



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

RENTABILIDAD DE UNA PLANTACIÓN FORESTAL PARA GENERAR
SERVICIOS AMBIENTALES EN EL PARQUE NACIONAL NEVADO
DE TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO.

T E S I S

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

P R E S E N T A

ADRIÁN HERNÁNDEZ HERRERA

Chapingo, Texcoco, Estado de México
Noviembre de 2005



**“RENTABILIDAD DE UNA PLANTACIÓN FORESTAL PARA GENERAR
SERVICIOS AMBIENTALES EN EL PARQUE NACIONAL NEVADO
DE TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO.”**

Tesis realizada por **Adrián Hernández Herrera** bajo la dirección del Comité Asesor indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

DIRECTOR:


DR. JORGE A. TORRES PÉREZ

ASESOR:


Ph. D. HUGO RAMÍREZ MALDONADO

ASESOR:


Ph. D. LAURA A. IBÁÑEZ CASTILLO

Chapingo, Texcoco, Estado de México
Noviembre de 2005

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo incondicional que instituciones y amigos me han brindado y es mi deseo expresar mi mas cumplido agradecimiento a:

La Universidad Autónoma Chapingo mi “alma mater”, la cual a través de la Coordinación de Postgrado de la División de Ciencias Forestales, me dio la oportunidad de emprender y concluir mi formación académica de postgrado.

El Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por brindarme el apoyo económico para la realización de mis estudios de Postgrado.

Al Gobierno del Estado de México, el cual a través del Organismo Público Descentralizado PROBOSQUE y sus Directivos, Ing. Carlos Sedano, Ing. Santiago Zepeda, Ing. Gilberto Galeote, Ing. Vicente Peña, Lic. José González, Ing. Rubén Huerta e Ing. Alfredo Arciniega, tuvieron la bondad de apalancar mi proyecto de postgrado.

Dr. Jorge A. Torres Pérez, por la dirección, paciencia, sugerencias y consejos para el desarrollo del programa de postgrado y la dirección de esta tesis.

Ph. D. Hugo Ramírez Maldonado, en quién reconozco su gran calidad humana y su amplia sabiduría; por aceptar asesorar el desarrollo de este trabajo y sus atinadas sugerencias para mejorarlo en todo lo posible.

Ph. D. Laura A. Ibáñez Castillo, quién además de haberme trasmitido sus conocimientos, se ha esmerado con la revisión y sugerencias para que este trabajo sea de utilidad a la sociedad.

Ph. D. J. Ciro Hernández Díaz, quién fue siempre un consejero experto para el inicio y conclusión de mi programa de postgrado, además ha revisado minuciosamente y sugerido las apreciaciones necesarias para obtener un buen resultado.

Ph. D. Francisco Zamudio Sánchez, un maestro excepcional comprometido con la formación académica de sus alumnos; a quien reconozco, respeto y aprecio.

M. en C. Ángel Leyva Ovalle, Director de la División de Ciencias Forestales, por todos sus apoyos y amistad brindados.

Ing. Francisco Javier Gómez García y familia, por el apoyo aportado de manera amistosa y comprometida para la obtención de los datos de campo y brindarme un espacio en el seno familiar.

Ing. Víctor A. Márquez Zambrano, especialmente por su apoyo en el levantamiento de los datos de campo y sus conocimientos prácticos para realizar el estudio dasométrico de la plantación estudiada.

Al despacho de consultoría forestal y técnicos del mismo "AGROSILVO 2000", por la información y apoyos aportados para este trabajo.

A los productores forestales del Estado de México, quienes me han tenido en su consideración a través de la Mesa Directiva de su Organización.

A mis compañeros y amigos del programa de maestría.

A todas aquellas personas e Instituciones que me han apoyado y que de manera involuntaria haya omitido su mención

"...la práctica termina por asesinar a la teoría"
A. Einstein.

DEDICATORIA

Con gratitud, aprecio y respeto, quiero dedicar esta Tesis a :

Mis padres: M^a. Concepción y Aureliano

Quienes han librado una “batalla” en su lucha incansable por su única pretensión: “que sus hijos alcancen sus sueños y puedan encontrar un futuro mejor”; mis mejores amigos y creadores de “mi universo....”

“Dios los Bendiga siempre”
¡ Gracias ...!

† Sr. Santos Hdez. y † Sra. Sofía D.

(En mi memoria por siempre)

Mi amada esposa Vero y nuestros hermosos niños: Leonardo y Carolina

Ellos tuvieron el valor de asumir los retos que ésta etapa de la vida nos impuso, siempre convencidos de emprender nuevos proyectos para el crecimiento familiar; refrendo mi agradecimiento por su apoyo y este documento será constancia de su gran esfuerzo.

“La vida me ha dado una gran satisfacción por ser ustedes mi familia, por ello, agradezco a Dios haberme puesto en su camino..... ¡ los amo !

Mis hermanos: Hilario, Cirilo, Miguel Ángel, Rosa M^a. y Aureliano

Con el cariño que siento por ellos y **reitero**, por el recuerdo de nuestra niñez que siempre nos mantendrá unidos y por que hemos sido y seremos por siempre una gran familia.

