = (f_{10}, f_{20}, \dots, f_{s0})$ (el apóstrofo en $\mathbf{f}_0$ representa la transposición matricial), donde f_{i0} es el número total esperado de individuos por unidad de área (árboles/ha), de la especie $i=1,2,\dots,s$ y s representa el número total de especies deseables para estar en el bosque. Esta información es considerada como el punto de partida para la construcción de los índices, ya que el número total de especies deseables en el

bosque determinará la diversidad ecológica que en el futuro asegure un potencial genético necesario para poder conservar el equilibrio en el sistema, indispensable para su sustentabilidad. Ciertamente a mayor número de especies (s), mayor diversidad, pero menor cantidad de los recursos indispensables para cada especie. Los especialistas conocen con mucho detalle este tipo de relación en el bosque (número de especies y número de individuos por especie por unidad de área), por eso se espera que proporcionen el vector f_0 . Existe otra posibilidad, a través de métodos estadísticos, para obtener f_0 , para lo cual, es necesario contar con un bosque modelo o representativo del lugar que proporcione información sobre el vector f_0 .

Una segunda alternativa que se propone en este trabajo, como mínimo deseable, es que el experto en el manejo del bosque proporcione las s especies de interés que deben estar en el bosque, y una variable seleccionada, de modo que, multiplicada por el número de individuos por especie, resulte en un valor aproximado de la biomasa producida por ella.

Para la tercer alternativa propuesta, se requiere que el silvicultor nombre las s especies y el número de individuos que deben estar en el bosque dada la condición ideal establecida para éste, así como también deberá nombrar una variable que mida en forma representativa la biomasa producida por las especies que componen el bosque en estudio.

Las opciones que se presentan en estas tres alternativas son, en lugar de usar los totales esperados por cada especie sea vegetal o animal, usar la distribución de este total en base a alguna variable de interés, que puede ser definida en función, de como se represente mejor la distribución de los individuos en el campo, (es decir, para vegetales pueden ser categorías diamétricas o de altura y para especies animales, pueden ser categorías de peso, edad o tamaño también, será posible usar en lugar de una misma importancia para todas las especies, asignar diferentes importancia para cada una de ellas, mediante valores positivos en el intervalo de (0,1), el que será dado por el silvicultor de acuerdo a la importancia que ésta tenga en el bosque.

3.5 Actividades de campo necesarias

3.5.1 Selección del área de estudio

El silvicultor deberá determinar el área de estudio en el bosque, haciendo uso de fotografías aéreas, ya que éstas le proporcionarán detalles del bosque de manera similar a la de un mapa detallado, delimitando el área con sus puntos cardinales correspondientes. El tamaño de la superficie se dejará a criterio del silvicultor de acuerdo a los principios dasonómicos que se usan.

3.5.2 Distribución de los sitios

Los sitios deberán colocarse uniformemente a lo largo y ancho de la superficie de estudio de manera que representen objetivamente las condiciones del bosque. Se puede pensar en un muestreo dirigido cuyas parcelas tengan el arbolado promedio que está en el área de estudio.

3.5.3 Número de sitios

El número de sitios quedará determinado por el área de estudio, cuidando que por cada 100 hectáreas al menos se tenga una hectárea representativa de las 100 hectáreas en donde se realizarán las mediciones. Por supuesto, la intensidad de muestreo estará dada en términos del tamaño del bosque. La recomendación de una hectárea por cada 100 hectáreas de bosque puede ocuparse para bosques entre 500 y 1000 ha. Para bosques mayores se puede usar una menor intensidad de muestra así como para bosques más pequeños una mayor intensidad. Sobre esto también se pueden seguir los lineamientos ya establecidos para inventarios forestales en bosques mexicanos que recomiendan una intensidad del 5 al 7%.

3.5.4 Dimensión de los sitios

La dimensión estará dada por el número de sitios que se deban muestrear en cada 100 hectáreas de manera que al menos se tenga una hectárea de

medición. Por ejemplo, si se usan sitios de 0.1 ha al menos se requieren 10 por cada 100 hectáreas distribuidos sobre éstas de modo que lo medido sea representativo de esta superficie.

3.5.5 Tipo de sitios de muestreo

Los sitios serán de tipo permanente, los cuales quedarán fijos definidos por una mojonera de cemento en el centro del mismo, delimitando cada sitio por una marca en cada árbol que consistirá en colocar en sentido de las manecillas del reloj una lamina de aluminio a cada árbol con el número de árbol y una clave correspondiente a la especie, esto será en aquellos árboles con diámetros mayores de 10 cm.

3.5.6 Seguimiento e intervalos de evaluación

El seguimiento en la masa forestal será del número de individuos de cada especie y clases, si es necesario, que se encuentren en ese momento en los sitios de muestreo, del número de individuos presentes por especie se sacará un promedio sobre todos los sitios para cada especie considerada en el estudio, que será usado en las fórmulas propuestas. También cuando se hagan mediciones de variables que se refieran a la acumulación de biomasa (altura, diámetro, etc) éstas se harán sobre cada uno de los árboles de los sitios de muestreo, obteniendo un promedio de estas variables para todos los sitios de

cada una de las especies y clases si existen. También se hará el seguimiento de los elementos operacionales y variables físicas más relevantes para ese bosque, el que se hará por sitio. Los intervalos de evaluación se harán de acuerdo al criterio del silvicultor según las especies presentes, los cuales es mejor que sean igualmente espaciados. En caso de fauna se harían estimaciones por medio de capturas, las cuales serían menos precisas que las obtenidas en árboles.

3.6 Metodología propuesta para un bosque con una condición ideal sin manejo (*primera alternativa*)

En condiciones estrictamente naturales, el bosque es un sistema viviente que se caracteriza por una compleja interacción de diversas especies de plantas y animales con el ambiente físico. Por lo general, el bosque es un sistema autoperpetuante que no requiere manejo, aunque pueden ocurrir cambios cíclicos de forma natural. Los árboles son mecanismos extraordinarios de la naturaleza, su crecimiento y desarrollo están influenciados por factores ambientales, como suelo, agua, nutrientes, temperatura, humedad, fuerzas mecánicas, luz solar, influencia de insectos y enfermedades, que el sistema controla en forma natural, manteniendo el equilibrio. La comunidad forestal se debe considerar como una estructura dinámica que responde a las leyes de causa y efecto, en donde todos los organismos están estrechamente relacionados de manera que forman un ecosistema armónico. Aún cuando en

un bosque natural ocurre lo antes señalado por influencia única de la naturaleza, es necesario hacer una evaluación del comportamiento natural que representa en su composición (principalmente en el número de individuos por especie y quizá también por clase), para ello es necesario que el experto y conocedor del bosque proporcione cierta información de la masa forestal de su interés, basada en su conocimiento y comprensión del ecosistema y señale con cierto grado de certidumbre lo que él esperaría de ese bosque sin su intervención, dejando que sea conducido sólo por la naturaleza. Aunque esta situación no es la esperada por el manejador, y de ahí que se le denomine ideal sin manejo, sí proporciona un marco simple de referencia inicial para evaluar el conocimiento que se tiene del bosque, con respecto al cual se puede medir la condición del mismo en cualquier momento. Posteriormente se pasará de esta condición ideal sin manejo a otra más objetiva.

Posición del silvicultor

Se le considera al silvicultor como conocedor del bosque (en sus diferentes etapas), capaz de emitir ciertos criterios acerca del crecimiento del bosque en forma natural, de modo que al hacer éste uso de su conocimiento está apto para configurar una condición ideal en el bosque y evaluarla mediante un análisis real en el desarrollo de la composición y distribución de las especies en el mismo. Cabe señalar que el silvicultor con el conocimiento que posee de los bosques de su interés esta en posibilidades de proyectar en una

determinada superficie forestal, lo que él espera obtener del bosque en un determinado tiempo, así como también lo que el bosque debe tener y requiere para su recuperación. Lo referente a estas secciones sólo servirá como base y principio para el desarrollo de las demás secciones en las siguientes alternativas donde el silvicultor no sólo operará como observador del bosque sino actuará dando cierto manejo a la masa forestal.

3.6.1 Número total de árboles por especie

3.6.1.1 Número total de árboles por especie con la misma importancia para cada una de ellas.

En este caso el silvicultor, indicará únicamente el número de especies en el bosque, digamos s , y el número total de árboles por hectárea de cada especie en el vector f'_0 . Siendo una condición sin manejo la información a recabar es la mínima, por ello sólo se requieren los totales de árboles por hectárea de cada una de las especies que se consideran. También, porque se desea, con esta mínima información, introducir la forma en que los índices que se presentaran serán construidos. Note que se ha dado una misma importancia a todas las especies pues no se han incluido pesos que las diferencien.

Formas de evaluación

1).- Para evaluar y determinar si ese bosque no está siendo sustentable en esas condiciones, se hace necesario una comparación de los resultados que el

silvicultor ha obtenido de su seguimiento durante un cierto período de tiempo y los ideales propuestos por él. Esto permitirá ver el comportamiento real del mismo, ya que a medida que el bosque no presente los resultados ideales del silvicultor y sean estos más desfavorables, habrá una mayor lejanía entre las dos condiciones, en esta situación se dirá que el sistema ideal no está siendo sustentable. De forma contraria si el seguimiento del bosque muestra que el número de árboles por especie es cada vez más similar al ideal del silvicultor, la diferencia entre las dos condiciones (ideal y real) será cada vez menor y se podría pensar que la condición del bosque está siendo sustentable, ya que se encuentra cerca de los valores dados por la condición ideal del silvicultor, y no se tienen evidencias de que se comporte en forma diferente a la esperada.

2).- Otra alternativa de dar seguimiento al comportamiento del bosque a través del tiempo con respecto a una condición ideal es la siguiente. Si se hacen mediciones en los tiempos r y s ($r > s$) y se evalúa que tan distante está el bosque de su condición ideal en ambos tiempos r y s , entonces se pueden comparar estas dos distancias y, si la distancia en r es más pequeña que la distancia en s el bosque estará tendiendo hacia la condición ideal, si ambas distancias son iguales en los períodos de tiempo s y r , entonces no hubo cambios en el bosque y si la distancia en r es mayor que la distancia en s el bosque se estará alejando de la condición buscada. Esto permite que el silvicultor se de cuenta que tan verídico es su criterio para evaluar un bosque y la sustentabilidad de su conocimiento sobre el mismo.

3.6.1.2 Número total de árboles por especie con diferente importancia para cada una de ellas.

En esta sección al igual que la anterior se requiere que el experto en el manejo del bosque proporcione el número de especies digamos s , en el bosque, el número de árboles promedio por hectárea de cada especie y agregue un valor en orden de importancia para cada especie de su condición ideal, es decir, asignará valores positivos en el intervalo de $(0,1)$ a cada una. Se darán los valores más grandes a la especie que el considere más importante en su condición ideal, que pueden ser de acuerdo al número de individuos que es considerado como ideal para ese bosque y siguiendo de ese modo en forma descendente conforme sean menos importantes las especies, esto será según el conocimiento que él tenga de la masa forestal en observación, para así construir un vector que represente estos valores, *i.e.*, $\mathbf{p}' = (p_1, p_2, \dots, p_s)$. Los valores que se asignen a la condición ideal serán constantes para las especies a través del tiempo, pues no sería común que la importancia de una especie cambiará en un lapso de tiempo razonable.

Las razones de asignar pesos a las especies en esta condición ideal sin manejo se hará en bosques sin manejo al conocerse éste y saber qué especies son más representativas del mismo y se deseen proteger, tal es el caso, cuando se pretende conservar un nicho ecológico especial. Para el caso en que se dé manejo al bosque, como se presenta más adelante, principalmente

se dará un valor mayor a las especies comerciales de interés productoras de madera, resinas, frutos, corteza, aceites, celulosa muerta, etc., así como aquellas que se les considera protectoras (de plagas, enfermedades y ataque de roedores) de las especies maderables, así como también las de rápido crecimiento si se desea favorecerlas.

Formas de evaluación

1).- Para este caso la forma de evaluación será igual que en el inciso uno de las formas de evaluación de la sección (3.6.1.1), con los resultados modificados por las importancias asignadas a las especies. Para evaluar y determinar si ese bosque está siendo o no sustentable el criterio será el mismo que el dado en la sección señalada. Cabe mencionar que cuando se dé una ponderación (p_i) mayor a una determinada especie, más afectará la desviación o diferencia que se presente entre la condición ideal ponderada del silvicultor y la real del bosque, por tal razón se debe ser muy cuidadoso al asignar valores a las especies, estos se deberán dar según la importancia que cada especie en forma natural tenga en el bosque, ya que, la conducta de los resultados va estar definida por estos pesos.

2).- Del mismo modo que en las formas de evaluación de la sección (3.6.1.1), inciso dos, para este caso existe otra alternativa de evaluación sólo que aquí nuevamente los resultados estarán modificados por las importancias asignadas a las especies. Si se hacen mediciones en los tiempos r y s ($r > s$) y

se evalúa que tan distante está el bosque de su condición ponderada ideal en ambos tiempos r y s entonces se pueden comparar estas dos distancias; si la distancia en r es menor que la distancia en s , el bosque estará tendiendo hacia la condición ideal, si ambas distancias son iguales los períodos de tiempo s y r , se tiene que no hubo cambios en el bosque y si la distancia en r es mayor que la distancia en s el bosque se está alejando de la condición ideal mostrando la no sustentabilidad del mismo para la condición dada, ya que evidentemente se está comportando en forma diferente a la esperada. Esto le permite al silvicultor analizar su criterio o buscar las razones por las cuales el bosque no va a la condición ideal.

3.6.2 Distribución del número total de árboles por especie

En esta sección, además de contar con el número total esperado de individuos por hectárea de cada una de las especies a considerar en el bosque, también se deberá contar con la distribución de una variable de interés medida sobre los individuos, de la especie; es decir, no sólo se cuenta con el total de los individuos, sino también con la distribución de una variable de éstos, que proporcione información sobre la mejor disposición de ellos en el campo. Por ejemplo, en especies maderables se puede pensar en la distribución diamétrica o de alturas; para las no maderables, en la distribución de los diámetros de copa (que será dada según las clases de copa que se encuentren en el bosque); y si se considera la fauna, se requerirá la

distribución de los pesos de las especies consideradas. Se pueden tener, a criterio del silvicultor, las distribuciones de otras variables que caractericen mejor a la especie que es considerada según sea su papel en el bosque.

Las distribuciones de las variables serán manejadas como frecuentemente se hace en la silvicultura para el manejo de un bosque, particionando el rango de los valores de la variable en k intervalos de clase y dando el número esperado de individuos por hectárea por clase. No todas las categorías serán las mismas para todas las especies, pero sí el número de ellas. Una vez dada la información anterior, se determinará la importancia para cada especie y clase si es que se desea agregar esta información.

3.6.2.1 Para un bosque con igual importancia para cada especie y clase.

En esta sección se considera la misma importancia para todas las clases de todas las especies que se considera componen la biomasa del bosque.

Formas de evaluación.

La evaluación será igual que la parte uno y dos de formas de evaluación de la sección (3.6.1.1), sólo que aquí la comparación será con relación a las distribuciones ideales de las s especies consideradas por el silvicultor y las distribuciones de las s especies que se tienen en el bosque real. De los resultados obtenidos en campo se sacará un promedio por clase y especie para cada una de ellas, y se hará una comparación con el número esperado de

individuos por hectárea en cada clase de cada especie, mediante el uso de las fórmulas que se proponen en este trabajo en la sección (4.1.2.1), de modo que, si la diferencia que resulte en la comparación es grande, se dirá, según las distribuciones por especie propuestas por el experto, que esa masa no se conduce a la condición ideal y por ende no es sustentable. De igual forma, puede ocurrir si se hace la comparación de los resultados en diferentes periodos; para mayor detalle, véase el inciso dos de formas de evaluación de la sección (3.6.1.1), sin olvidar que aquí la comparación se hace en relación a la distribución de los individuos (por categoría diamétrica, altura, diámetro de copa, o peso, edad, tamaño, según sea el caso). Esto permitirá ver el comportamiento de las distribuciones de las especies en la masa real, para definir si se muestran evidencias de no sustentabilidad o de posible sustentabilidad, o si el criterio del silvicultor al considerar distribuciones es aceptable.

3.6.2.2 Para un bosque con diferente importancia para cada especie y clase.

En la sección anterior se ha considerado una misma importancia por especie y clase, sin embargo puede haber razones para asignar diferente importancia o ponderación, como se presenta en esta sección, en la que a cada clase de cada especie el experto asignará un valor en orden de importancia sobre la condición ideal que él ha establecido, es decir dará valores positivos en el

intervalo de (0,1) a cada clase de cada especie, dando los valores más grandes a aquellas clases de cada especie que él considere más importantes, y así en forma descendente a las clases que considere menos importantes.

Formas de evaluación.

La evaluación será igual que en las formas de evaluación de la sección (3.6.2.1), es decir, se compararán con las distribuciones ideales de las *s* especies consideradas por el silvicultor con las distribuciones de las *s* especies que se tienen en el bosque, o los resultados de dos periodos consecutivos, obtenidos al comparar la condición real del bosque con la ideal del silvicultor, pero aquí las comparaciones estarán modificadas por la importancia asignada a cada clase de cada especie. Como se ha mencionado, al dar una mayor importancia a una clase, mayor será el efecto en la desviación que se presente entre la condición ideal del silvicultor y la real del bosque para esa clase. Los resultados que se obtengan permitirán al silvicultor ser más cuidadoso al determinar la importancia para cada clase por especie en su condición ideal de comparación o determinar las causas que estén ocasionando cualquier desviación de la condición ideal según sea el caso, ya que los resultados están definidos por estos pesos o ponderaciones, cambios en el recurso base del sistema forestal y condiciones de manejo del mismo. De esta forma se evaluará el desarrollo del bosque por un lado o el criterio del silvicultor para asignar valores a las categorías o clases por especie por otro.

3.7 Metodología propuesta para un bosque sin condición ideal y con manejo (*segunda alternativa*)

Los usos múltiples de los bosques, han dado lugar a una amplia gama de prácticas de evaluación de sus recursos. Actualmente hay una creciente necesidad de evaluar las condiciones del bosque, como densidad de los árboles y calidad del sitio. Se hacen cada vez más necesarios los estudios con un enfoque analítico, que es dado por el interés en las características individuales de los bosques y el cómo se relacionan con una amplia gama de usos finales. Usualmente se utilizan los estudios de medición repetida que permiten evaluar la eficiencia del manejo, y son la base para regular a los bosques a lo largo del tiempo.

En esta sección se requiere que el experto en el manejo del bosque proporcione las s especies que preferentemente deben estar en el bosque y una variable que multiplicada por el número de individuos de la misma resulte en un valor aproximado de la biomasa producida por ella, esta variable puede variar según el criterio del experto. Para especies maderables que compongan la masa forestal en estudio se puede pensar en la media de la variable combinada del diámetro normal y la altura total (D^2H) (D : diámetro normal, H : altura total) por ser proporcional al volumen del fuste y en especies no maderables una posible variable sería la media del diámetro de copa (DC) al cuadrado (DC)² por ser proporcional al área proyectada por ésta. Si en el

sistema forestal se consideran especies animales se podría usar para estas la variable peso. Se puede trabajar con el número total de árboles por hectárea por especie o la distribución de alguna variable de interés de este número total para cada especie y en cada una de estas modalidades se puede asignar igual o diferente importancia a las especies o clases y especies. Por supuesto, en esta alternativa el manejador realizará las prácticas que considere adecuadas para la optimización de la productividad del bosque, los cambios que las prácticas involucren en la composición y distribución de las especies deberán ser incorporados a los índices que se construyan para medir el desarrollo del mismo, de modo que los índices puedan ser comparados.

Posición del silvicultor

Se le considera al silvicultor como la única persona capacitada y con criterio para determinar y aplicar los tratamientos silvícolas más apropiados para el desarrollo de las especies que componen la masa forestal, como también capaz de nombrar parámetros o variables que son las más apropiadas para representar en mejor forma la producción o incrementos de volumen que el bosque manifieste, así como la mejor distribución en el mismo. En este caso el silvicultor no sólo operará como un observador sino que actuará en el mismo aplicando sus técnicas y al mismo tiempo evaluará su criterio para determinar estas técnicas.

3.7.1 Número total de árboles por especie

3.7.1.1 Número total de árboles por especie con la misma importancia para cada una de ellas.

En este caso el silvicultor considera a todas las especies que componen la masa forestal de su interés con la misma importancia. Se requiere que el silvicultor nombre las s especies igualmente importantes y determine en el bosque el número total de individuos por especie por hectárea que estén en él (en cada tiempo de medición r), con la que será posible construir el vector $\mathbf{f}'_r = (f_{1r}, f_{2r}, \dots, f_{sr})$. También deberá medir la variable que él consideró representativa para el cálculo de la aproximación de la biomasa producida por la especie como se señaló antes. Los valores promedio de la variable medida en el tiempo r de las s especies proporciona el vector de medias $\mathbf{m}_r = (m_{1r}, \dots, m_{sr})'$. Con estos vectores se puede obtener una estimación de la biomasa producida por hectárea por especie en cada tiempo de medición r .

Formas de evaluación.

1).- Para determinar si la masa forestal no esta siendo sustentable bajo los criterios técnicos de manejo y de evaluación aplicados, se hace necesario que una vez definido por el silvicultor el número de especies, estimado el número total de individuos por especie por hectárea y el valor medio de la variable que mide la biomasa, en un tiempo de medición r , se multiplique este valor medio

por el número de individuos de cada especie por hectárea y se obtenga un promedio de la biomasa producida por especie para el tiempo de medición r . La suma de éstas determina el tamaño de éste en el tiempo r ; posteriormente se harán otras mediciones para estimar el tamaño de éste para otro tiempo, siguiendo la metodología ya indicada, de tal forma que será posible comparar el tamaño en los diferentes tiempos. Si el tamaño del bosque en cada evaluación se muestra mayor o estable en relación a la anterior, indica que ese bosque probablemente sea sustentable en esas condiciones y manejo, de forma contraria, si en cada evaluación la producción de biomasa se muestra en deterioro señala la no sustentabilidad del sistema, esto implica la evaluación de otros aspectos, con la finalidad de clarificar las posibles causas de esta tendencia decreciente.

2).- Otra alternativa de evaluación es hacer una comparación a través de un cociente de los resultados del tamaño del bosque en el periodo t entre el tamaño del bosque en el periodo r con $r < t$ periodos consecutivos, de modo que, al no ocurrir ningún impacto negativo (tales como incendios, ataque de plagas, o tala clandestina, etc.) significativo o intervenciones (como aclareos mayores, podas y cortas de saneamiento etc.) fuertes durante estos periodos, los resultados se espera se comporten como una función monótona creciente, y probablemente el comportamiento del bosque tienda a ser sustentable. Otra forma de comparar los tamaños del bosque en todos los periodos con respecto a un tiempo base. Los resultados obtenidos le permiten al silvicultor analizar

las técnicas de manejo, criterios de evaluación, así como la necesidad de incluir otras características y condiciones naturales del bosque principalmente cuando las comparaciones a través del cociente sigan una tendencia decreciente.

3.7.1.2 Número total de árboles por especie con diferente importancia para cada una de ellas.

En esta sección se considera que a cada especie generadora de bienes y servicios, nombrada por el silvicultor, que compone la masa forestal, se le asigna un valor diferente según la importancia que cada una represente en el bosque; los valores como se ha hecho antes, serán dados dentro de un rango de (0,1), dando un mayor valor a aquellas más importantes, así sucesivamente en forma descendente hasta la considerada menos importante.

Formas de evaluación.

La evaluación será igual que en el inciso uno (comparación entre tamaños del bosque en diferentes periodos) e inciso dos (comparación entre cocientes de tamaños de dos periodos consecutivos) de las formas de evaluación de la sección (3.7.1.1), con los resultados modificados por las importancias asignadas a cada especie como se señaló antes. Para evaluar y determinar si ese bosque esta siendo o no sustentable, el criterio será el mismo que el dado

en la sección ya señalada. Cuando se dé un valor mayor a una determinada especie, mayor será el efecto que este tenga en el resultado final, por tal razón, el valor dado a cada especie deberá ser lo más real posible ya que puede modificar los resultados verdaderos del tamaño del bosque, generando consecuencias para el mismo en el seguimiento del manejo dado.

3.7.2 Distribución del número total de árboles por especie

3.7.2.1 Para un bosque con igual importancia para cada especie y clase.

En esta sección además de contar con las s especies de interés, el silvicultor deberá estimar la variable que el consideró representativa para medir la biomasa producida por especie por hectárea en el bosque; además de esa información deberá estimar la distribución de una variable medida sobre los individuos de la especie, es decir, no sólo deberá estimar el número de individuos por especie, sino la distribución de una variable de éstos, que genere información sobre la disposición de ellos en el campo, esto dependerá del tipo de especies de interés que se consideren en el bosque, en caso de incluir fauna también se consideraría la distribución de una variable en categorías de peso, edad o tamaño, esto dependerá de la especie animal que se desee evaluar. Cabe señalar que la selección de esta variable será dada según caracterice mejor a la especie en cuenta a su disposición en el bosque. Las distribuciones de la variable seleccionada serán manejadas como se hace

en silvicultura, particionando el rango de los valores de éstas en k intervalos de clase y estimando el número total de individuos por hectárea por clase. En esta sección se piensa que se ha asignado la misma importancia a todas las clases de todas las especies.

Formas de evaluación.

La evaluación es igual que las formas de evaluación presentadas en la sección (3.7.1.1), sólo que aquí la comparación de los tamaños del bosque será en relación a las distribuciones estimadas de los individuos de cada especie. De las estimaciones obtenidas en campo se sacará un promedio por clase y especie, el cual será utilizado en las fórmulas propuestas en la sección (4.2.2.1) inciso a, para medir el tamaño total del bosque en diferentes periodos de evaluación, y poder así hacer comparaciones. De este modo se determinará si la biomasa del bosque se esta incrementando y tiende a cumplir los criterios de la sustentabilidad. Haciendo uso de la fórmula del inciso c de la misma sección será posible comparar tamaños del bosque entre los años sucesivos t y r con $t > r$ y medir la tendencia en incremento de la biomasa del bosque para estos años. Esto permitirá buscar causas de decrementos en el crecimiento de la biomasa cuando esto ocurra.

3.7.2.2 Para un bosque con diferente importancia para cada especie y clase.

Puede haber razones para asignar diferente importancia a cada clase de cada especie como se presenta en esta sección, donde el silvicultor, dará un valor a cada clase de cada especie en un orden de mayor a menor importancia dentro del intervalo (0,1).

Formas de evaluación.

La forma de evaluación será siguiendo la misma metodología de las secciones antes señaladas referentes a bosques sin condición ideal, sólo que aquí los resultados obtenidos de la comparación de los tamaños del bosque en relación a las distribuciones estimadas de los individuos de cada especie que serán utilizados para medir el tamaño total del bosque en diferentes periodos de evaluación, así como también la comparación de tamaños del bosque entre dos diferentes periodos sucesivos, estarán modificados por los pesos dados a cada clase de cada especie, de acuerdo a la asignación hecha por el silvicultor, pero con un efecto favorable o desfavorable en dichos resultados, según sea su sustentabilidad. Como se ha manejado durante el desarrollo metodológico de las diferentes secciones, esta alternativa permitirá evaluar el criterio del silvicultor al asignar valores de importancia a las clases de cada especie así como el sistema de manejo que tenga el bosque. También al

decrecer las medidas del tamaño de éste obligará a buscar las causas que lo están provocando para determinar su posible solución.

3.8 Metodología propuesta para un bosque con una condición ideal y manejo (*tercera alternativa*)

Los ecosistemas forestales están estructurados de manera tal que, en forma natural son capaces de sostenerse productivos en el tiempo. Actualmente la creciente demanda de sus productos ha dado origen al desarrollo forestal de técnicas de manejo y ordenación de los mismos, para prevenir las consecuencias de los aprovechamientos masivos. Generalmente se utilizan los estudios de medición repetida que permiten evaluar la eficiencia del manejo y son base para regular a los bosques a lo largo del tiempo.

En esta sección se hace necesario que el silvicultor nombre las s especies que el considere ideal y el número promedio de individuos por hectárea para cada una de ellas; también proporcionará una variable que multiplicada por el número de individuos de la especie dé un valor aproximado de la biomasa producida por ésta. Como en las cuatro secciones anteriores se puede pensar para especies maderables en la media de la variable combinada del diámetro normal y altura total (D^2H) y en las no maderables la media del diámetro al cuadrado de copa (D^2C) según la posición que esta tenga en el bosque, y sí en el sistema se considera fauna se puede usar alguna variable que el silvicultor

considere más representativa de la formación de biomasa en los animales considerados, en general la selección de variables estará dada por el criterio del silvicultor.

En esta alternativa se considera que el manejo del bosque determinará el número promedio de individuos por especie por hectárea y que a través del tiempo se mantendrá este número promedio por medio de las diferentes practicas silvícolas que se realicen, tales como (cortas de liberación, de regeneración, de saneamiento, intermedias, de protección, de selección, limpias, podas, cortas de mejoramiento y recuperación) aunque, como es natural, habrá algunas variaciones alrededor de este promedio. Por tanto, en los cálculos de los índices de esta sección será posible usar el número promedio total de árboles por hectárea que el silvicultor considere ideal para cada especie o una estimación de este número siendo esta última opción la más indicada. Otra posibilidad será usar la distribución de alguna variable de interés para el silvicultor del número total de individuos por hectárea de cada especie. Para cada una de las modalidades será posible asignar iguales o diferentes importancias a las especies o clases y especies.

Posición del silvicultor

El silvicultor es considerado como la persona capacitada y conocedora del comportamiento de un bosque en sus diferentes etapas de desarrollo, capaz de

emitir los más aceptables criterios de manejo en el mismo. Según su conocimiento no sólo está capacitado para determinar el manejo de un bosque, sino que también puede definir una condición ideal, establecerla y mantenerla a través del tiempo. Dicha condición ideal resultante de algún criterio de optimalidad. Además, debe ser capaz de nombrar las variables más apropiadas para representar de mejor manera la producción de biomasa que el bosque manifieste, así como la distribución en el mismo. A diferencia de lo señalado en la primera alternativa, en este caso el silvicultor no será sólo observador del bosque, sino que establecerá la condición ideal en el mismo y operará sobre ella haciendo uso del manejo, con la finalidad de mantener la condición. Esto le ayudará a evaluar su conocimiento respecto al bosque, técnicas de manejo y de evaluación definidas por él, así como al mismo bosque en su comportamiento.

3.8.1 Número total de árboles por especie

3.8.1.1 Número total de árboles por especie con la misma importancia para cada una de ellas.

Una vez que el silvicultor ha establecido su condición ideal en la masa forestal de su interés, proporcionando las s especies, el número total promedio de individuos por hectárea para cada una y la variable definida para estimar la biomasa, deberá sacar por especie un promedio de esta variable de todos los árboles de todas las parcelas de medición, para determinar una estimación del

tamaño del bosque en cada periodo de tiempo estudiado. El silvicultor tratará de mantener su condición ideal en el bosque a través de manejo durante el periodo de tiempo que dure el estudio haciendo las evaluaciones periódicas conducentes; para medir la biomasa producida por especie, se estimara el número de individuos por cada especie, con la finalidad de facilitar la planeación en las técnicas de manejo del bosque y a su vez mantener una menor variación en el tamaño deseado del bosque (número de individuos), el cual sólo será una aproximación de éste.

Formas de evaluación

Para determinar si ese bosque esta siendo sustentable bajo las condiciones ya mencionadas, se hace necesario evaluarlo, utilizando las estimaciones o resultados obtenidos de la variable que mide biomasa en la condición ideal establecida en el bosque con una medición inicial y compararla con los obtenidos posteriormente en el seguimiento del bosque en el tiempo de evaluación establecido. El silvicultor ayudado de los tratamientos silvícolas, tratará de mantener con la menor variación la condición ideal dada por él. Esto le permitirá observar y evaluar la tendencia en el comportamiento del tamaño y composición del bosque. A medida que el tamaño del bosque se incremente posiblemente la condición ideal establecida en el bosque muestra algún indicio de sustentabilidad con las variables de medición definidas. Si en cada evaluación, aún cuando se mantenga al bosque en la condición ideal dado por el silvicultor y controlado por manejo, la producción de biomasa cada vez se

muestra en decremento, señala que el bosque bajo esas condiciones y tratamientos de manejo no es sustentable. Según sean los resultados que se obtengan deberán analizarse otros aspectos naturales del bosque que posiblemente estén influyendo desfavorablemente en él y que estén modificando las variables de medición y consecuentemente los resultados.