Ph. D. J. Ciro Hernández D. y Familia:

Si existen los ejemplos para entender el concepto de la vida, usted me ha puesto uno muy en alto...

Quiero que siempre me tengan en su consideración...,

A todos ustedes:

¡ Muchas Gracias !

Adrián.

DATOS BIOGRAFICOS

El autor nació el 09 de febrero de 1970 en el poblado de Nuevo Porvenir, Municipio de Nuevo Ideal, Estado de Durango.

Realizó estudios de educación primaria de 1976 a 1982 en su poblado natal, de 1982 a 1985 realizó estudios de secundaria en la Cabecera Municipal.

En agosto de 1985, ingresó a la preparatoria agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo, concluyó en junio de 1988, posteriormente en la División de Ciencias Forestales de la misma Universidad, desarrolló estudios de licenciatura de Ingeniero Forestal con Orientación en Economía y Ordenación; egresó en junio de 1992.

De 1992 a 1993, consultor en la empresa Genética Forestal S. de R. L. de C. V.

De 1993 a 1994 prestó servicios en asesoría e investigación en el Departamento de Plantaciones Forestales y el Departamento de Desarrollo de la Industria Forestal, en la Dirección de Política Forestal de la Subsecretaría Forestal y de la Fauna Silvestre, SARH.

En 1995 técnico en reforestación, contratado para atender el programa de reforestación en la zona norte del Estado de México, por la Comisión Coordinadora de Conservación Ecológica de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México – BID.

De 1996 a 1997, Subdelegado de Fomento de la Producción Forestal en la Delegación Regional Forestal VIII-Jilotepec, PROBOSQUE – Gobierno del Estado de México.

De 1997 a 1998, asumió la Subdelegación de Fomento de la Producción Forestal en la Delegación Regional Forestal VII-Valle de Bravo, PROBOSQUE – Gobierno del Estado de México.

De 1998 a 2002, Delegado Regional Forestal, en la Delegación Regional Forestal I-Toluca, PROBOSQUE – Gobierno del Estado de México.

En 2002, Delegado Regional Forestal, en la Delegación Regional Forestal IV-Tejupilco, PROBOSQUE – Gobierno del Estado de México.

De 2002 a 2003, fue nombrado Técnico en Dictaminación de Programas de Manejo Forestal, en la Dirección de Fomento de la Producción Forestal, PROBOSQUE – Gobierno del Estado de México.

De 2003 a 2005, desarrolló estudios de Postgrado en la División de Ciencias Forestales, de la Universidad Autónoma Chapingo.

CONTENIDO

	Página
AGRADECIMIENTOS	<i>i</i>
DEDICATORIA	<i>iii</i>
DATOS BIOGRÁFICOS	<i>iv</i>
CONTENIDO	<i>v</i>
ÍNDICE DE CUADROS	<i>viii</i>
ÍNDICE DE FIGURAS	<i>x</i>
RESUMEN	<i>xi</i>
ABSTRACT	<i>xi</i>
1. PRESENTACIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	3
1.2.1. Objetivo General.....	3
1.2.2. Objetivos Particulares.....	3
1.3. HIPÓTESIS.....	3
2. DESCRIPCIÓN DEL AREA DE ESTUDIO	4
3. CAPTURA DE CARBONO POR LA VEGETACIÓN	8
3.1. ANTECEDENTES.....	8
3.1.1. Estimaciones de Almacenamiento de Carbono en Vegetación.....	9
3.1.2. Consideraciones del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC).....	18
3.1.3. Los Preceptos del Protocolo de Kyoto.....	18
3.1.4. El Mercado de los Servicios Ambientales.....	20
3.2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	24
3.2.1. Información de Campo.....	24
3.2.1.1. Descripción de la Plantación de Estudio.....	26
3.2.1.2. Estudio Dasométrico.....	27
3.2.1.3. Biomasa Aérea y Biomasa en Raíces de la Vegetación....	30
3.2.1.4. Biomasa en el Mantillo.....	33
3.2.1.5. Crecimiento y Acumulación de Biomasa.....	36
3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
3.3.1. Capacidad de Carga del Sitio.....	38

3.3.2. Rentabilidad Económica por Captura de Carbono.....	46
3.3.2.1. Beneficios Esperados.....	46
3.3.2.2. Costos de Establecimiento y Mantenimiento.....	49
3.3.2.3. Análisis de Rentabilidad.....	52
3.4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	55
3.4.1. Conclusiones.....	55
3.4.2. Recomendaciones.....	57
3.5. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA.....	59
4. CAPTACIÓN Y RETENCIÓN DE AGUA DE LLUVIA	62
4.1. ANTECEDENTES.....	62
4.1.1. El Ciclo Hidrológico y sus Implicaciones en la Distribución del Agua.....	63
4.1.2. Estimaciones de Infiltración de Agua por Efecto de la Vegetación.....	65
4.1.3. Consideraciones de Hidrología Superficial.....	76
4.1.4. Balance Hídrico de una Cuenca.....	80
4.2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	85
4.2.1. Régimen de Precipitación.....	86
4.2.2. Evapotranspiración Potencial.....	86
4.2.3. Coeficiente de Escurrimiento.....	87
4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	88
4.3.1. Capacidad de Retención de Agua por la Plantación.....	88
4.3.2. Rentabilidad Económica por Retención de Agua.....	92
4.4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	95
4.4.1. Conclusiones.....	95
4.4.2. Recomendaciones.....	97
4.5. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA.....	99
5. PRODUCCION MADERABLE.....	101
5.1. ANTECEDENTES DE EVALUACIÓN ECONÓMICA DE PLANTACIONES.....	101
5.2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	103
5.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	104
5.4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	106

5.4.1. Conclusiones.....	106
5.4.2. Recomendaciones.....	107
5.5. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA.....	109
6. CONCLUSIONES GENERALES.....	110
7. ANEXOS.....	113
7.1. DATOS DE CAMPO OBTENIDOS EN LA PLANTACIÓN DE ESTUDIO....	113
7.2. CONSTRUCCIÓN DE LA HECTAREA TIPO CON BASE EN DATOS OBTENIDOS DEL MUESTREO.....	118
7.3. ESTIMACIÓN DE BIOMASA EN EL MANTILLO.....	119
7.4. PROMEDIO DE VARIABLES OBSERVADAS EN ÁRBOLES DOMINANTES.....	120
7.5. OBTENCIÓN DE INDICADORES FINANCIEROS DE CAPTURA DE CARBONO, UTILIZANDO UN PRECIO DE \$900.00/TON DE CARBONO CAPTURADA.....	121
7.6. OBTENCIÓN DE INDICADORES DE CAPTACIÓN Y RETENCIÓN DE AGUA, UTILIZANDO UN PRECIO DE \$210.00/MILLAR DE m ³ INFILTRADOS.....	122

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro No. 1. Porcentaje aproximado de biomasa contenida en las estructuras vegetativas en árboles de distintos tipos de bosques.....	13
Cuadro No. 2. Totales de número de árboles y volumen maderable arrojado en la muestra y proyección a la hectárea.....	28
Cuadro No. 3. Distribución de biomasa y contenido de carbono en distintas estructuras del arbolado de la plantación de estudio.....	32
Cuadro No. 4. Contenido de carbono estimado por el factor de expansión de biomasa de FAO-IPCC (1.3), partiendo del volumen maderable..	32
Cuadro No. 5. Constantes de descomposición por tipo de tejido.....	35
Cuadro No. 6. Estimación de altura, diámetro, número de árboles y volúmenes por hectárea de acuerdo a la edad del arbolado.....	42
Cuadro No. 7. Proyección de biomasa acumulada a la capacidad de carga del sitio, con índices de distribución propuestos por Cooper (1982).....	45
Cuadro No. 8. Proyección de biomasa y carbono acumulados a la capacidad de carga del sitio, mediante el factor de expansión de FAO e IPCC.....	45
Cuadro No. 9. Proyección de captura y acumulación de carbono mediante índices de Cooper (1982) y su valor económico.....	47
Cuadro No. 10. Proyección de captura y acumulación de carbono por el factor de expansión de FAO e IPCC y su valor económico.....	48
Cuadro No. 11. Estimación de rentabilidad de producción de servicios ambientales por captura de carbono con base a los indicadores de distribución de biomasa de Cooper (1982).....	52
Cuadro No. 12. Estimación de rentabilidad de producción de servicios ambientales por captura de carbono con base al factor de expansión de biomasa propuesto por FAO-IPCC.....	53
Cuadro No. 13. Pérdidas por Intercepción (I) estimadas como un porcentaje de la lluvia (P) gruesa anual, para distintas especies de vegetación.....	72

Cuadro No. 14. Clasificación de tipo de suelos.....	84
Cuadro No. 15. Valores del factor K, en función del tipo y uso del suelo.....	85
Cuadro No. 16. Normales climatológicas de la estación 15062 “Nevado de Toluca”.....	86
Cuadro No. 17. Cálculo de la evapotranspiración en el área de estudio.....	87
Cuadro No. 18. Cálculo del coeficiente de escurrimiento superficial.....	88
Cuadro No. 19. Cálculo del volumen de pérdida de agua por evapotranspiración.....	89
Cuadro No. 20. Volumen precipitado, evapotranspirado, escurrido e infiltrado los tres últimos en función de la edad del arbolado.....	90
Cuadro No. 21. Cálculo de volúmenes escurrido mensualmente, en función de la proporción de lluvia mensual.....	91
Cuadro No. 22. Balance hídrico mensual y anual.....	91
Cuadro No. 23. Estimación de rentabilidad de producción de servicios ambientales por captación de agua.....	93
Cuadro No. 24. Volumen maderable acumulado en la plantación y valor comercial en el mercado.....	104
Cuadro No. 25. Estimación de rentabilidad por producción maderable.....	105

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura No. 1. Ubicación Geográfica del “Parque Nacional Nevado de Toluca”..	7
Figura No. 2. Representación esquemática de estructuras morfológicas de árboles posible de relacionar en un modelo.....	11
Figura No. 3. Curva de crecimiento y acumulación de volumen maderable, representativa de la capacidad de carga del sitio.....	44
Figura No.4. Descripción esquemática de las fases del ciclo hidrológico.....	64
Figura No. 5. El “ciclo hidrológico forestal”	66