Otra forma de evaluar el comportamiento del tamaño del bosque a través del tiempo, ya establecida la condición ideal, es la siguiente. Si se hacen evaluaciones en los años sucesivos r y t ($r > t$) y se evalúa el tamaño bajo la condición ideal en el año r y el tamaño en el año s , entonces se pueden comparar estos resultados, haciendo uso de las fórmulas propuestas en la sección (4.2.1.1) de este trabajo. Si el resultado es igual o mayor que uno, se podría pensar que el sistema esta siendo sustentable, pero si es menor que uno, generando resultados que muestran una tendencia del sistema no sustentable, es señal de la necesidad de una mayor atención por parte del silvicultor en el manejo y tratamientos aplicados en la masa forestal, es decir, que el sistema bajo esas técnicas aplicadas no promete un futuro sostenible.

3.8.1.2 Número total de árboles por especie con diferente importancia para cada una de ellas.

Los bosques están compuestos por una gran variedad de especies que son capaces de producir bienes y servicios tangibles e intangibles, de las cuales unas son más importantes y representativas que otras, por tal razón en esta

sección el silvicultor dará un peso a cada una en el intervalo (0,1) en orden de mayor a menor según sea su importancia.

Formas de evaluación

La forma de evaluar las especies con diferente importancia dada una condición ideal y una variable que represente la biomasa producida por esa especie en el bosque, será igual que para especies de igual importancia bajo esas condiciones, sección (3.8.1.1), sólo que para este caso los resultados estarán modificados por los valores o pesos dados a cada especie de interés que compone el bosque, mediante el uso de las fórmulas de la sección (4.2.1.2) que se proponen para esta sección.

Como se ha señalado en las secciones de las diversas alternativas propuestas en este trabajo, es importante dar un valor apropiado a las especies (sea un valor económico, ecológico (de protección) y recreativo), cuidando las posibles consecuencias positivas o negativas que puede generar esta información cuando es dada.

Esto permitirá evaluar el crecimiento del bosque, así como también las técnicas que el silvicultor utiliza para definir, establecer y mantener en el bosque la condición ideal, que de acuerdo al conocimiento que él tiene de los bosques y en particular de la masa forestal en estudio, determina la

composición y densidad que éste debe tener. Asimismo esto permitirá evaluar el criterio y conocimientos que el silvicultor tiene para definir la variable biomasa, y las formas de medición de dicha variable. Finalmente será posible evaluar y mejorar, si es necesario, el criterio para asignar pesos a las diferentes especies que componen el bosque.

3.8.2 Distribución del número total de árboles por especie

3.8.2.1 Para un bosque con igual importancia para cada especie y clase.

Para este apartado se considera la misma importancia para todas las clases de todas las especies de interés.

En esta sección se deberá contar con el número ideal de las s especies en el bosque de interés para el silvicultor, se deberá estimar la variable considerada representativa para medir la biomasa producida en el bosque por los individuos de éstas; además se deberá contar con la distribución de una variable de interés medida sobre los individuos de la especie, es decir, que no sólo se cuente con el número ideal de s , y la variable que mida biomasa, sino con la distribución de una variable de éstos, que de información de la mejor disposición de los mismos en el campo, la cual dependerá según sea el propósito de la especie vegetal o animal en el campo. Como se ha señalado en las secciones anteriores, la selección de la variable será según represente o

caracterice mejor en disposición a la especie en el bosque. La distribución de la variable seleccionada se hará particionando el rango de los valores en k intervalos de clases, se dará el número esperado de individuos para cada especie y clase por hectárea, las existencias en el bosque se tratarán de ajustar a estos valores dados mediante tratamientos de interés en el bosque.

Formas de evaluación.

La forma de evaluación en esta sección, será similar a la presentada en la (3.8.1.1), en donde se saca un promedio de la variable biomasa de todos los árboles de todas las parcelas de medición de la condición ideal determinada y establecida en el bosque, para este caso se calculará un promedio de los valores de la variable biomasa estimada en todos los árboles, de todas las parcelas de medición, para cada clase por especie según sea la variable que se halla seleccionado, también se sacará un promedio del número total de árboles de todas las parcelas de medición para cada clase. El promedio del total de árboles por clase y especie, será dado de las estimaciones hechas en el bosque en las s especies que el silvicultor considera, el cual al multiplicarlo por el promedio resultante de la estimación de la variable biomasa para cada clase por especie de ese bosque, ayudará a determinar una aproximación del tamaño del bosque, esto se hará como una evaluación inicial en la condición ideal establecida por el silvicultor en el bosque y sostenida mediante el manejo necesario. Las evaluaciones serán periódicas en un tiempo establecido por el silvicultor, de los resultados obtenidos en cada una se podrán hacer

comparaciones por clases del incremento de la biomasa en el bosque, a su vez, ayudará a evaluar la condición ideal establecida. Si en cada evaluación hay un decremento en la biomasa o volumen del bosque, esto muestra una tendencia no sustentable bajo esa condición de manejo y criterio para determinar y asignar las clases por especie. Si lo anterior ocurre, señala una de dos posibilidades. Que el criterio para definir clases, variable para medir biomasa o la condición ideal definida y establecida por el experto en el manejo del bosque no es lo adecuado para ese bosque, o que los factores operacionales o variables físicas han tenido un cambio que afecta negativamente el crecimiento del bosque. De ser esto último, habrá que buscar las causas para tratar de corregirlas

Otra forma de evaluar será haciendo la comparación, en dos años consecutivos, de los resultados obtenidos de la variable biomasa por clase en la condición ideal establecida en el bosque, de modo que, si el cociente entre los dos años es menor que uno, indica que el bosque está en una tendencia no sustentable.

3.8.2.2 Para un bosque con diferente importancia para cada especie y clase.

Como se ha señalado, durante el desarrollo de las diferentes secciones que se presentan en el trabajo, cuando se de diferente importancia a cada clase por especie. El silvicultor dará un valor en el intervalo de (0,1) siguiendo un orden

de importancia de mayor a menor a cada clase de cada especie que componen el bosque en estudio,

Formas de evaluación

La evaluación será igual que la presentada en formas de evaluación de la sección (3.8.2.1), sin olvidar que para este caso los resultados obtenidos serán modificados por los pesos o ponderaciones asignados a las clases por especie. Esto ayudará a determinar una aproximación del tamaño del bosque, asimismo las evaluaciones serán en forma periódica en el tiempo definido por el experto en el manejo del mismo. Según los resultados que se obtengan en cada evaluación, ayudarán a dar referencia del estado del bosque y su tendencia, si la biomasa se muestra en decremento, señala la no sustentabilidad del sistema, si ocurre lo contrario indica la posible sustentabilidad de éste, a su vez eso le ayudará al silvicultor buscar mejorar sus técnicas de manejo y de evaluación de biomasa, así como el criterio para asignar pesos a las clases por especies.

3.9 Impactos negativos temporales en el tamaño del bosque

Las consideraciones siguientes son para las alternativas con manejo que se han visto, ya que, la primera donde no se tiene éste, es irreal y tuvo sólo el propósito de introducir la forma en que se concibe el problema.

A lo largo de las evaluaciones que se realicen para tratar de encontrar elementos que den señales sobre la no sustentabilidad de un bosque es posible que se presenten impactos temporales (incendios, plagas, sequías severas, talas clandestinas inmoderadas etc.), que afecten negativamente el tamaño de éste y por ende las estimaciones que se hagan para calcular los índices que se proponen en el trabajo. Se habla de impactos temporales porque, de ser permanentes se tendría que abandonar la información hasta ese momento recabada e iniciar una nueva, congruente con la situación ya modificada, es decir, iniciar otro estudio.

También se está hipotetizando que el impacto no afectaría más allá de un 30% el tamaño del bosque pues, de ser así, habría que redefinir todo el esquema de seguimiento.

Considerando que las estimaciones en un bosque, por la magnitud de este, no tienen que ser muy precisas, lo que en esta sección se propone es dar alguna idea para corregir datos en el tiempo, afectados en algún momento por algún impacto, de manera aproximada y sencilla.

Considere que se tienen los tamaños estimados del bosque en los tiempos $t = 0, 1, 2, \dots, \tau$, denotados por T_t , y que durante el tiempo $t \in (s-1, s]$ se presentó un efecto negativo temporal que afectó la variable bajo estudio T_t ,

$s = 1, 2, \dots, \tau$. Al comparar T_s con T_{s-1} , por ejemplo T_s/T_{s-1} , se encontrará una caída en el tamaño del bosque que obviamente no puede ser tomada como un indicio de no sustentabilidad del sistema sino, una reducción accidental de la magnitud que, por ser temporal, aunque su efecto se propague por un tiempo largo, se irá diluyendo con el mismo.

Tres posibles casos se analizan.

Primero: Si de $t = 0$ al tiempo $t = s - 1$ se cuenta con un número de observaciones no muy pequeño (por ejemplo mayor a 10, dependiendo del intervalo de tiempo de evaluación) se podrá ajustar una regresión del tipo.

$$\ln T_i = a \ln T_{i-1} + e_i; \quad i = 1, 2, \dots, s - 1$$

para obtener una predicción de T_s , i.e., $\hat{T}_s = T_{s-1}^{\hat{a}}$ donde $\hat{a}$ es la velocidad estimada del crecimiento del tamaño, obtenida de la regresión. Una estimación de la reducción ocasionada por el impacto sería $\hat{T}_s - T_s$ y la serie de tamaños $T_0, T_1, \dots, T_{s-1}$ podría ser corregida para obtener una nueva

$$T_i^* = T_i - (\hat{T}_s - T_s), \quad i = 0, 1, 2, \dots, s - 1$$

cuya ventaja sería presentar los mismos incrementos que la serie original en los tiempos $t = 1, 2, \dots, s - 1$ y en el tiempo $t = s$, el tamaño T_s presentaría un incremento respecto a sus valores en el pasado consistente con éste. La serie

modificada a considerar en el estudio de no sustentabilidad será

$$T_0^*, T_1^*, \dots, T_{s-1}^*, T_s, \dots, T_T$$

Segundo: Si de $t = 0$ al tiempo $t = s - 1$ se cuenta con un número chico de observaciones, se podría tomar un promedio de las últimas dos diferencias

$$d = [(T_{s-1} - T_{s-2}) + (T_{s-2} - T_{s-3})]/2 = (T_{s-1} - T_{s-3})/2 \text{ para obtener } \hat{T} = T_{s-1} + d \text{ y}$$

hacer lo mismo que en el primer caso.

Tercero: Si se tienen tan pocas observaciones que no se puedan calcular dos diferencias consecutivas como en el segundo caso sería mejor reiniciar el estudio.

Por supuesto que hay otras formas de generar nuevas series que traten de ser consistentes con lo ocurrido antes del impacto negativo, la idea es sólo mostrar una forma para proceder, si éste ocurre.

3.10 Sobre la forma de evaluación

De nuevo, los comentarios en esta sección son para las alternativas con manejo, por la razón antes señalada, ya sea con o sin una condición ideal.

Partimos en que se tienen mediciones del tamaño del bosque en los tiempos

$t = 0, 1, 2, \dots, \tau$, denotados por T_t , previamente corregidos por impactos negativos temporales de modo que ellos puedan ser comparables. Ya sea que se estudien directamente los valores T_t o los valores, $K_t = T_t / T_{t-1}$ $t = 1, 2, \dots, \tau$, decrementos en estas series son indicativos de una condición no sustentable. Por supuesto, en condiciones normales estos valores difícilmente decrecerán pues se requieren condiciones extremas para que ocurra este evento, no obstante y sin duda en este caso se puede afirmar que el sistema no es sustentable. En general T_t o K_t serán series crecientes y la velocidad de su crecimiento determinará, de alguna manera, el grado de sustentabilidad del sistema en las condiciones de manejo en que se encuentre. Para tener una estimación de esta velocidad de crecimiento podemos ajustar a T_t o K_t una función del tiempo monótona creciente asintótica al supuesto tamaño promedio máximo alcanzable en una hectárea, denotada por T_t^* o K_t^* , respectivamente. Definitivamente, dT_t^*/dt y dK_t^*/dt (derivadas totales con respecto al tiempo) son estimaciones de las velocidades de crecimiento de T_t y K_t , respectivamente, en el tiempo t .

¿Contra cuáles velocidades de crecimiento se deben comparar las anteriores, para juzgar si son grandes o pequeñas las estimaciones obtenidas en cada tiempo t ?

Sin lugar a dudas, si se contará con velocidades de crecimiento óptimas

para cada tiempo t contra las cuales comparar las que están ocurriendo en el bosque nadie se preocuparía si estas últimas fueran cercanas a las primeras; por el contrario, cualquiera declararía indicios de no sustentabilidad del sistema si las tasas de crecimiento observadas fueran muy pequeñas en comparación a las óptimas.

Si se contará con un modelo de crecimiento óptimo del bosque, obtenido de algún modo, para T_t o K_t , digamos T_t^+ y K_t^+ , entonces se podrían obtener bandas de confianza (por ejemplo, con un nivel del 95%) para T_t^* o K_t^* y, de estar la curva T_t^+ o K_t^+ , según sea el caso, por abajo del nivel superior de confianza en todo t , las tasas de crecimiento reales se pueden considerar cercanas a las óptimas, conduciendo a declarar que no hay indicios de que el sistema no sea sustentable. En el momento que la curva T_t^+ o K_t^+ se ubique por arriba de este nivel hay suficiente evidencia para sospechar que el sistema no es sustentable en esas condiciones, obligando a buscar las causas que están ocasionando la caída en la tasa de crecimiento.

De haber una caída en la tasa de crecimiento, también se vuelve de interés si ésta es o no permanente. En el primer caso, cuando se cuenta con tasas de crecimiento óptimas en ciertos periodos de tiempo, si las observadas están por abajo de las óptimas pero la diferencia entre ambas permanece aproximadamente constante o tiende a decrecer, entonces la caída en la

velocidad de crecimiento fue temporal y su efecto permanece a través del tiempo o tiende a desaparecer. Si las observadas están por abajo de las óptimas y la diferencia entre éstas tiende a crecer a través del tiempo, entonces la caída es permanente y se está en una situación crítica. En el otro caso, donde se cuenta con un modelo de crecimiento óptimo del tamaño del bosque T_t^+ o K_t^+ , si se mantiene por encima del nivel superior de la banda de confianza de T_t^* o K_t^* , según el caso, pero la diferencia $T_t^+ - T_t^*(K_t^+ - K_t^*)$ es aproximadamente constante o tiende a decrecer, entonces la caída en la tasa de crecimiento fue temporal y su efecto permanece a través del tiempo o tiende a desaparecer. Sin embargo, si la diferencia $T_t^+ - T_t^*(K_t^+ - K_t^*)$ tiende a crecer con el tiempo entonces la caída es permanente y se tiene una situación crítica.

En ambos casos, cuando se cuenta con velocidades de crecimiento óptimas o un modelo de crecimiento óptimo para el tamaño del bosque bajo estudio, se tiene una referencia contra la cual juzgar el comportamiento real del mismo. Esto es la esencia de cualquier valoración de sustentabilidad que se desee hacer en algún sistema, ya que, para decidir que algo se deteriora o mejora es indispensable contar con una referencia contra la cual juzgar lo que está ocurriendo. Para decir que bajo las condiciones actuales de manejo, los bosques mexicanos se están degradando no basta con decir que éstos ya no crecen como antes, es necesario calcular qué tanto han dejado de crecer y si la caída en la tasa de crecimiento persiste o sólo fue temporal. Lo que se haga

para detener esta caída y posteriormente, de ser posible, recuperar lo que la tasa de crecimiento haya perdido corresponde a una etapa posterior al cálculo del tamaño de la caída de ésta y a la determinación de si es o no temporal.

Por lo anterior, elementos indispensables en esta visión de sustentabilidad son las tasas óptimas de crecimiento en ciertos periodos de tiempo o un modelo del crecimiento óptimo del tamaño del bosque como función del tiempo a través del horizonte de estudio. Para obtener los elementos mencionados, una posibilidad sería contar con datos históricos que permitieran estimar los tamaños del bosque a través del tiempo, de modo que sirvieran como referencia de los tamaños actuales del mismo. De tener datos históricos confiables de esta naturaleza se contaría con el ingrediente principal para valorar la sustentabilidad actual del sistema forestal. De no existir datos históricos, otra posibilidad sería establecer parcelas modelo de comparación independientes a las parcelas de muestreo. Dichas parcelas modelo deberían establecerse en áreas donde no fueran perturbadas las condiciones ambientales, las variables físicas, así como también estuvieran exentas de efectos antropogénicos en su entorno. En la medida que las parcelas modelo estuvieran en estas condiciones, se podría contar con evaluaciones precisas de las tasas de crecimiento y los tamaños del bosque que se usarían para comparar el desarrollo del sistema forestal. Así, de las parcelas modelo se obtendrían T_t^+ y K_t^+ para hacer las mediciones de sustentabilidad. Obviamente, si estas parcelas modelo se ven afectadas por factores que

inciden en el crecimiento de la biomasa las estimaciones que se obtengan serán menores a las óptimas, conduciéndonos a puntos de referencia equivocados.

Las parcelas modelo, además de establecerse en áreas cuya posibilidad de ser perturbadas sea mínima, deben manejarse de acuerdo a la condición general seleccionada para el bosque, es decir, bajo una condición ideal o sin ella según la opción escogida. Se debe recordar que en esta sección se están considerando bosques con manejo bajo una condición ideal o sin ella en los términos que esto significa y descritos en las secciones 3.7 y 3.8. Los cuidados adicionales de estas parcelas deben orientarse a evitar que factores externos físicos o químicos, modifiquen las variables endógenas responsables del crecimiento de la masa, por ejemplo, aguas contaminadas, incendios, sustancias tóxicas, etc., que sí estén afectando al bosque en general por la imposibilidad de controlarlos en toda la extensión de éste. En otras palabras, si se tienen parcelas que puedan ser 'aisladas' de los factores negativos para el crecimiento, que están incidiendo en el bosque, se podrá medir el daño y la severidad de estos factores sobre el crecimiento a través, por ejemplo, de índices generales como los propuestos en esta tesis. Por supuesto, cualquier práctica silvícola aplicada al bosque debe hacerse en las parcelas modelo evitando con ello inducir factores que confundan los resultados obtenidos. La posibilidad de 'aislar' parcelas que modelen el crecimiento de modo que se controlen los factores negativos, ocurriendo en el bosque, como se hace en un

experimento de laboratorio, no es real, sin embargo se puede lograr para propósitos prácticos minimizando la incidencia de estos factores en las parcelas usadas para este propósito. Lo anterior, es una desventaja para esta manera de estimar un marco de comparación, sin embargo, de ser aproximadamente posible, a su favor se encuentra el poder evaluar el daño que un bosque está sufriendo por todas las prácticas no controladas que se realizan actualmente fuera y dentro de él, aún las prácticas de talas clandestinas. Además, si no se cuenta con datos históricos parece que ésta es la única forma de hacerlo así como también iniciar el registro que permita pronosticar objetivamente la conducta futura de los bosques.

IV RESULTADOS Y DISCUSIONES

Dado que los ecosistemas forestales están compuestos por una gran variedad de especies forestales y animales, que tienen una función importante dentro del mismo, y que, por muchos años han mostrado ser sustentables sin intervención alguna por parte del hombre, el permanente deterioro que puede reconocerse en ellos tiene que ser acreditable a las decisiones que éste toma en el interior del mismo (silvicultura) o fuera de él (externalidades) para cubrir sus necesidades, las que han aumentado notablemente en los últimos años en razón directa del crecimiento demográfico. Al demandarse más productos del bosque se obliga a que éste crezca más rápidamente o se aumenten las áreas silvícolas. En el primer caso se intensifica la producción vegetal afectándose principalmente la variable física suelo y en cierta medida algunos elementos operacionales, estos cambios pueden afectar negativamente el desarrollo del bosque. En el segundo caso el recurso tierra es finito. La demanda crece si la población lo hace, así, al crecer aquella también aumentan las externalidades ocasionadas por las actividades de la población potenciando la fuerza opuesta a la sustentabilidad del ecosistema. Indudablemente, como se ha mencionado en muchas partes, es el tamaño de la población la variable con mayor peso en la sustentabilidad de cualquier sistema, no obstante por el momento se tiene

que evaluar el posible daño que están sufriendo los recursos forestales, entre otros para tener la evidencia que permita instrumentar las decisiones para detenerlo y posiblemente corregirlo. La situación señalada generó la idea de proponer ciertas medidas para evaluar el efecto conjunto de la acción del silvicultor y las externalidades haciendo posible distinguir el causante de alguna acción negativa si se da seguimiento simultáneamente a las variables físicas y los elementos operacionales.

El enfoque usado en la construcción de los índices o medidas, como se ha mencionado antes, no asegura la perpetuidad del sistema, sólo permite detectar a tiempo los cambios que pongan en riesgo la sustentabilidad del mismo y su posible enmienda para modificar la caída en la productividad.

En un sistema, si denominamos resolución al nivel de confiabilidad que un índice nos proporciona, en términos de evaluar con precisión y robustez la sustentabilidad del sistema, se puede razonablemente aceptar que dicha resolución depende del número de productos (m) y el número de insumos (n) considerados para la medición de dicha sustentabilidad. El caso extremo de $m = 1$ y $n = 1$ determinará una visión muy reducida de un sistema. Los casos donde m o n sean muy grandes determinarán evaluaciones muy laboriosas pero, en general, más confiables. En la anterior idea se piensa en toda clase de beneficio (productos) y toda clase de costo (insumos), aún las externalidades.

La resolución en el caso de un sistema forestal (bosque) estaría dada, por el lado de los productos, en el número de especies m (vegetales y si se quiere animales) y, por el lado de los insumos, en los que sean usados para el manejo del bosque. En una plantación, si excluimos a las externalidades, m sería un número muy chico y n sería relativamente grande con respecto a m . El caso contrario se tendría en una selva. Si consideramos las externalidades (erosión, contaminación de aguas superficiales y subterráneas, la diversidad genética, etc.) quizá la resolución sería la misma en ambos extremos.

Como se ha señalado en la metodología propuesta en este trabajo, para realizar la evaluación de la sustentabilidad de un sistema forestal, se hará uso de las ideas de productividad que la economía ha desarrollado a través de sus índices, las de equilibrio ecológico que la biología ha estudiado en las relaciones benefactor-beneficiario, y las de clases que la silvicultura utiliza para agrupar individuos en base a alguna característica relevante a la formación de biomasa, principalmente producción de fibra de madera.

Cuando el silvicultor detecte y manifieste que el sistema bajo su manejo no es sustentable, de manera aproximada deberá indicar como debe ser el bosque. En particular para la **primera alternativa** que se esta presentando en este estudio, se desea que el silvicultor nombre las especies que deben estar en el bosque y el número de cada una de ellas, se requiere que se inicie con nombrar el vector $\mathbf{f}'_0 = (f_{10}, f_{20}, \dots, f_{s0})$ (el apóstrofo en $\mathbf{f}_0$ representa la

transposición matricial), donde f_0 es el número total esperado de individuos por unidad de área (árboles/ha o animales/ha) de la especie $i = 1, 2, \dots, s$, y s ($m = s$) representa el total de especies deseables para estar en el bosque. El valor de s determinará la diversidad ecológica (resolución) que asegure el potencial genético necesario para conservar un equilibrio en el sistema, indispensable para su sustentabilidad.

Una vez que se ha determinado el vector que representa la condición ideal f_0 , en cualquier momento en el tiempo r se puede estimar el vector $f'_r = (f_{1r}, f_{2r}, \dots, f_{sr})$ y por supuesto compararlo de algún modo con f_0 para medir la 'lejanía' de f_r a f_0 , por ejemplo:

$$I_r^2 = |f_r - f_0|^2 = \sum_{i=1}^s (f_{ir} - f_{i0})^2 = (f_r - f_0)'(f_r - f_0)$$

la norma al cuadrado de la diferencia de ellos o el cuadrado de la distancia del vector f_0 al vector f_r . A medida que esta lejanía tienda a cero se estará cerca de la condición ideal. Así, si al monitorear I_r^2 a través del tiempo se observa que permanentemente se aleja de cero se podrá afirmar que la condición f_0 no está siendo sustentable. Si, además, se cuenta con el monitoreo de los elementos operacionales y las variables físicas se estará en posibilidades de detectar los cambios ocurridos que expliquen por qué no está siendo sustentable la condición f_0 .

Por supuesto, existe la posibilidad de que la condición f_0 no sea sustentable

bajo ninguna condición de los elementos operacionales y las variables físicas, pero ésta debe tener un valor muy pequeño, ya que f_0 lo proporciona un experto o una estimación del propio sistema, en ambos casos no es razonable esperar un f_0 no sustentable en el propio entorno del que es extraído.

En lugar de una medida de lejanía se podría utilizar un índice de lejanía referido al tamaño de la condición ideal, por ejemplo, $ln_r^2 = l_r^2 / f_0' f_0 = l_r^2 / |f_0|^2$, o también comparar las medidas de lejanía de dos años r y t ($r > t$) como en $ln_r^2 = l_r^2 / l_t^2 = ln_r^2 / ln_t^2$ que señala el acercamiento o alejamiento a cero en el tiempo r con respecto a la medida de lejanía que se tiene en el tiempo t .

En lo señalado anteriormente, se ha considerado una misma importancia para cada especie, sin embargo, pueden haber razones para asignarles diferentes ponderaciones. Si $p' = (p_1, p_2, \dots, p_s)$ es el vector que contiene los pesos de cada especie, entonces una medida ponderada de lejanía sería $lp_r^2 = \sum_{i=1}^s [p_i(f_{ir} - f_{i0})]^2$, el cual puede escribirse de la misma forma que l_r^2 si construimos los vectores $f_0^* = (p_1 f_{10}, p_2 f_{20}, \dots, p_s f_{s0})$ y $f_r^* = (p_1 f_{1r}, p_2 f_{2r}, \dots, p_s f_{sr})$ ya que $lp_r^2 = (f_r^* - f_0^*)'(f_r^* - f_0^*)$.

Se ha tomado a p constante a través del tiempo, porque comúnmente no cambia en un lapso razonable de tiempo. No obstante, si fuera el caso (por

ejemplo, cuando se desea llevar a un bosque de una condición a otra), se pueden manejar ponderaciones variables con el tiempo y definir $\mathbf{p}'_r = (p_{1r}, p_{2r}, \dots, p_{sr})$, en el tiempo r , para construir la siguiente medida modificada de lejanía:

$$lpt_r^2 = \sum_{i=1}^s [p_{ir}(f_{ir} - f_{i0})]^2 = (\mathbf{f}'_r - \mathbf{f}'_0)'(\mathbf{f}'_r - \mathbf{f}'_0)$$

si $\mathbf{f}'_r = (p_{1r}f_{1r}, p_{2r}f_{2r}, \dots, p_{sr}f_{sr})$ y $\mathbf{f}'_0 = (p_{1r}f_{10}, p_{2r}f_{20}, \dots, p_{sr}f_{s0})$. En este trabajo las medidas que se proponen toman al vector de ponderaciones como constante, es decir, se trabaja con $\mathbf{p}$.

De igual forma que antes, cuando no se tenían pesos, en lugar de una medida de lejanía se puede tener un índice de lejanía $lnpt_r^2 = lpt_r^2 / |\mathbf{f}'_0|^2$ o la comparación de medidas de lejanía en los tiempos r y t ($r > t$):

$$lnpt_r^2 = lpt_r^2 / lpt_t^2 = lnpt_r^2 / lnpt_t^2.$$

La **segunda alternativa** a lo antes descrito, entre otra forma de medir el comportamiento de un bosque, es la siguiente. Cuando se diga que un bosque se está deteriorando, indirectamente se dice que puede ser mejor aunque no se conozca la condición ideal $\mathbf{f}_0$. Para este caso se requiere que el silvicultor nombre las s especies que deben estar en el bosque y una variable que multiplicada por el número de individuos de la misma resulte en un valor aproximado de la biomasa producida por ella. Si los valores medios de la

variable seleccionada de las s especies consideradas en el tiempo r se arreglan en el vector $\mathbf{m}_r = (m_{1r}, \dots, m_{sr})'$ y $\mathbf{f}_r$ es, como antes, el vector que contiene el número de individuos por especie por unidad de área determinado en los muestreos periódicos, una estimación de biomasa en el tiempo r para el bosque sería $b_r = \mathbf{f}_r' \mathbf{m}_r = \sum_{i=1}^s m_{ir} f_{ir}$ y un índice para contrastar el tiempo t con el de r ($r > t$) sería $b_{rt} = b_r/b_t$, el cual si cada vez aumenta indicará que el bosque puede ser sustentable, en caso que éste vaya en decremento no esta siendo sustentable, para ello se da seguimiento a los elementos operacionales y variables físicas esperando poder encontrar las condiciones que determinen porqué ese bosque no es sustentable.

Una observación importante es sobre los valores f_{ir} , número esperado de individuos de la especie i en el tiempo r por hectárea. Es claro que no se espera que tal número ocurra en cada hectárea sino representa un promedio de la población. Depende de la estrategia de manejo aplicada la que regule la distribución en campo de las especies consideradas.

Como se señaló en la metodología, la selección de especies y la importancia que se les asigne es el proceso más importante en la preservación de un bosque, la cual dependerá del objetivo del manejador. Se requiere hacerlo de modo tal que se establezca una estructura ecológica consistente, completa y complementaria que además reciba las prácticas silvícolas y faunísticas que

proporcionen el mejor hábitat para el crecimiento óptimo de los individuos o al menos cercano a este punto. Completa en términos de que no falten especies esenciales en el bosque para el propósito deseado; consistente para evitar especies cuya intercompetencia perjudique sus crecimientos en forma significativa por arriba de lo aceptable; y complementaria para que los beneficios recibidos y entregados por cada especie sea vegetal o animal, permitan un balance favorable cuyo efecto sea el crecimiento vigoroso y rápido de los individuos.

La **tercera alternativa** que se presenta es semejante a la segunda en cuanto a la información requerida al silvicultor, aunque en esta última, se considera una condición ideal que él mismo determina, como ocurre en la primera alternativa. Para este caso se requiere que el experto en el manejo del bosque nombre las s especies que él considera ideal, y el número promedio de individuos por hectárea para cada una de ellas (quedando así identificada la condición ideal f_0), también proporcionará una variable que multiplicada por el número de individuos de la especie de un valor aproximado de la biomasa producida por ésta. De igual forma que en la segunda alternativa, los valores medios esta variable se podrán arreglar en un vector m_r , en cada tiempo r . La idea es, mantener al sistema en la condición f_0 por considerarla óptima para el desarrollo de éste, sin embargo, en cada tiempo el número de individuos por especie por unidad de área en el tiempo r puede ser diferente a f_0 , por diversas razones, forzando a construir f_r para ser utilizado en la estimación de biomasa

$b_r = \mathbf{f}_r' \mathbf{m}_r$ del mismo modo que en la segunda alternativa. Dado b_r se puede construir el índice $b_{rt} = b_r / b_t$ para contrastar los tamaños de biomasa en los tiempos r y t ($r > t$), como se indicó también en la segunda opción. De lo anterior, queda claro que, las medidas que se propongan para la segunda alternativa serán las que se apliquen a la tercera, pues en ésta sólo se trata de mantener una condición ideal $\mathbf{f}_0$ por medio de prácticas sivícolas para aumentar la eficiencia en el uso de los recursos pero la evaluación de la biomasa es la misma.

Lo presentado con el vector $\mathbf{f}_r' = (f_{1r}, f_{2r}, \dots, f_{sr})$, donde f_{ir} representa el número total esperado de individuos de la especie i por unidad de área en el tiempo r , se puede extender si se cuenta, por ejemplo, con las distribuciones diamétricas o de alturas en el caso de especies arbóreas o las distribuciones de pesos en animales. Tal extensión se hará más adelante donde se presentan las diferentes posibilidades que se consideran en el trabajo.

Para la comprensión de los resultados que se presentan en las diferentes alternativas de este trabajo, será necesario apoyarse en las partes de las correspondientes secciones de la metodología que se han dado, se deberán considerar todos los detalles que ésta implique, ya que, ayudará a facilitar el manejo de los mismos y a obtener información más real cuando sean aplicados.

A continuación se presentan las medidas e índices de sustentabilidad para diferentes niveles de información de un sistema forestal.