RENTABILIDAD DE UNA PLANTACIÓN FORESTAL PARA GENERAR SERVICIOS AMBIENTALES EN EL PARQUE NACIONAL NEVADO DE TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO

PROFITABILITY OF A FOREST PLANTATION TO GENERATE ENVIRONMENTAL SERVICES AT THE NEVADO DE TOLUCA NATIONAL PARK IN THE STATE OF MEXICO

Adrián Hernández Herrera¹

Jorge A. Torres Pérez²

RESUMEN

Se realizó un análisis de rentabilidad para evaluar la capacidad de plantaciones forestales con fines de restauración de suelos, para generar servicios ambientales específicos de captura de carbono, así como la capacidad para retener e infiltrar agua de lluvia por la vegetación establecida conforme a la cobertura del dosel; para referencia, se estimó el valor económico de la producción maderable, en una superficie de 38 hectáreas de plantaciones.

Con el uso de modelos de crecimiento para *Pinus montezumae*, fueron estimados los volúmenes de producción maderable y su proyección en biomasa aérea y de raíces, con factores de distribución propuestos por algunos autores.

Los beneficios de captura de carbono y los indicadores de rentabilidad generados, muestran que el establecimiento de plantaciones para estos propósitos no es rentable con los precios y condiciones del mercado actuales; para lograr la rentabilidad en la producción de este servicio se requeriría que el precio de la tonelada de carbono capturada fuera del orden de \$900.00.

Para evaluar el servicio de retención e infiltración de agua, se estimó la cantidad de agua infiltrada respecto a la edad de la plantación y la cobertura del dosel, obteniendo para ello un balance hídrico anual.

Con los ingresos e indicadores de rentabilidad estimados, se observa que el establecimiento de plantaciones para generar éste servicio no es rentable bajo la estructura actual del mercado, en éste caso, es necesario un precio de \$210.00/millar m³ infiltrados, precio que paga la industria por el uso de agua para sus procesos.

En producción maderable, se encontró en la plantación estudiada que no existe el potencial de productividad que haga rentable el establecimiento de plantaciones en esta zona.

Con estos resultados, es evidente la necesidad de operación y financiamiento de proyectos y actividades simultáneas para el manejo y mantenimiento del área natural protegida.

Palabras Clave: Servicios ambientales, rentabilidad forestal, captura de carbono, infiltración y balance hídrico.

ABSTRACT

An analysis of the income-yield capacity was made to evaluate the capacity of forest plantations to restore the soils in order to generate specific environmental service benefits related to carbon sequestration by means of growing and accumulating biomass in the trees, and to also increase the capacity of the vegetation and canopy cover for the retention and penetration of rainfall. As a point of reference, the economic value of wood production was estimated on 38 hectares of plantations.

Wood volume, using growth models for *Pinus montezumae*, and its projected aerial and root biomass, was estimated along with distribution factors proposed by other authors.

The benefits from carbon sequestration and the income-yield indicators show that establishing plantations towards these ends is not profitable under the present market prices and conditions; in order for this activity to be profitable, the price of sequestered carbon must be \$900.00 per ton.

To evaluate the utility of the retention and penetration of water, the amount of water infiltrated with respect to age of the plantation and the canopy cover were measured, in order to thereby obtain an annual water balance.

The obtained income and its generated profit indicators show that the establishment of plantations to generate this utility is not profitable under the present market structure. In order for this to be so, a price of \$210.00 per thousand filtered meters³ would be necessary, which is the price the industry pays for the water used in processing.

With regards to wood production, it was found that plantations at the site studied do not have production potential to finance the project in this area.

These results make evident the need for the management of natural protected areas to be administered by means of integrated projects and simultaneously financed activities that generate profits.

Key Words: Environmental services, forest profitability, carbon sequestration, filtering and water balance.

¹ Tesista

² Director de Tesis.

1. PRESENTACIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

Sin duda los sistemas y modelos económicos que han permitido el desarrollo de la sociedad, han sustentado sus bases en el uso y explotación de los recursos naturales como principal fuente de materias primas para los procesos productivos, obteniendo los bienes y servicios satisfactorios para la mejoría de la calidad de vida.

El aprovechamiento de los recursos naturales se realizaba con la creencia de que eran inagotables, por lo que conforme al desarrollo de nuevas tecnologías, el hombre aumentó su capacidad para transformar la naturaleza rebasando la capacidad de recuperación natural de los ciclos biológicos de los recursos renovables aprovechados.

Con ello, bajo las premisas que supone un modelo económico adecuado, existe la asignación ineficiente de recursos, provocando la ocurrencia de las externalidades como consecuencia del desarrollo de los procesos productivos (Costanza, 1999).

La preocupación actual por recuperar y mantener las relaciones ambientales en una función óptima para el desarrollo de la vida en nuestro planeta, es una prioridad de orden internacional, por lo que el manejo de los ecosistemas en la actualidad exige mayor precisión y cuidado en la planeación y definición de objetivos de los procesos productivos directamente relacionados con los recursos forestales.

Las interrelaciones ecológicas asociadas a los recursos forestales son muy diversas y complejas, tales como la fijación y transformación de gases como el CO₂, captación e infiltración de agua de lluvia que alimenta los mantos acuíferos, mantenimiento de la productividad de los suelos reduciendo la erosión, mantenimiento de la biodiversidad entre asociaciones de flora y fauna, la preservación del equilibrio de las condiciones climáticas, entre muchas más.

En México existen perspectivas sociales diferentes respecto a la necesidad de conservar y preservar los ecosistemas forestales. Por una parte, la sociedad

concentrada en las grandes urbes reclama el cuidado de los bosques y no admite de manera plena y conciente las posibilidades de realizar el aprovechamiento de productos que de ellos se pueden obtener, no obstante son esos grupos los que consumen y demandan grandes cantidades de servicios ambientales que se generan en los ecosistemas forestales, sin retribuir pago alguno por su producción.

Por su parte, los propietarios de las áreas forestales enfrentan el problema de satisfacer sus necesidades básicas de sustento como alimentación, vestido, educación y salud, con restricciones legales y de idiosincrasia que limitan la posibilidad de incorporar de manera plena los recursos forestales a las alternativas productivas que les generen beneficios económicos y mejoren su calidad de vida.

Entre las limitantes en mención, se pueden identificar los conflictos por colindancias entre predios, desconocimiento del proceso de producción y comercialización forestal, falta de organización, prohibición de aprovechamientos forestales mediante normas y decretos de “veda”, creación de áreas naturales protegidas sin programas y proyectos de apoyo que den sustento a la protección y conservación de los recursos naturales de dichas áreas, etc.; todo ello en un marco de exclusión en la toma de decisiones y participación directa de los propietarios, situación que los conduce a hacer uso inadecuado de los recursos naturales a costa de su deterioro.

En el área natural protegida del “Nevado de Toluca”, se han establecido plantaciones forestales con fines de restauración que datan de entre 20 y 25 años, las cuales permanecen en riesgo para su conservación al no ofrecer beneficio económico alguno a sus dueños, quienes optan por ocupar el espacio para cultivo agrícola o ganadería extensiva, actividades económicamente marginales que conllevan la eliminación de la cubierta forestal.

Sin embargo, dada la importancia ecológica que representa la restauración de los bosques de esta zona, se siguen realizando reforestaciones con la esperanza de preservar las condiciones ecológicas de la cuenca alta del Río Lerma.

Bajo este contexto, el estudio pretende evaluar la rentabilidad económica de este tipo de plantaciones respecto a la capacidad de captura de carbono y retención de agua, como servicios ambientales que contribuyen a mejorar las condiciones ambientales de la región y la recarga de mantos acuíferos, concluyendo con una valoración económica de dichos servicios en comparación a los beneficios económicos que se pueden obtener de la producción maderable.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

Evaluar la rentabilidad de producción de servicios ambientales, en comparación con la rentabilidad por la producción maderable de una plantación forestal con fines de restauración, en el "Parque Nacional Nevado de Toluca", Estado de México.

1.2.2. Objetivos Particulares

- 1.- Evaluar el potencial de producción de servicios ambientales específicos de captura de carbono y retención e infiltración de agua en una plantación forestal con fines de restauración.
- 2.- Determinar la rentabilidad económica de producción maderable de la plantación bajo estudio.
- 3.- Establecer los parámetros comparativos de rentabilidad por producción de estos servicios ambientales y la producción maderable.

1.3. HIPÓTESIS

La producción y comercialización de servicios ambientales en plantaciones con fines de restauración en el área de estudio, representan una fuente alternativa de ingresos económicos para los propietarios de bosques y terrenos forestales de la zona, similares e incluso mayores a los beneficios posibles de obtener por la cosecha de productos maderables.

2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Los recursos naturales han sido la fuente de sustento material de las generaciones humanas. Sin embargo, la presión que el hombre ha ejercido sobre los recursos agua, suelo y vegetación, ha mermado la cantidad y calidad, rebasando la capacidad de regeneración natural provocando con ello los procesos de degradación ambiental.

Bajo esa creencia el gobierno federal ha dispuesto una serie de medidas que tienen como fin la protección y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, creando las áreas naturales protegidas, en las que a pesar de que se establecieron los mecanismos metodológicos y lineamientos generales de acción, en realidad la mayoría de las creadas no cuentan con un plan global y específico de manejo; no obstante que la mayoría fueron decretadas hace más de cinco décadas. Tal es el caso del "Parque Nacional Nevado de Toluca", cuyas áreas y ecosistemas forestales desempeñan un papel importante en la economía regional y nacional por la generación de la electricidad en el sur del Estado de México, además de abastecimiento de grandes cantidades de agua potable y otros bienes y servicios aportados a la sociedad (Zetina, 1995).

El área que ocupa el "Nevado de Toluca", se encuentra en la parte central del Estado de México, localizándose la parte más alta (el cráter) aproximadamente a 22 kilómetros de distancia al suroeste de la ciudad de Toluca, comprende porciones territoriales de 11 municipios: Almoloya de Juárez, Amanalco de Becerra, Calimaya, Coatepec Harinas, Temascaltepec, Tenango del Valle, Texcaltitlán, Toluca, Villa Guerrero, Villa Victoria y Zinacantepec; cubre una superficie de 53,442.06 ha, las coordenadas geográficas que lo delimitan son 19° 00' y 19° 17' 15" de latitud norte y los meridianos 99° 37' 29" y 99° 56' 30" de longitud oeste, circunscrito en elevaciones mayores de 3,000 metros sobre el nivel del mar (Ortega, *et al.* 1966).