4.1 Medidas para totales y distribución de totales de especies sobre una condición ideal sin manejo (*primera alternativa*)

Las medidas que se están proponiendo en los diferentes apartados que constituyen esta primera alternativa son de utilidad como simple referencia para las siguientes alternativas, ya que, se requiere que el silvicultor determine una condición ideal para el bosque o ecosistema forestal. Entiéndase por condición ideal aquella que el silvicultor tiene en su mente al conocer cierta masa forestal real, imaginando o deseando un bosque modelo sustentable que debe estar en el bosque real. Una vez definida la condición ideal, sólo será observada, más no intervenida. Esto podría ayudarle a darse cuenta del grado de conocimiento que posee respecto a la composición arbórea y/o faunística del ecosistema particular u otros similares a este, para tomar decisiones de manejo o aprovechamiento sin afectar al mismo.

En seguida se presentan una serie de medidas que será posible aplicar cuando se desee hacer comparaciones sobre totales de especies o sobre distribución de estas, así como para cuando se asigne igual o diferente importancia a cada una.

4.1.1 Medidas para el número total de árboles por especie

En esta sección se tiene el nivel mínimo de información por parte del silvicultor, es decir sólo se cuenta con las especies y el número esperado de individuos por hectárea de cada una de ellas. Un refinamiento de esta información, es obtener el orden de importancia en el bosque para cada especie por medio de valores positivos en el intervalo $(0,1)$, donde se asigne el valor más grande a la especie que se considere más importante y siguiendo de este modo en forma descendente conforme sean menos importantes las especies. Los valores son pesos que representan la importancia de cada especie, de manera que cada individuo en una especie ha sido valorado por el peso que se ha determinado para ella y, su ausencia o presencia ha sido cuantificada por tal valor. Para describir las medidas y los índices que se han construido para este caso se requiere de cierta notación que se introduce enseguida.

Notación

Una vez seleccionadas las s especies de interés y el número esperado de individuos por hectárea para cada una de ellas se tiene el **vector de totales esperados por hectárea**:

$$\mathbf{f}'_0 = (f_{10}, f_{20}, \dots, f_{s0}) \quad (1)$$

donde f_{i0} es el número total esperado por hectárea de individuos de la especie i (dado por el manejador o estimado de una población ideal).

En cada tiempo r el bosque presentará un número de individuos por hectárea de las s especies generando el **vector de totales por hectárea en el tiempo r :**

$$\mathbf{f}'_r = (f_{1r}, f_{2r}, \dots, f_{sr}) \quad (2)$$

donde f_{ir} es el número total de individuos de la especie i en el tiempo r . Se entiende que los individuos que aparezcan de otras especies deberán ser removidos como parte de las prácticas de manejo que se realicen.

Con los valores de importancia de las especies se construye el **vector de ponderaciones de las especies:**

$$\mathbf{p}' = (p_1, p_2, \dots, p_s) \quad (3)$$

donde p_i es la ponderación de la especie i . También dado por el manejador cuando se desea un refinamiento de la información inicialmente proporcionada.

Dados los vectores anteriores, por conveniencia algebraica se construyen los siguientes:

Vector esperado de totales ponderados

$$\mathbf{f}^{\star'}_0 = (p_1 f_{10}, p_2 f_{20}, \dots, p_s f_{s0}) \quad (4)$$

donde $p_i f_{i0}$ es el número esperado total de individuos por hectárea de la especie i en el tiempo r ponderado por su peso p_i :

Vector de totales ponderados

$$\mathbf{f}_r' = (p_1 f_{1r}, p_2 f_{2r}, \dots, p_s f_{sr}) \quad (5)$$

donde $p_i f_{ir}$ es el número total de individuos por hectárea de la especie i en el tiempo r ponderado por su peso p_i :

Usaremos, también, la notación $|\mathbf{f}_r - \mathbf{f}_0| = (|f_{1r} - f_{10}|, |f_{2r} - f_{20}|, \dots, |f_{sr} - f_{s0}|)'$.

4.1.1.1 Medidas para el número total de árboles por especie con la misma importancia para cada una de ellas.

Para evaluar el desarrollo y composición natural del bosque (condición real) y el conocimiento del silvicultor, se ha hecho necesario evaluar la condición ideal que el experto ha dado respecto al bosque en observación, para ello es necesario una comparación entre las dos condiciones, ideal y real. Con tal fin se presentan las siguientes medidas que consideran que todas las especies tienen la misma importancia en el bosque, es decir, $p_i = 1$ para toda $i = 1, 2, \dots, s$.

a).- Medidas de lejanía

Si se cuenta con la condición ideal $\mathbf{f}_0$ y la condición en el tiempo r , $\mathbf{f}_r$, lo natural es evaluar el alejamiento o cercanía de $\mathbf{f}_r$ respecto de $\mathbf{f}_0$ por medio de la

norma euclidea del vector diferencia resultante de estas dos condiciones o una función monótona de ésta. En primer lugar, como se hizo en la introducción de este capítulo, se considera la siguiente función monótona creciente.

Medida de lejanía cuadrática:

$$I_r^2 = \sum_{i=1}^s (f_{ir} - f_{i0})^2 = (\mathbf{f}_r - \mathbf{f}_0)'(\mathbf{f}_r - \mathbf{f}_0) \quad (4.1.1.1.a1)$$

Observe que, a medida que cualquiera de las especies se aleje de su condición ideal el valor de I_r^2 crece y se aleja de cero. Un alejamiento de la condición ideal de manera consistente se considera como un señalamiento de la no sustentabilidad y se debe buscar las causas que impiden acercarse a la condición deseada $\mathbf{f}_0$. Si la tendencia, a través del tiempo, de I_r^2 es ir hacia cero, el bosque podría ser declarado sustentable mientras esta conducta no cambie. Es natural que la medida de lejanía I_r^2 tiene una determinada variabilidad a lo largo de r , de manera que esta medida puede tener una cierta tendencia alrededor de la cual ocurrirán los valores de I_r^2 . Dependiendo de la magnitud de la variabilidad de I_r^2 un bosque se puede considerar inestable si es muy grande o estable si es pequeña siendo, por supuesto, esta última la más aceptable puesto que indica una mayor certidumbre sobre los valores de la medida. El coeficiente de variación de los valores de I_r^2 puede determinar que tan grande o pequeña es su variabilidad (al menos con respecto a su valor promedio que indica el valor alrededor del cual oscila) y de hecho esta

estimación es usada como tal. En ocasiones la variabilidad de una medida como I_r^2 es tan grande que oculta su verdadera tendencia.

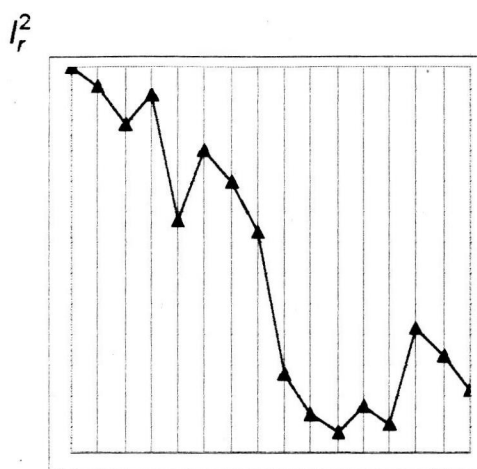
A continuación se presentan cuatro gráficas para ejemplificar la situación de un bosque sustentable o la de un bosque no sustentable en ambas modalidades de estabilidad o inestabilidad.

Otra medida de lejanía que puede definirse es:

La medida de lejanía. absoluta:

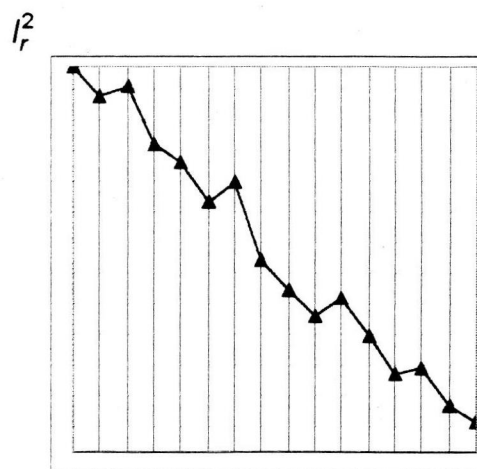
$$|I_r| = \sum_{i=1}^S |f_{ir} - f_{i0}| = \mathbf{1}_s' |\mathbf{f}_r - \mathbf{f}_0| \quad (4.1.1.1.a2)$$

la cual está dada en términos del valor absoluto de la desviación que tiene cada especie en el tiempo r de su condición ideal. Del mismo modo que I_r^2 , $|I_r|$ se aleja de cero a medida que el bosque se aleja de su condición ideal en cualquiera de las especies consideradas y se acerca a cero cuando todas las especies simultáneamente se acercan a su condición ideal. De esta manera el bosque se declara o no sustentable siguiendo el criterio dado para I_r^2 , así como también las características descritas para éste lo son para $|I_r|$. Las variabilidades de estas dos medidas de lejanía son diferentes, ya que su escala así lo es, por tanto sus respectivos coeficientes de variación podrán ser usados para determinar si el bosque es estable o no de acuerdo a la medida usada.



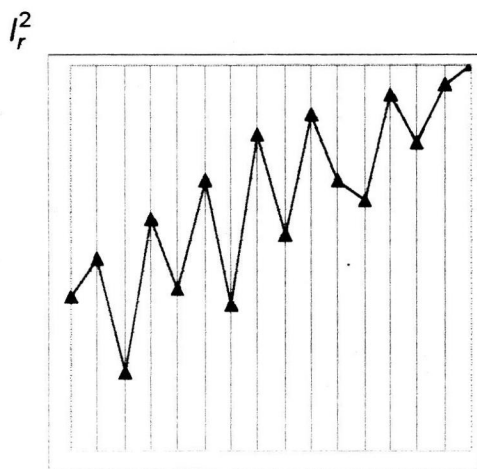
tiempo (r)

Figura 1. Bosque sustentable e inestable



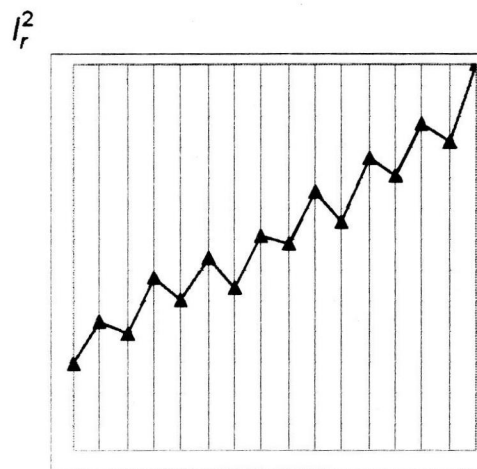
tiempo (r)

Figura 2. Bosque sustentable y estable



tiempo (r)

Figura 3. Bosque no sustentable e inestable.



tiempo (r)

Figura 4. Bosque no sustentable y estable

Si hacemos $l_r = \sqrt{l_r^2}$, entonces l_r y $|l_r|$ estarían en las mismas unidades originales de las componentes del vector $\mathbf{f}_0$. En tal caso, otra medida de lejanía puede ser la media geométrica de l_r y $|l_r|$, i.e., $\sqrt{l_r |l_r|}$. Lo mismo puede hacerse en varias parejas de medidas e índices que siguen abajo.

b).- Índices de lejanía

Un simple cambio de escala de las anteriores medidas de lejanía generan índices que miden la lejanía de la condición ideal con respecto a un valor propio de esta condición. Por ejemplo, l_r^2 puede escalarse con respecto al cuadrado de la norma del vector que proporciona los valores ideales, es decir:

Índice de lejanía cuadrático:

$$ln_r^2 = \frac{\sum_{i=1}^s (f_{ir} - f_{i0})^2}{\sum_{i=1}^s f_{i0}^2} = \frac{(\mathbf{f}_r - \mathbf{f}_0)'(\mathbf{f}_r - \mathbf{f}_0)}{\mathbf{f}_0' \mathbf{f}_0} = \frac{l_r^2}{\mathbf{f}_0' \mathbf{f}_0} \quad (4.1.1.1.b_1)$$

el cual es proporcional a l_r^2 , siendo la proporción el recíproco del cuadrado de la distancia del vector $\mathbf{f}_0$. Uno espera que las desviaciones $f_{ir} - f_{i0}$ no sean mayores que los valores f_{i0} , en todo tiempo r , de manera que este índice ln_r^2 tome valores en el intervalo $[0,1]$, sin embargo puede ocurrir que este índice sea mayor que uno. Obviamente, valores de ln_r^2 mayores de uno señalarían un alejamiento crítico de la condición ideal.

Lo mismo puede hacerse con la otra medida de lejanía $|l_r|$ para obtener el índice de lejanía absoluto:

$$|ln_r| = \frac{\sum_{i=1}^s |f_{ir} - f_{i0}|}{\sum_{i=1}^s f_{i0}} = \frac{|l_r|}{1'_s f_0} \quad (4.1.1.1.b2)$$

Otra vez, si hacemos $ln_r = \sqrt{ln_r^2}$, otro índice de lejanía está dado por la media geométrica $\sqrt{ln_r |ln_r|}$.

c).- Índice de comparación entre los años r y t con $r > t$

Otra medida para monitorear la conducta del bosque, respecto de su lejanía de la condición ideal, sería comparar las medidas de lejanía de dos tiempos adyacentes, por ejemplo el índice de comparación cuadrático:

$$ln_{rt}^2 = \frac{\sum_{i=1}^s (f_{ir} - f_{i0})^2}{\sum_{i=1}^s (f_{it} - f_{i0})^2} = \frac{(f_r - f_0)'(f_r - f_0)}{(f_t - f_0)'(f_t - f_0)} = \frac{l_r^2}{l_t^2} = \frac{ln_r^2}{ln_t^2} \quad (4.1.1.1.c1)$$

con $r = t + 1$. Si se tienen los índices $ln_{t+1,t}^2$ para todos los tiempos t observados, la varianza de estos valores indicará el estado de la dinámica del bosque, si la variabilidad es grande se tiene un bosque sufriendo grandes cambios en el número de individuos presentes de cada especie respecto de la condición tomada como ideal. Lo anterior puede ser propio de un bosque en una etapa temprana de regeneración pero no en uno de edad madura, el cual

tendrá una varianza relativamente pequeña comparada con la observada en su estado temprano. Una vez que la variabilidad sea pequeña y se haya estabilizado, será de interés observar el valor hacia el cual $ln_{t+1,t}^2$ converge ya que si este valor de convergencia es cero validará la sustentabilidad de la condición f_0 proporcionada por el manejador a priori. Note que $ln_{t+1,t}^2$ tiene naturalmente dos polos de atracción para su convergencia, o converge a cero cuando $\lim_{t \rightarrow \infty} f_t = f_0$ o converge a uno cuando $\lim_{t \rightarrow \infty} f_t = f_1 \neq f_0$. Ahora, si la convergencia de $ln_{t+1,t}^2$ es hacia el valor de uno, y $t = T$ es la última observación, entonces f_0 aún puede considerarse sustentable si $|f_0 - f_T|$ es cercano a cero, de otro modo f_0 no será sustentable y f_T señalará una condición sí sustentable, quizá no ideal pero probablemente cerca de tal condición. Para confiar en f_T es claro que T debe representar un periodo de observación suficientemente grande.

La forma anterior de monitorear la condición del bosque es más atractiva, ya que, permite, simultáneamente, verificar la sustentabilidad de la condición f_0 ofrecida por el manejador y estimar una condición f_T en cuya vecindad debe encontrarse la condición ideal sustentable.

Otro índice de comparación, en cierta forma equivalente, es el índice de comparación absoluto:

$$|ln_{rt}| = \frac{\sum_{i=1}^s |f_{ir} - f_{i0}|}{\sum_{i=1}^s |f_{it} - f_{i0}|} = \frac{|l_r|}{|l_t|} = \frac{|ln_r|}{|ln_t|} \quad (4.1.1.1.c2)$$

el cual tiene una conducta semejante a ln_{rt}^2 .

Como se ha indicado, si $ln_{rt} = \sqrt{ln_{rt}^2}$, una tercera medida de comparación de dos índices de lejanía sería la media geométrica $\sqrt{|ln_{rt}| |ln_{rt}|}$.

Cuando se tenga información referente a un valor diferente para cada especie que compone la masa forestal en observación, se han diseñado las siguientes formas de medición.