El parque representa una fuente de recursos para los municipios mencionados y la región de influencia, siendo además un potencial para el estudio de los fenómenos naturales y el ecosistema ahí representado, asimismo un atractivo natural cercano al área urbana del Valle de Toluca y la Ciudad de México (Zetina, 1995).

El material geológico de la zona corresponde al andesítico, cuyo origen data del segundo periodo de actividad volcánica del sistema montañoso “Nevado de Toluca”; este material se depositó sobre andesitas de la primera etapa eruptiva, que a su vez se depositó sobre rocas sedimentarias del cretácico medio inferior.

El material geológico predominante en la parte más alta y al noroeste del Parque son rocas ígneas extrusivas intermedias, mientras que en la porción norte, noroeste y suroeste contiene brecha volcánica y escasamente toba (CETENAL, 1980).

El origen de los suelos es generado de tres formas: *In situ* influenciado por la roca basal andesítica, por proceso aluvial y por proceso coluvial, que representa un depósito de material grueso debido al desprendimiento de material rocoso de las partes superiores. Se pueden encontrar texturas francas, arcillosas y arenosas, la profundidad varía de 0.70 a 2.5 metros, la materia orgánica llega a representar el 10% en suelos cubiertos por vegetación natural y en zonas de cultivo es menor, el pH varía de 4.5 a 6.0 (Ortega, *et al.* 1966).

Según las cartas edafológicas escala 1:50,000 editadas por la extinta Secretaría de Programación y Presupuesto (1980), se reportan las siguientes unidades: Andosol Húmico, Feozem Háptico, Andosol Ócrico, Andosol Mólico, Litosol, Cambisol Crómico, Regosol Éutrico y Fluvisol Éutrico, predominando el Andosol Húmico.

En el “Nevado de Toluca” se originan dos de las principales cuencas hidrológicas del país denominadas, **a)** cuenca del Río Lerma en la zona norte, cuyos afluentes principales son los Ríos Chiquito, San Pedro, Almoloya, San Miguel y Santiaguito; y **b)** Cuenca del Río Balsas en la zona sur, sus afluentes principales son los Ríos Tenango, Santa Ana, Nenecingo, Guerrero, San Gaspar, Ixtapan de la Sal, De las Flores, Verde, Del Vardo, Amanalco, Del Molino y Río de la Asunción. En las cuencas, el efecto de los escurrimientos está determinado por la cobertura vegetal, de ahí la importancia hidrológica que juega la vegetación en el área de influencia del parque.

Las exposiciones u orientación del piso, o bien el ángulo de recepción de los rayos solares que presenta la zona del parque, son determinantes en la formación de frentes

lluviosos y de la temperatura, presentándose en la parte sur del nevado el ascenso de masas de aire caliente provenientes del sur, chocan con el macizo y se enfrían lo que provoca precipitaciones en las zonas norte y noroeste.

En la parte sur del Nevado, las condiciones de temperatura y humedad son más altas con respecto a la zona norte, debido a que en esta zona las masas de aire caliente chocan para después ascender y enfriarse. La Secretaría de Programación y Presupuesto (1981), reconoce dos tipos de clima en la zona: 1.- **C(E)(W₂)(W)** clima templado subhúmedo tipo semifrío, con lluvias en verano siendo el más húmedo de los semifríos subhúmedos, con precipitación del mes más seco menor a 40 mm, un porcentaje de lluvia invernal menor de 5, predominando en toda el área, excepto en las cotas mayores a 4,000 msnm. 2.- **E(T)H**, clima frío, con temperaturas del mes más frío menor de 0° C y el mes más caliente menores a 6.5° C.

Bajo estas características, el Parque tiene condiciones de humedad media a alta, presentando en invierno pocas lluvias. El clima se caracteriza de templado subhúmedo a frío con lluvias en verano, con temperatura media anual de -2 a 12° c, el mes más frío está alrededor de los 0° C, mientras que en el mes más caliente va de 0 a 18° C.

Respecto a la vegetación natural predominante, se observa la perfecta definición de bosques y macizos forestales compuestos de especies de *Pinus* y *Abies* distribuidos conforme a la elevación sobre el nivel del mar y la exposición del suelo, formando masas puras y mezcladas en las etapas de transición; en todos los casos se observa la presencia de especies secundarias tales como *Quercus* sp (encino), *Alnus* sp (aile), *Arbutus* sp (madroño) y en forma aislada es común encontrar masas puras de *Quercus* sp o bien mezcladas con *Pinus* y *Abies*.

Para los años 60's, se identificaba la cobertura forestal en espesura normal, espesura semi-aclarada, espesura aclarada, así como áreas de uso agrícola y pastizales como se muestra en la figura 1 (Ortega, *et al.* 1966).

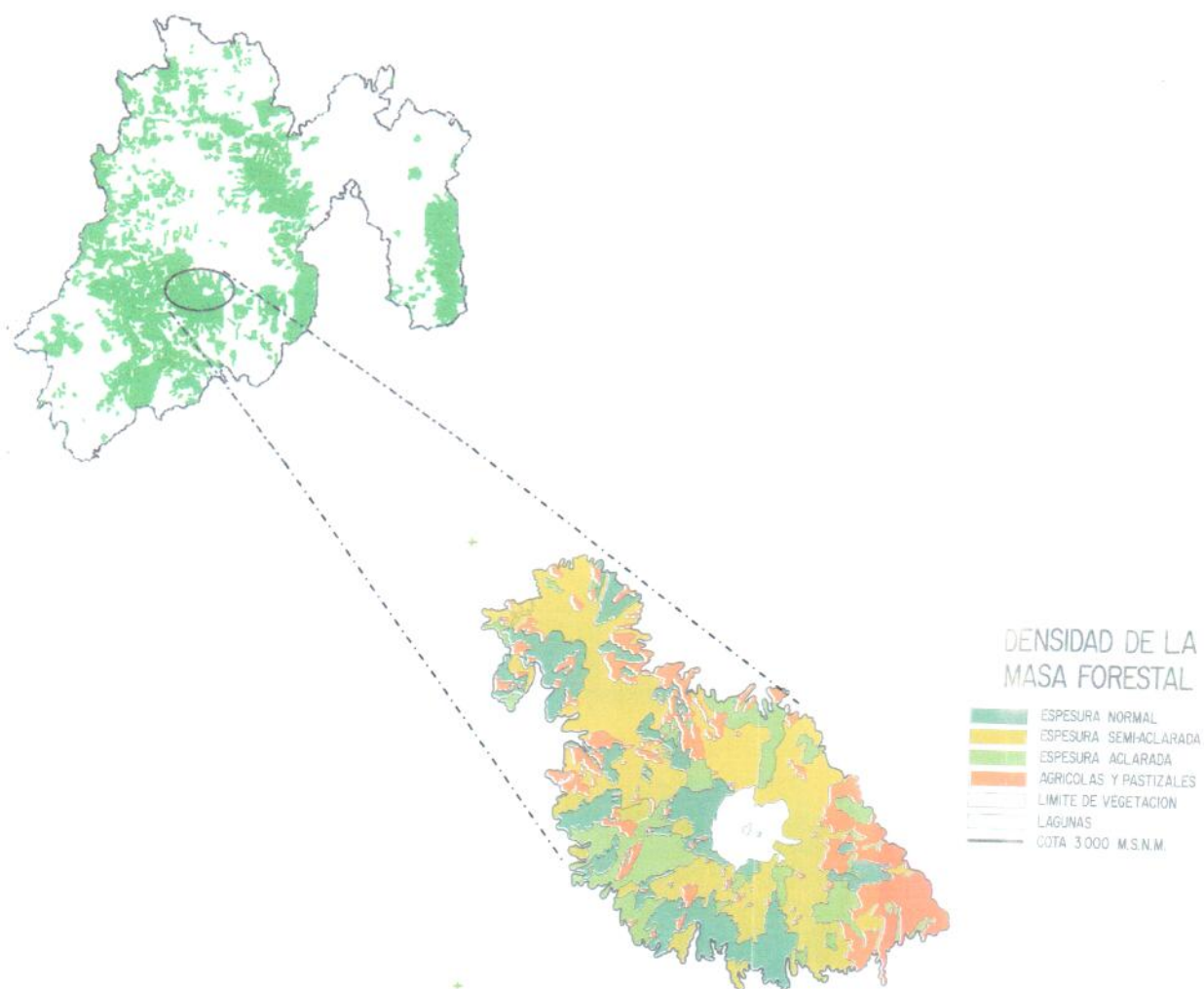


Figura 1. Ubicación Geográfica del “Parque Nacional Nevado de Toluca”.

Fuente: Programa de Desarrollo Forestal Sustentable del Estado de México (1995) y Ortega, *et al.* (1966).

3. CAPTURA DE CARBONO POR LA VEGETACIÓN

3.1. ANTECEDENTES

En México, el Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT) elaboró el Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero con datos de 1990, mismo que posibilitó la identificación y cuantificación de las principales fuentes y sumideros de gases de efecto invernadero, consideró para ello que el efecto invernadero se propicia conforme mayor es la concentración de ese tipo de gases en la atmósfera, menor es la cantidad de radiación infrarroja que el planeta emite libremente al espacio exterior generando en consecuencia la elevación de la temperatura ambiente (Ordóñez, 1999).

Se estima que el dióxido de carbono (CO_2) es el responsable del 71.5% del efecto invernadero. En el mundo, los bosques a través de sus procesos fisiológicos como la fotosíntesis, absorben 110 GtC año^{-1} y mediante la respiración emiten 55 GtC año^{-1} , mediante la descomposición emiten de 54 a 55 GtC año^{-1} . El suelo, los detritus y la turba almacenan 172 GtC aproximadamente, los océanos absorben aproximadamente 93 GtC año^{-1} y emiten por procesos químicos y biológicos cerca de 90 GtC por año. Estos dos ciclos eliminan de la atmósfera casi tanto carbono como el que aportan de forma natural, pero actividades antropogénicas como la deforestación y la quema de combustibles fósiles están provocando un aumento en la cantidad del carbono atmosférico de aproximadamente 3 GtC por año (Bolin *et al.*, 1986; citados por Ordóñez, 1999).