4.1.1.2 Medidas para el número total de árboles por especie con diferente importancia para cada una de ellas.

En esta sección se introduce un refinamiento en la información proporcionada por el manejador, vía el vector que describe el orden de importancia de las especies en el bosque. Se considera que se cuenta con $\mathbf{p}' = (p_1, p_2, \dots, p_s)$, los vectores $\mathbf{f}_0$ y $\mathbf{f}_r$, en diferentes tiempos r , y se construyen los vectores $\mathbf{f}_0^*$ y $\mathbf{f}_r^*$ conforme a las ecuaciones (4) y (5) de la notación de la sección (4.1.1).

En esta situación las medidas de lejanía, los índices de lejanía y los

índices de comparación de observaciones adyacentes son dados como extensiones naturales de los correspondientes en la sección (4.1.1.1). De manera que sus características y conductas correspondientes serán semejantes a las ya vistas.

a).- Medidas de lejanía

Medida de lejanía cuadrática

$$lp_r^2 = \sum_{i=1}^s [p_i(f_{ir} - f_{i0})]^2 = (\mathbf{f}_r^* - \mathbf{f}_0^*)(\mathbf{f}_r^* - \mathbf{f}_0^*) \quad (4.1.1.2.a1)$$

Medida de lejanía absoluta

$$|lp_r| = \sum_{i=1}^s p_i |f_{ir} - f_{i0}| = \mathbf{1}'_s |\mathbf{f}_r^* - \mathbf{f}_0^*| \quad (4.1.1.2.a2)$$

Haciendo $lp_r = \sqrt{lp_r^2}$, una tercera medida es $\sqrt{|lp_r||p_r|}$.

Debe notarse, en este caso, que una determinada desviación $f_{ir} - f_{i0}$ afectará más a estas medidas de lejanía cuanto mayor sea el valor de la ponderación p_i . De lo anterior, la asignación de pesos a las especies determinará definitivamente la conducta de las medidas y por ello se deben asignar según la importancia que cada especie represente para el bosque.

b).- Índices de lejanía

Índice de lejanía cuadrático:

$$lnp_r^2 = \frac{\sum_{i=1}^s [p_i(f_{ir} - f_{i0})]^2}{\sum_{i=1}^s (p_i f_{i0})^2} = \frac{(\mathbf{f}_r^* - \mathbf{f}_0^*)(\mathbf{f}_r^* - \mathbf{f}_0^*)}{\mathbf{f}_0^* \mathbf{f}_0^*} = \frac{lp_r^2}{\mathbf{f}_0^* \mathbf{f}_0^*} \quad (4.1.1.2.b1)$$

Índice de lejanía absoluto:

$$|lnp_r| = \frac{\sum_{i=1}^s p_i |f_{ir} - f_{i0}|}{\sum_{i=1}^s p_i f_{i0}} = \frac{|lp_r|}{\mathbf{f}_0^* \mathbf{f}_0^*} \quad (4.1.1.2.b2)$$

Si $lnp_r = \sqrt{lnp_r^2}$, el otro índice de lejanía posible que se ha descrito es $\sqrt{|lnp_r| |lnp_r|}$.

c).- Índices de comparación entre los años r y t con $r > t$

Índice de comparación cuadrático:

$$lnp_{rt}^2 = \frac{\sum_{i=1}^s [p_i(f_{ir} - f_{i0})]^2}{\sum_{i=1}^s [p_i(f_{it} - f_{i0})]^2} = \frac{(\mathbf{f}_r^* - \mathbf{f}_0^*)(\mathbf{f}_r^* - \mathbf{f}_0^*)}{(\mathbf{f}_t^* - \mathbf{f}_0^*)(\mathbf{f}_t^* - \mathbf{f}_0^*)} = \frac{lp_r^2}{lp_t^2} = \frac{lnp_r^2}{lnp_t^2} \quad (4.1.1.2.c1)$$

Índice de comparación absoluto:

$$|lnp_{rt}| = \frac{\sum_{i=1}^s p_i |f_{ir} - f_{i0}|}{\sum_{i=1}^s p_i |f_{it} - f_{i0}|} = \frac{|lp_r|}{|lp_t|} = \frac{|lnp_r|}{|lnp_t|} \quad (4.1.1.2.c2)$$

Con $lnp_{\pi} = \sqrt{lnp_{\pi}^2}$, otro índice de comparación es $\sqrt{lnp_{\pi}|lnp_{\pi}|}$.

Observe que todos los índices, donde la importancia es diferente para cada especie, son exactamente los mismos que cuando todas las especies tienen la misma importancia, sólo que éstos, usan los vectores $\mathbf{f}_r$ y $\mathbf{f}_0$, y aquellos los vectores $\mathbf{f}_r^*$ y $\mathbf{f}_0^*$. Por ello, la notación sólo difiere por una p (ponderación) antes de los subíndices o superíndices finales y, por ejemplo:

$$I_r^2 = \sum_{i=1}^S (f_{ir} - f_{i0})^2 = (\mathbf{f}_r - \mathbf{f}_0)'(\mathbf{f}_r - \mathbf{f}_0) \quad \text{e} \quad lp_r^2 = \sum_{i=1}^S [p_i(f_{ir} - f_{i0})]^2 = (\mathbf{f}_r^* - \mathbf{f}_0^*)'(\mathbf{f}_r^* - \mathbf{f}_0^*)$$

son medidas de lejanía que usan $\mathbf{f}_r$ y $\mathbf{f}_0$, y $\mathbf{f}_r^*$ y $\mathbf{f}_0^*$ respectivamente. Lo mismo aplica para las otras medidas de las secciones (4.1.1.1 y 4.1.1.2).

4.1.2 Medidas para la distribución del número total de árboles por especie

Ahora se introducen medidas considerando una, aún, mayor cantidad de información. Se supone que se cuenta, no tan sólo con el número total esperado de individuos por hectárea de cada una de las especies a considerar en el bosque sino que además se tiene la distribución de una variable de interés medida sobre los individuos, es decir, no sólo los individuos sino la distribución de una variable de éstos que provea información sobre la mejor disposición de ellos en el campo. Por ejemplo, en especies maderables se

podría tener la distribución diamétrica o de alturas, en especies no maderables la distribución de los diámetros de copa y en animales la distribución de pesos. Por supuesto que se pueden tener las distribuciones de otras variables que caractericen mejor a la especie bajo consideración según su papel en el bosque y el objetivo de aprovechamiento que se tenga de ella de acuerdo al criterio del manejador. La búsqueda de estas distribuciones es típica y se cuenta con varios métodos estadísticos para hacerla, por ende, generar tal información no es nada extraordinario para el manejador.

Las distribuciones de las variables seleccionadas serán manejadas como se hace frecuentemente en la silvicultura para el manejo de un bosque, es decir, particionando el rango de valores de la variable en k intervalos de clase (clases o categorías) y dando el número esperado de individuos por hectárea en cada clase.

Es claro que esta cantidad de información, proporciona una descripción bastante completa del bosque, con la cual la evaluación del sistema a través de su monitoreo será más representativa del estado actual del mismo, de manera que se podrán observar cambios en una mayor cantidad de direcciones que alerten sobre posibles problemas que están ocurriendo en los elementos operacionales y las variables físicas.

La forma de todas las medidas e índices de esta sección, aun los de ciertos vectores aquí introducidos, será semejante a las de la anterior pues sólo representan una extensión muy obvia de ellas. Esto se puede verificar observando que si en lo que sigue sólo se cuenta con una sola clase las medidas e índices se reducen a los ya presentados en la sección (4.1.1).

También, si se cuenta con las diferentes importancias que cada clase de cada especie tiene en el bosque se podrá utilizar esta información del modo que se hizo en la sección (4.1.1.2).

Las medidas que se han desarrollado en esta sección son diez, de las cuales seis son iguales a las presentadas en (4.1.1), las otras cuatro restantes, se han desarrollado con la finalidad de ayudar cuando se desee conocer información más refinada respecto a alguna especie en particular que compone el ecosistema o masa forestal en estudio

A continuación se describe la notación que se usará en la formulación de las medidas.

Notación

Se seleccionan las s especies de interés y las k clases en cada una de éstas que serán consideradas para el estudio, por supuesto, no todas las categorías

son las mismas para todas las especies, pero sí lo es el número de ellas, i.e., k . Así, k debe ser lo suficientemente grande para cubrir el número de clases de la especie más exigente para ser descrita. Algebraicamente sería conveniente que se cumpla $k = s$ pero no es necesario para el caso.

Primero se agrupan en una matriz las distribuciones ideales de las s especies consideradas, obteniendo la **Matriz de frecuencias esperadas**:

$$\mathbf{F}_0 = \begin{bmatrix} f_{011} & f_{012} & \cdots & f_{01k} \\ f_{021} & f_{022} & \cdots & f_{02k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{0s1} & f_{0s2} & \cdots & f_{0sk} \end{bmatrix} = \{f_{0ij}\}_{i=1,2,\dots,s}^{j=1,2,\dots,k} \quad (1)$$

donde f_{0ij} es la frecuencia esperada (dada como resultado de un plan de manejo) de la i -ésima especie en la j -ésima clase. Claramente la i -ésima hilera de la matriz contiene la distribución de la i -ésima especie.

Del mismo modo se construye la matriz que contiene las distribuciones de las especies en el tiempo r para obtener la **Matriz de frecuencias en el tiempo r** :

$$\mathbf{F}_r = \begin{bmatrix} f_{r11} & f_{r12} & \cdots & f_{r1k} \\ f_{r21} & f_{r22} & \cdots & f_{r2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{rs1} & f_{rs2} & \cdots & f_{rsk} \end{bmatrix} = \{f_{r ij}\}_{i=1,2,\dots,s}^{j=1,2,\dots,k} \quad (2)$$

donde $f_{r ij}$ es la frecuencia de la i -ésima especie en la j -ésima clase en el tiempo r .

En la notación que sigue se usará la versión abreviada entre corchetes para las matrices.

Se cuenta ahora con especies y clases dentro de las especies, por lo que, si se agrega información respecto a la importancia de las especies se debe dar para cada clase en la especie, resultando la **Matriz de ponderaciones:**

$$\mathbf{P} = \{p_{ij}\}_{i=1,2,\dots,s}^{j=1,2,\dots,k} \quad (3)$$

donde p_{ij} es la importancia de la i -ésima especie en su j -ésima categoría. También dadas por el manejo.

Con las matrices introducidas se construyen las siguientes para escribir en forma matricial las medidas e índices que se presentan.

Matriz de frecuencias esperadas ponderadas:

$$\mathbf{F}_0^* = \{p_{ij}f_{0ij}\}_{i=1,2,\dots,s}^{j=1,2,\dots,k} \quad (4)$$

donde $p_{ij}f_{0ij}$ es la frecuencia de la i -ésima especie en la j -ésima clase de la condición ideal, ponderada por su importancia p_{ij} correspondiente.

Matriz de frecuencias ponderadas:

$$\mathbf{F}_r^* = \{p_{ij}f_{rij}\}_{i=1,2,\dots,s}^{j=1,2,\dots,k} \quad (5)$$

donde $p_{ij}f_{rij}$ es la frecuencia de la i -ésima especie en la j -ésima clase en el tiempo r , ponderada por su importancia p_{ij} correspondiente.

Otras notaciones de las que se hará uso son las siguientes:

Para cualquier matriz, aunque aquí se usa F_r , ésta se representará por sus columnas o hileras como sigue:

$$F_r = [f_{r(1)}, f_{r(2)}, \dots, f_{r(k)}] = [f_{r1}, f_{r2}, \dots, f_{rs}]' \quad (6)$$

donde $f_{r(j)}$ es la j -ésima columna de F_r y f_{ri} es la i -ésima hilera de F_r escrita como columna.

Para cualquier matriz, aunque aquí se usa F_r expresada por sus hileras, se tiene la siguiente diagonalización:

$$D'(F_r) = \begin{bmatrix} f'_{r1} & 0' & \dots & 0' \\ 0' & f'_{r2} & \dots & 0' \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0' & 0' & \dots & f'_{rs} \end{bmatrix} \quad (7)$$

donde 0 es el vector cero de orden k por 1 . Note que esta matriz es de s hileras por sk columnas.

Para cualquier matriz, aunque aquí, de nuevo, se usa F_r expresada por sus columnas, se tiene la siguiente operación de verticalización:

$$\mathbf{F}_r^v = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{r(1)} \\ \mathbf{f}_{r(2)} \\ \vdots \\ \mathbf{f}_{r(k)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

resultando un vector de orden sk por 1.

A continuación se define una matriz diseño específica con propósitos únicamente algebraicos:

$$\mathbf{D}_{ks} = \begin{bmatrix} \mathbf{1}_k & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1}_k & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{1}_k \end{bmatrix} \quad (9)$$

donde $\mathbf{0}$ es un vector cero de orden k por 1 y $\mathbf{1}_k$ es un vector del mismo orden pero de puros unos . La matriz es de orden sk por s .

Para cualquier vector, aunque aquí usamos el vector $\mathbf{f}_r$, se tiene la siguiente diagonalización:

$$\text{Diag}(\mathbf{f}_r) = \begin{bmatrix} f_{1r} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & f_{2r} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & f_{sr} \end{bmatrix}.$$

Usaremos también la notación $|\mathbf{F}_r - \mathbf{F}_0| = \left\{ |f_{ij} - f_{0ij}| \right\}_{\substack{i=1,2,\dots,s \\ j=1,2,\dots,k}}$

Por último, con respecto a la notación se debe notar, en las medidas que siguen, que éstas son denotadas de igual modo que aquellas donde no se

tiene la distribución de las especies y solo se cuenta con el número total de cada una de ellas, excepto por una d (distribución) que se les antecede para señalar que se refieren a medidas donde existen distribuciones para cada especie. Lo anterior no aplica para los vectores que aparecen en las secciones (4.1.2.1 y 4.1.2.2) ya que éstos no aparecen en las correspondientes secciones (4.1.1.1 y 4.1.1.2).

4.1.2.1 Medidas para un bosque con igual importancia para cada especie y clase.

Las siguientes medidas corresponden a la metodología descrita en 3.7.2.1.

En este caso se tiene $p_{ij} = 1$ para toda $i = 1, 2, \dots, s$ y toda $j = 1, 2, \dots, k$, es decir, todas las clases de todas las especies tienen la misma importancia.

a).- Medidas de lejanía total

Medida de lejanía cuadrática:

$$dl_r^2 = \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^k (f_{rij} - f_{0ij})^2 = [(\mathbf{F}'_r - \mathbf{F}'_0)^v]' [(\mathbf{F}'_r - \mathbf{F}'_0)^v] \quad (4.1.2.1.a1)$$

Medida de lejanía absoluta:

$$|dl_r| = \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^k |f_{rij} - f_{0ij}| = \mathbf{1}'_s |\mathbf{F}_r - \mathbf{F}_0| \mathbf{1}_k \quad (4.1.2.1.a2)$$

b).- Vector de lejanías por especie

Los vectores que se introducen a partir de ahora dentro de la sección (4.1.2) son descripciones parciales de las medidas que les antecedan. Tienen el propósito de considerar la conducta a través del tiempo de cada especie en particular.

Vector de lejanías cuadráticas por especie:

$$\begin{aligned} I_r^2 &= \left(\sum_{j=1}^k (f_{r1j} - f_{01j})^2, \dots, \sum_{j=1}^k (f_{rsj} - f_{0sj})^2 \right)' = ((f_{r1} - f_{01})'(f_{r1} - f_{01}), \dots, (f_{rs} - f_{0s})'(f_{rs} - f_{0s}))' \\ &= [D(F_r) - D(F_0)]' [D(F_r) - D(F_0)] 1_s \end{aligned}$$

(4.1.2.1.b1)

Vector de lejanías absolutas por especie:

$$|I_r| = \left(\sum_{j=1}^k |f_{r1j} - f_{01j}|, \dots, \sum_{j=1}^k |f_{rsj} - f_{0sj}| \right)' = |F_r - F_0| 1_k \quad (4.1.2.1.b2)$$

c).- Índices de lejanía total

Índice de lejanía total cuadrático:

$$dln_r^2 = \frac{\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^k (f_{ij} - f_{0ij})^2}{\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^k f_{0ij}^2} = \frac{dl_r^2}{[(F_0')^V]' [(F_0')^V]} \quad (4.1.2.1.c1)$$

Índice de lejanía total absoluto:

$$|dln_r| = \frac{\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^k |f_{rij} - f_{0ij}|}{\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^k |f_{0ij}|} = \frac{|dl_r|}{\mathbf{1}'_s \mathbf{F}_0 \mathbf{1}_k} \quad (4.1.2.1.c2)$$

d).- Vector de índices de lejanía por especie

Vector de índices de lejanía por especie cuadráticos:

$$\mathbf{ln}_r^2 = \left(\frac{\sum_{j=1}^k (f_{r1j} - f_{01j})^2}{\sum_{j=1}^k f_{01j}^2}, \dots, \frac{\sum_{j=1}^k (f_{rsj} - f_{0sj})^2}{\sum_{j=1}^k f_{0sj}^2} \right)' = \left\{ \mathbf{l}_r'^2 [\mathbf{D}'(\mathbf{F}_0) \mathbf{D}(\mathbf{F}_0)]^{-1} \right\}' \quad (2.1.2.1.d1)$$

Vector de índices de lejanía por especie absolutos:

$$|\mathbf{ln}_r| = \left(\frac{\sum_{j=1}^k |f_{r1j} - f_{01j}|}{\sum_{j=1}^k |f_{01j}|}, \dots, \frac{\sum_{j=1}^k |f_{rsj} - f_{0sj}|}{\sum_{j=1}^k |f_{0sj}|} \right)' = \left\{ |\mathbf{l}_r|' [\mathbf{D}'(\mathbf{F}_0) \mathbf{D}_{ks}]^{-1} \right\}' \quad (4.1.2.1.d2)$$

e).- Índices de comparación total entre los años r y t con $r > t$

Índice de comparación cuadrático:

$$dln_{rt}^2 = \frac{\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^k (f_{rij} - f_{0ij})^2}{\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^k (f_{tij} - f_{0ij})^2} = \frac{dl_r^2}{dl_t^2} = \frac{dln_r^2}{dln_t^2} \quad (4.1.2.1.e1)$$

Índice de comparación absoluto:

$$|dln_{rt}| = \frac{\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^k |f_{rij} - f_{0ij}|}{\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^k |f_{tij} - f_{0ij}|} = \frac{|dl_r|}{|dl_t|} = \frac{|dln_r|}{|dln_t|} \quad (4.1.2.1.e2)$$

f).- Vectores de índices de comparación por especie

Vector de índices de comparación por especie cuadráticos:

$$ln_{rt}^2 = \left(\frac{\sum_{j=1}^k (f_{r1j} - f_{01j})^2}{\sum_{j=1}^k (f_{t1j} - f_{01j})^2}, \dots, \frac{\sum_{j=1}^k (f_{rsj} - f_{0sj})^2}{\sum_{j=1}^k (f_{tsj} - f_{0sj})^2} \right)' = \{l_r^2, \text{Diag}^{-1}(l_t^2)\}' \quad (4.1.2.1.f1)$$

Vector de índices de comparación por especie absoluto:

$$|ln_{rt}| = \left(\frac{\sum_{j=1}^k |f_{r1j} - f_{01j}|}{\sum_{j=1}^k |f_{t1j} - f_{01j}|}, \dots, \frac{\sum_{j=1}^k |f_{rsj} - f_{0sj}|}{\sum_{j=1}^k |f_{tsj} - f_{0sj}|} \right)' = \{|l_r|, \text{Diag}^{-1}|l_t|\}' \quad (4.1.2.1.f2)$$

4.1.2.2 Medidas para un bosque con diferente importancia para cada especie y clase.

Aquí, al igual que cuando sólo teníamos el número total de individuos para cada especie, las expresiones para el caso donde hay diferentes importancias para cada especie y clase se obtienen de aquellas dadas para una misma importancia, sólo que en éstas usamos las matrices F_r y F_0 , y en aquellas

debemos usar las matrices F_r^* y F_0^* . A las nuevas medidas se les debe agregar una p antes de los subíndices o superíndices finales, para señalar las ponderaciones en cada especie y clase. Por ejemplo, tenemos la medida de lejanía total para igual importancia.

$$dl_r^2 = \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^k (f_{rij} - f_{0ij})^2 = \left[(F_r' - F_0')^v \right]' \left[(F_r' - F_0')^v \right].$$

Entonces, para encontrar la expresión correspondiente a diferentes importancias, a la cual en su denotación debemos agregar una p para señalar diferentes ponderaciones, es decir, para encontrar dlp_r^2 , en lugar de usar F_r y F_0 , usamos F_r^* y F_0^* , obteniendo

$$dlp_r^2 = \left[\left(F_r^{*'} - F_0^{*'} \right)^v \right]' \left[\left(F_r^{*'} - F_0^{*'} \right)^v \right] = \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^k \left[p_{ij} (f_{rij} - f_{0ij}) \right]^2$$

Para clarificar la notación se presenta otro ejemplo. Se tiene

$$|dln_r| = \frac{\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^k |f_{rij} - f_{0ij}|}{\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^k |f_{0ij}|} = \frac{|dl_r|}{\mathbf{1}_s' \mathbf{F}_0 \mathbf{1}_k}$$

entonces para encontrar $|dlnp_r|$ lo haríamos del siguiente modo

$$|dlnp_r| = \frac{\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^k p_{ij} |f_{rij} - f_{0ij}|}{\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^k p_{ij} |f_{0ij}|} = \frac{|dlp_r|}{\mathbf{1}_s' \mathbf{F}_0^* \mathbf{1}_k}.$$

Note que en la expresión de $|dln_r|$ se tenía en el numerador a $|dl_r|$, el cual para

diferentes importancias en la expresión de $|dlnp_r|$ fue modificado a $|dp_r|$, que es

$$|dp_r| = \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^k p_{ij} |f_{rij} - f_{0ij}| = \mathbf{1}'_s |\mathbf{F}_r^* - \mathbf{F}_0^*| \mathbf{1}_k$$

siguiendo las consideraciones arriba señaladas. Lo mismo se hace para todas las otras medidas cuando se tienen diferentes importancias.

Sólo para completar se escriben las fórmulas correspondientes a diferentes importancias para cada clase y especie, ya que su construcción como se explicó arriba es muy simple.

a).- Medidas de lejanía total

Medida de lejanía cuadrática:

$$dp_r^2 = \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^k [p_{ij}(f_{rij} - f_{0ij})]^2 = \left[\left(\mathbf{F}_r^* - \mathbf{F}_0^* \right)^{\mathbf{v}} \right]' \left[\left(\mathbf{F}_r^* - \mathbf{F}_0^* \right)^{\mathbf{v}} \right] \quad (4.1.2.2.a1)$$

Medida de lejanía absoluta:

$$|dp_r| = \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^k p_{ij} |f_{rij} - f_{0ij}| = \mathbf{1}'_s |\mathbf{F}_r^* - \mathbf{F}_0^*| \mathbf{1}_k \quad (4.1.2.2.a2)$$

b).- Vectores de lejanías por especie

Vector de lejanías por especie cuadráticas:

$$\begin{aligned}
|p_r^2| &= \left(\sum_{j=1}^k [\rho_{1j}(f_{r1j} - f_{01j})]^2, \dots, \sum_{j=1}^k [\rho_{sj}(f_{rsj} - f_{0sj})]^2 \right)' = ((f_{r1}^* - f_{01}^*)(f_{r1}^* - f_{01}^*), \dots, (f_{rs}^* - f_{0s}^*)(f_{rs}^* - f_{0s}^*))' \\
&= [D(F_r^*) - D(F_0^*)]' [D(F_r^*) - D(F_0^*)] \mathbf{1}_s
\end{aligned}
\tag{4.1.2.2.b1}$$

donde f_{ri}^* y f_{0i}^* son las i -ésimas hileras de F_r^* y F_0^* , respectivamente, escritas como columnas para $i = 1, 2, \dots, s$.

Vector de lejanías por especie absolutas:

$$|p_r| = \left(\sum_{j=1}^k \rho_{1j} |f_{r1j} - f_{01j}|, \dots, \sum_{j=1}^k \rho_{sj} |f_{rsj} - f_{0sj}| \right)' = |F_r^* - F_0^*| \mathbf{1}_k \tag{4.1.2.2.b2}$$

c).- Índices de lejanía total

Índice de lejanía total cuadrático:

$$d \ln p_r^2 = \frac{\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^k [\rho_{ij}(f_{rij} - f_{0ij})]^2}{\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^k (\rho_{ij} f_{0ij})^2} = \frac{d p_r^2}{\left[\left(F_0^{*'} \right)^v \right]' \left[\left(F_0^{*'} \right)^v \right]} \tag{4.1.2.2.c1}$$

Índice a de lejanía total absoluto:

$$|d \ln p_r| = \frac{\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^k \rho_{ij} |f_{rij} - f_{0ij}|}{\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^k \rho_{ij} f_{0ij}} = \frac{|d p_r|}{\mathbf{1}_s' F_0^* \mathbf{1}_k} \tag{4.1.2.2.c2}$$

d).- Vector de índices de lejanía por especie

Vector de índices de lejanía por especie cuadráticos:

$$\ln p_r^2 = \left(\frac{\sum_{j=1}^k [\rho_{1j}(f_{r1j} - f_{01j})]^2}{\sum_{j=1}^k (\rho_{1j} f_{01j})^2}, \dots, \frac{\sum_{j=1}^k [\rho_{sj}(f_{rsj} - f_{0sj})]^2}{\sum_{j=1}^k (\rho_{sj} f_{0sj})^2} \right)' = \left\{ \ln p_r^2' [\mathbf{D}'(\mathbf{F}_0^*) \mathbf{D}(\mathbf{F}_0^*)]^{-1} \right\}' \quad (4.1.2.2.d1)$$

Vector de índices de lejanía por especie absolutos:

$$|\ln p_r| = \left(\frac{\sum_{j=1}^k \rho_{1j} |f_{r1j} - f_{01j}|}{\sum_{j=1}^k \rho_{1j} f_{01j}}, \dots, \frac{\sum_{j=1}^k \rho_{sj} |f_{rsj} - f_{0sj}|}{\sum_{j=1}^k \rho_{sj} f_{0sj}} \right)' = \left\{ |\ln p_r|' [\mathbf{D}'(\mathbf{F}_0^*) \mathbf{D}_{ks}]^{-1} \right\}' \quad (4.1.2.2.d2)$$

e).- Índices de comparación total entre los años r y t con $r > t$

Índice de comparación total cuadrático:

$$d \ln p_{rt}^2 = \frac{\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^k [\rho_{ij}(f_{rij} - f_{0ij})]^2}{\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^k [\rho_{ij}(f_{tij} - f_{0ij})]^2} = \frac{d \ln p_r^2}{d \ln p_t^2} = \frac{d \ln p_r^2}{d \ln p_t^2} \quad (4.1.2.2.e1)$$

Índice de comparación total absoluto:

$$|d \ln p_{rt}| = \frac{\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^k \rho_{ij} |f_{rij} - f_{0ij}|}{\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^k \rho_{ij} |f_{tij} - f_{0ij}|} = \frac{|d \ln p_r|}{|d \ln p_t|} = \frac{|d \ln p_r|}{|d \ln p_t|} \quad (4.1.2.2.e2)$$

f).- Vectores de índices de comparación por especie

Vector de índices de comparación por especie cuadráticos:

$$\ln p_{rt}^2 = \left(\frac{\sum_{j=1}^k [\rho_{1j}(f_{r1j} - f_{01j})]^2}{\sum_{j=1}^k [\rho_{1j}(f_{t1j} - f_{01j})]^2}, \dots, \frac{\sum_{j=1}^k [\rho_{sj}(f_{rsj} - f_{0sj})]^2}{\sum_{j=1}^k [\rho_{sj}(f_{tsj} - f_{0sj})]^2} \right)' = \{ \mathbf{l}p_r^2, \mathbf{Diag}^{-1}(\mathbf{l}p_t^2) \}' \quad (4.1.2.2.f1)$$

Vector de índices de comparación por especie absolutos:

$$|\ln p_{rt}| = \left(\frac{\sum_{j=1}^k \rho_{1j} |f_{r1j} - f_{01j}|}{\sum_{j=1}^k \rho_{1j} |f_{t1j} - f_{01j}|}, \dots, \frac{\sum_{j=1}^k \rho_{sj} |f_{rsj} - f_{0sj}|}{\sum_{j=1}^k \rho_{sj} |f_{tsj} - f_{0sj}|} \right)' = \{ |\mathbf{l}p_r|, \mathbf{Diag}^{-1}(|\mathbf{l}p_t|) \}' \quad (4.1.2.2.f2)$$

4.2 Medidas para totales y distribución de totales de especies para un bosque sin condición ideal y manejo (*segunda alternativa*)

Las medidas que se han desarrollado en esta segunda alternativa se consideran más importantes que las anteriores por su aplicabilidad, ya que, el hombre requiere manipular o conducir el desarrollo de los bosques. Por tal razón se han ideado las medidas que más adelante se desarrollan, éstas ayudarán a evaluar la tendencia del desarrollo de la masa forestal, como también, evaluar el criterio del silvicultor.

4.2.1 Medidas para el número total de árboles por especie

Tenemos, ahora, que sólo se cuenta con los vectores $\mathbf{f}_r$ para varios tiempos r , ya que no se cuenta con una población ideal de referencia. Se sabe que el

número de individuos de una especie no es mejor a medida que es más grande debido a que pueden ser muchos pero todos en condiciones precarias y de competencia tal que unos a otros se obstruyan en su crecimiento. Por ello, se requiere que valoremos la condición del bosque en función de otra característica que represente de mejor forma el vigor y desarrollo de las especies. Una forma, es medir la biomasa de las especies o una función que sea aproximadamente proporcional a ella. Por ejemplo, en especies maderables podría ser la media de la variable combinada D^2H (D: diámetro normal y H: altura total) por el número de individuos, en especies no maderables podría ser la media del diámetro al cuadrado de la copa por el número de individuos y en animales el peso promedio por el número de individuos. Para producción de madera se sabe que el volumen del fuste es proporcional a la variable combinada, por tanto si D^2H representa la media de la variable combinada de la especie maderable, ésta por el número esperado de individuos por hectárea dará una aproximación del volumen medio producido por ella. Para no maderables, si DC es el diámetro de la copa, el valor $(DC)^2$ es proporcional al área proyectada por la copa y ésta a su vez puede tomarse como proporcional a la biomasa aérea de la especie vegetal en cuestión. Además, si tal valor representa el valor medio de la especie, al multiplicarlo por el número esperado de individuos por hectárea se tendrá una medida aproximada de la biomasa producida por dicha especie. Lo mismo puede decirse de los pesos en especies animales.

Estas medias pueden ser cuestionadas en cuanto a su validez para determinar una cantidad proporcional de la biomasa producida por la especie después de multiplicarla por el número de individuos, sin embargo, no se dice que deban tomarse éstas, se dice que se busquen variables cuyos valores medios multiplicados por el número de individuos produzcan estimaciones aproximadas de la biomasa promedio producida por cada especie.

En lo que sigue se arreglan en un vector $\mathbf{m}_r = (m_{1r}, \dots, m_{sr})'$ las medias en el tiempo r de las variables antes mencionadas.

La notación introducida antes, en las secciones (4.1.1 y 4.1.2), será usada sin más aclaración en lo que resta del capítulo. Sólo se explicará la nueva notación que sea introducida.

4.2.1.1 Medidas para el número total de árboles por especie con la misma importancia para cada una de ellas.

a).- Tamaño del bosque.

Una medida del bosque estaría dada por cualquier función simétricamente monótona (monótona en cada coordenada manteniendo las demás fijas) de las coordenadas del vector $\mathbf{f}_r$ y $\mathbf{m}_r$, por ejemplo, una de ellas es

$$b_r = \mathbf{f}_r' \mathbf{m}_r = \sum_{i=1}^s m_{ir} f_{ir} \quad (4.2.1.1.a)$$

Se pueden tener otras pero se usará ésta. Es claro que a medida que este tamaño del bosque aumente o permanezca constante se podría considerar al mismo sustentable, de otro modo no lo será.

b).- Índice de comparación de tamaños del bosque entre los años r y t ($r > t$).

$$b_{rt} = b_r / b_t \quad (4.2.1.1.b)$$

Si se analiza a $b_{t+1,t}$ es razonable pensar que esta sucesión tiene como polo de atracción al uno, es decir, $\lim_{t \rightarrow \infty} b_{t+1,t} = 1$, además, de no haber impactos negativos significativos o intervenciones, se puede esperar que sea monótona creciente. Así, mientras crezca o permanezca constante no se considera al bosque no sustentable en el periodo que no se intervenga.

Si después de un periodo largo de tiempo T el bosque se interviene para aprovechar algunos individuos de ciertas especies o por alguna labor silvícola o faunística, en 4.2.1.1.a y 4.2.1.1.b se puede usar la medida b_r / b_T , $r > T$, para monitorear la conducta del bosque, la cual en tanto sea creciente o constante indicará la [posible] sustentabilidad del mismo.

Este índice de comparación también puede manejarse respecto al tamaño del bosque en un año determinado o base. Es decir, si el año base es T_0 , se puede analizar la sucesión $b_{rT_0} = b_r / b_{T_0}$, la cual mientras sea creciente o constante apoyará la idea de la posible sustentabilidad del bosque.

4.2.1.2 Medidas para el número total de árboles por especie con diferente importancia para cada una de ellas.

En las medidas que se presentan, cuando se considera a las especies con diferente importancia, se agrega la información de $\mathbf{p}' = (p_1, p_2, \dots, p_s)$ a los vectores $\mathbf{f}_r$ y $\mathbf{m}_r$ para construir las siguientes medidas.

a).- Tamaño del bosque:

$$bp_r = \sum_{i=1}^s p_i m_{ir} f_{ir} = \mathbf{f}_r \mathbf{Diag}(\mathbf{p}) \mathbf{m}_r \quad (4.2.1.2.a)$$

La anterior medida es una forma bilineal en la matriz:

$$\mathbf{Diag}(\mathbf{p}) = \begin{bmatrix} p_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & p_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & p_s \end{bmatrix}$$

cuya forma facilita el cálculo de los diferentes valores asociados a ella.

La medida, como b_r , es simétricamente creciente en las coordenadas de $\mathbf{f}_r$ y $\mathbf{m}_r$, por tanto, mientras crezca o sea constante habrá una acumulación de biomasa en el bosque o al menos se mantendrá en cierto punto permitiendo asignar la propiedad de sustentabilidad al sistema biológico bajo estudio.

b).- Índice de comparación de tamaños del bosque entre los años r y t ($r > t$):

$$bp_{rt} = bp_r / bp_t \quad (4.2.1.2.b)$$

Las medidas b_{rt} y bp_{rt} comparten las mismas propiedades y se pueden usar del mismo modo.

4.2.2 Medidas para la distribución del número total de árboles por especie.

Las medidas que se presentan a continuación, serán de utilidad cuando el silvicultor del bosque desea considerar la distribución de las especies, nombrando alguna variable que la represente de mejor forma. Como se ha venido haciendo se consideran los casos en que las especies tienen igual o diferente importancia.

Se cuenta con F_r y se tiene que introducir la matriz:

$$\mathbf{M}_r = \begin{bmatrix} m_{r11} & m_{r12} & \cdots & m_{r1k} \\ m_{r21} & m_{r22} & \cdots & m_{r2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{rs1} & m_{rs2} & \cdots & m_{rsk} \end{bmatrix} = \{m_{rij}\}_{i=1,2,\dots,s}^{j=1,2,\dots,k}$$

donde m_{rij} representa el valor medio de la variable utilizada en la i -ésima especie de modo que multiplicada por f_{rij} estime aproximadamente la biomasa producida en la j -ésima clase de ésta especie hasta el tiempo r .

4.2.2.1 Mediadas para un bosque con igual importancia para cada especie y clase.

a).- Tamaño total del bosque.

$$db_r = \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^k f_{rij} m_{ij} = (\mathbf{F}_r' \mathbf{V})' (\mathbf{M}_r' \mathbf{V}) \quad (4.2.2.1.a)$$

b).- Vector de tamaños por especie.

$$\mathbf{b}_r = \left(\sum_{j=1}^k f_{r1j} m_{r1j}, \dots, \sum_{j=1}^k f_{rsj} m_{rsj} \right)' = (\mathbf{f}_{r1}' \mathbf{m}_{r1}, \dots, \mathbf{f}_{rs}' \mathbf{m}_{rs})' = \mathbf{D}'(\mathbf{F}_r) \mathbf{D}(\mathbf{M}_r) \mathbf{1}_s \quad (4.2.2.1.b)$$

c).- Índice de comparación de tamaños del bosque entre los años r y t ($r > t$).

$$db_{rt} = db_r / db_t \quad (4.2.2.1.c)$$

d).- Vector de índices de comparación por especie.

$$\mathbf{b}_{rt} = \left(\frac{\sum_{j=1}^k f_{r1j} m_{r1j}}{\sum_{j=1}^k f_{t1j} m_{t1j}}, \dots, \frac{\sum_{j=1}^k f_{rsj} m_{rsj}}{\sum_{j=1}^k f_{tsj} m_{tsj}} \right)' = \left\{ \mathbf{b}_r' \text{Diag}^{-1}(\mathbf{b}_t) \right\}' \quad (4.2.2.1.d)$$

4.2.2.2 Medidas para un bosque con diferente importancia para cada especie y cales.

Se cuenta ahora con $\mathbf{P}$ además de $\mathbf{F}_r$ y $\mathbf{M}_r$.

a).- Tamaño total del bosque.

$$dbp_r = \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^k f_{ij} p_{ij} m_{ij} = (\mathbf{F}_r' \mathbf{V})' [\text{Diag}(\mathbf{P} \cdot \mathbf{V})] (\mathbf{M}_r' \mathbf{V}) \quad (4.2.2.2.a)$$

b).- Vector de tamaños por especie.

$$\mathbf{b}p_r = \left(\sum_{j=1}^k f_{r1j} p_{1j} m_{r1j}, \dots, \sum_{j=1}^k f_{rsj} p_{sj} m_{rsj} \right)' = (\mathbf{f}_{r1}^* m_{r1}, \dots, \mathbf{f}_{rs}^* m_{rs})' = \mathbf{D}'(\mathbf{F}_r^*) \mathbf{D}(\mathbf{M}_r) \mathbf{1}_s \quad (4.2.2.2.b)$$

c).- Índice de comparación de tamaños del bosque entre los años r y t ($r > t$).

$$dbp_{rt} = dbp_r / dbp_t \quad (4.2.2.2.c)$$

d).- Vector de índices de comparación por especie.

$$\mathbf{b}p_{rt} = \left(\frac{\sum_{j=1}^k f_{r1j} p_{1j} m_{r1j}}{\sum_{j=1}^k f_{t1j} p_{1j} m_{t1j}}, \dots, \frac{\sum_{j=1}^k f_{rsj} p_{sj} m_{rsj}}{\sum_{j=1}^k f_{tsj} p_{sj} m_{tsj}} \right)' = \{\mathbf{b}p_r' \text{Diag}^{-1}(\mathbf{b}p_t)\}' \quad (4.2.2.2.d)$$

4.3 Medidas para totales y distribuciones de totales de especies para un bosque con una condición ideal y manejo (*tercera alternativa*)

Esta tercera alternativa es considerada como la más importante del trabajo, ya que representa una situación, donde se mantiene una condición ideal a

través del tiempo, por medio de prácticas silvícolas como lo indica la silvicultura.

Las diferentes medidas de esta sección son exactamente las mismas presentadas en la sección (4.2) por lo que no se repiten.

V CONCLUSIONES

En México se cuenta con información muy limitada o inexistente para realizar este tipo de evaluaciones por lo que se requiere iniciar su colección.

De las medidas desarrolladas para las diferentes alternativas se consideran a las de la primera como las menos importantes ya que la situación es irreal y sólo se introdujo para explicitar la conceptualización del problema.

Las medidas ó índices que se han desarrollado en el presente trabajo se consideran de utilidad, principalmente las desarrolladas en la segunda y tercera alternativa, por considerárseles adaptables a situaciones reales. Lo anterior si se desea evaluar conjuntamente los efectos de las decisiones tomadas por el silvicultor y los asociados a las externalidades. Si, adicionalmente, se cuenta con el seguimiento de los elementos operacionales y las variables físicas se podrá discriminar de donde provienen estos efectos al encontrar indicios de no sustentabilidad y proceder a su corrección.

Para hacer uso de las medidas, en bosques (compuestos principalmente por especies de lento crecimiento) que actualmente tengan algún seguimiento del

sistema de manejo, se requiere la información de los incrementos en el crecimiento para detectar si hay o no indicios de no sustentabilidad. Por supuesto se requiere información suficiente para tener posibilidad de usar las medidas propuestas que mejor convengan. En caso de no tenerse la información necesaria, se deberá establecer un estudio y seguir la metodología que se presenta para cada alternativa si así se considera.

Sobre el uso de las medidas en los bosques compuestos en su mayoría por especies de rápido crecimiento se puede decir lo mismo que en el inciso anterior, excepto que si se carece de información es posible proyectar un monitoreo en un periodo corto, con pequeños intervalos de evaluación, de modo que permita obtener resultados en forma más rápida y evaluar las condiciones de desarrollo del bosque.

La desventaja que se presenta para hacer uso de las medidas desarrolladas, es que generalmente requieren de una base de datos que comprenda un periodo de estudio en el bosque bajo manejo bastante amplio, ya que los bosques mexicanos son generalmente de clima templado-frío, formados por especies comercialmente importantes pero de lento crecimiento. Sin embargo, es una característica propia de estos sistemas no de las medidas.

A riesgo de ser repetitivo debemos enfatizar que aunado al uso de las medidas, se requiere el monitoreo de los elementos operacionales y las

variables físicas más relevantes del sitio en estudio, como se ha señalado en la metodología, ya que si no se tiene referencia del comportamiento de estos, no será posible determinar las causas que estén afectando negativamente el desarrollo del ecosistema para proceder a su corrección. Esto debe realizarse conjuntamente con las evaluaciones que se hagan de la biomasa.

Se considera que los tres casos desarrollados en el apartado de impactos negativos temporales en el tamaño del bosque, con aplicación para las alternativas que implican manejo del bosque con o sin condición ideal, deben usarse para estandarizar la serie de datos con que se trabaje de modo que los elementos de la misma sean comparables sección (3.9).

La forma de evaluación de la sustentabilidad de un sistema forestal debe ser como se analizó en la sección (3.10), es decir, basada sobre el comportamiento de las tasas de crecimiento de la biomasa, indistintamente de la forma que se use para compararlas.

Una opción que se ha desarrollado, para el caso en que no se tenga información histórica del bosque, es establecer parcelas modelo de comparación. Estas deben establecerse al mismo tiempo que las de muestreo, pero ser independientes a ellas. Deben recibir las mismas prácticas silvícolas controladas que se den al bosque. Aunque no es el mejor marco de comparación, éstas permiten evaluar el daño que un bosque está sufriendo por

las prácticas no controladas realizadas dentro y fuera de él. Esta alternativa se considera, para los fines de este trabajo, como una forma aceptable de evaluar la sustentabilidad sino se cuenta con datos históricos.

Por último, estas medidas aunque simples, de contar con la información pertinente son instrumentos ponderados para la toma de decisiones. Además, en México poco se tiene para la implementación práctica de este concepto, denominado sustentabilidad.

VI LITERATURA CITADA

- Barnett, V., A. E. Johnston, S. Landau, R. W. Payne, S. J. Welham, and A.I. Rayner. 1995. Sustainability-The Rothamsted Experience. *In: Agricultural Sustainability, Economic, Environmental, and Statistical Considerations*. Barnett V., Payne R. and Steiner R. (eds.). 1995. John Wiley & Sons. New York. pp 171-206
- Brown, J. R., D. D. Osburn, D. Readhage and C. J. Gantzer. 1995. Multi-crop Comparisons on Sanborn Fields Missouri, USA *In Agricultural Sustainability, Economic, Environmental and Statistical Considerations*, Barnett V., R. Payner and R. Steiner. (eds.). 1995. John Wiley & Sons, New York. pp: 111-131
- Cassman, K. G., R. W. Steiner, and A. E. Johnston. 1995. Long-term Experiments and Productivity Indexes to Evaluate the Sustainability of Cropping Systems. *In: Agricultural Sustainability, Economic, Environmental and Statistical Considerations*. Barnett V., Payner R. and Steiner.R. (eds.). 1995. John Wiley & Sons, New York. pp: 231-243
- Diewert, W. E. 1989. The Measurement of Productivity, Discussion paper 89-04, Department of Economics, University of British Columbia. pp:31
- FAO. 1988. Aspects of FAO policies, programmes, budget and activities animed at contributing to sustainable development. FAO Council paper . pp:133
- Faeth, P., R. Repetto, K. Kroll, Q. Dai, and G. Helmers. 1991. Paving the farm bill: U.S. Agricultural Policy and the Transition to Sustainable Agriculture, World, Resources Institute, Washington. pp: 4

- Franklin, F. J. 1995. Sustainability of Managed Temperate Forest Ecosystems. *In: Defining and Measuring Sustainability*. Munasinghe M. and Shearer W. (eds.). 1995. the United Nations University (UNU) and The World Bank, Washington. 439pp
- Gollop, F.. M., and D. W. Jorgenson. 1980. U.S. Productivity Growth by Industry, 1947-1973. *In: New Developments in Productivity Measurement and Analysis*. Kenricks, J. W. and Vaccara, B. N. (eds.). 1980. University of Chicago Press for the N.B.E.R., Chicago. pp:130
- Gow, D. D. 1992. Aspectos sociales de la ordenación forestal para el desarrollo sostenible. *In: Sostenibilidad*. Unasyuva. (ed.). 1992. vol 43(169): pp: 34-40
- Herd, R. W., and J. K. Lynam. 1992. Sustainable Development and the Changing Needs of International Agricultural Research. *In: Assessing the Importance of International Agricultural Research for Sustainable Development*. Lee, D. R., Kears, S., Uphoff, N. (eds.). 1992. Symposium proceedings at Cornell University.
- Herd, R. W. and R. A. Steiner. 1995. Agricultural Sustainability: Concepts and Conundrums. *In: Agricultural Sustainability, Economic, Environmental and Statistical Considerations*. Barnett V., Payner R. and Steiner R. (eds.). 1995. John Wiley & Sons, New York. pp: 3-12
- Kemp, H. R. 1992. Conservación de los recursos genéticos en la ordenación de los bosques tropicales. *In: Sostenibilidad*. Unasyuva. 43(169): pp:34-40
- Lynam, J. K. and R. W. Herd. 1989. Sense and Sustainability: sustainability as an objective in international agriculture research. *J. Agric. Econ.*, 3, pp:381-398
- Maddala, G. S. y E. Miller. 1993. Micro-economía. Mc-GRAW HILL. México. 649pp

- Maini, S. J. 1992. Desarrollo sostenible de los bosques. *In: Sostenibilidad. Unasyva.* 43(169): pp: 41-45
- Munasinghe, M. and W. Shearer. 1995. Defining and Measuring Sustainability, The United Nations University (UNU) and World Bank. 440pp
- Nambiar, K. K. M. 1995. Major Cropping Systems. *in: India. In Agricultural Sustainability, Economic, Environmental and Statistical Considerations.* Barnett V., Payner R. and R. Steiner. (eds.). 1995. John Wiley & Sons, New York. pp: 133-168
- Rayner, I. A. and S. J. Welham. 1995. Economic and Considerations in the Measurement of Total Factor Productivity (TFP). *In: Agricultural Sustainability, Economic, Environmental and Statistical Considerations.* Barnett V., Payner R. and Steiner R. (eds.). 1995. John Wiley & Sons, New York. pp: 23-38
- Steiner, A. R., L. McLaughlin, P. Faeth, and R. R. Janke. 1995. Incorporating Externality Costs into Productivity Measures: A Case Study Using US Agriculture. *In: Agricultural Sustainability, Economic, Environmental and Statistical Considerations.* Barnett V., Payner R. and Steiner R. (eds.). 1995. John Wiley & Sons, New York. pp: 209-229
- Traxler, G., J. Novak, C. C. Mitchell, and M. Runge. 1995. Long-term Cotton Productivity Under Organic, Chemical, and No Nitrogen Fertilizer Treatments, 1896 to 1992. *In: Agricultural Sustainability, Economic, Environmental and Statistical Considerations.* Barnett V., R. Payner, and R. Steiner. (eds.). 1995. John Wiley & Sons, New York. pp: 41-60
- World Commission on Environment and Development. 1987 Our Common Future, OUP, Oxford. pp:1
- Young, A. R. 1991. Introducción a las Ciencias Forestales. Universidad de Wisconsin.. Limusa. 632pp