El carbono es un elemento químico que se encuentra en todos los componentes bióticos y abióticos del ecosistema, en los seres vivos, la estructura que los conforma está constituida por compuestos de carbono que obtienen como resultado de sus procesos metabólicos realizados durante su crecimiento y desarrollo llegando a constituir aproximadamente el 50 % del peso seco de cualquier organismo (Smith *et al.*, 1993; citados por Ordóñez, 1999).

Una giga tonelada de carbono (1 GtC) = 10^9 toneladas de carbono

La reserva de carbono en moléculas de CO_2 es la atmósfera y la hidrosfera, con una concentración del 0.03% en la atmósfera y cada año aproximadamente un 5% de estas reservas se consumen en los procesos de fotosíntesis, por lo que todo el anhídrido carbónico se renueva en la atmósfera cada 20 años. Los bosques del mundo (templados y tropicales) capturan y conservan más carbono que cualquier otro ecosistema terrestre y participan con el 90% del flujo anual de carbono entre la atmósfera y el suelo mediante la formación de moléculas de carbohidratos, lípidos, proteínas y ácidos nucleicos las cuales están integradas por cadenas de carbono enlazadas entre sí.

El retorno del CO_2 a la atmósfera se hace cuando en la respiración los seres vivos oxidan los alimentos produciendo CO_2 ; en el conjunto de la biosfera la mayor parte de la respiración la realizan las raíces de las plantas y los organismos del suelo y no como podría parecer los animales más visibles. El petróleo, carbón y la materia orgánica acumulados son resultado de épocas en las que se regresó menos CO_2 del que se tomaba de la atmósfera, este proceso dio origen al oxígeno (O_2); si se consumieran en este momento todos los combustibles fósiles almacenados desaparecería el O_2 , por ello la preocupación por el ritmo creciente con el que se está regresando el CO_2 por la actividad humana (www.esi.unav.es/asignaturas/ecologia/Hipertexto/04Ecosis/131CicC.htm).

3.1.1. Estimaciones de Almacenamiento de Carbono en Vegetación

Los ecosistemas forestales tienen la capacidad de almacenar carbono mediante la acumulación de biomasa aérea, la cual varía en función de la composición florística, la edad y la densidad de la población de cada estrato por comunidad vegetal, la determinación de esta capacidad constituye un reto cuando se trata de evaluar el potencial de sistemas forestales naturales, alterados o inducidos por el hombre (Schulze *et al.*, 2000; citado por Acosta *et al.*, 2002).

La estimación de la biomasa aérea en cualquier componente de un ecosistema puede obtenerse por medio del método destructivo directo o mediante estimaciones indirectas del material vegetal, siendo este último el más práctico cuando se desea calcular la biomasa aérea en árboles, para ello se han establecido funciones matemáticas basadas

en las relaciones alométricas que ocurren entre los órganos de un individuo; en especies forestales de clima templado frío se han basado en correlacionar el diámetro normal y la altura de los árboles (Acosta, *et al.*, 2002).

Mäkelä (1997), presentó un estudio señalando que se han creado modelos de estimación de carbono, los cuales calculan el crecimiento de árboles en unidades de carbono asimilado por la fotosíntesis y respiración, convirtiéndolo en biomasa a través de las relaciones químicas formadoras de nuevas estructuras vegetativas en los árboles; éstas han sido sustento de estudios recientes combinando exitosamente el balance aproximado con el patrón de fijación de carbono, derivado de supuestos de conservación de relaciones estructurales.

Teóricamente justificado el balance entre las estructuras vegetativas y la función fisiológica antes de la observación empírica, frecuentemente se asumen dos relaciones en el análisis las cuales son: (1) la relación entre el peso de las raíces finas y el peso del follaje, relación que regula el balance entre el carbono y nutrientes con el crecimiento asociado a la disponibilidad de nutrientes en el suelo, y (2) la relación entre el área de albura en un corte transversal del tronco y el área foliar, lo cual es relacionado con el balance de agua y la estructura mecánica. Los resultados del análisis realizado por este autor, asumen que el peso óptimo del follaje es una relación alométrica de la altura de la copa, características que determinan el potencial de fijación de carbono en árboles.

Mäkelä (1997), relaciona las estructuras de árboles en combinación de cinco partes funcionales: follaje, raíces finas, tallo, ramas y raíces gruesas o de soporte y raíces de transporte. El follaje y raíces finas son considerados simplemente como el peso seco (P_f y P_r) mientras que el peso de la madera de los distintos órganos es derivado de las dimensiones geométricas de los mismos. De la misma manera, al considerar el área de la albura en el tallo, en la base de la copa que se denota por A_s , el área total de albura en las primeras ramas en la base del follaje por A_b y el área total de la albura en raíces gruesas A_t ; éstas variables pueden relacionarse con la altura de la copa (H_c), la longitud del tallo desde la superficie del suelo a la base de la copa (H_s), el radio de la copa (H_b) y el radio de la extensión radicular (H_t); como se muestra en la figura 2.

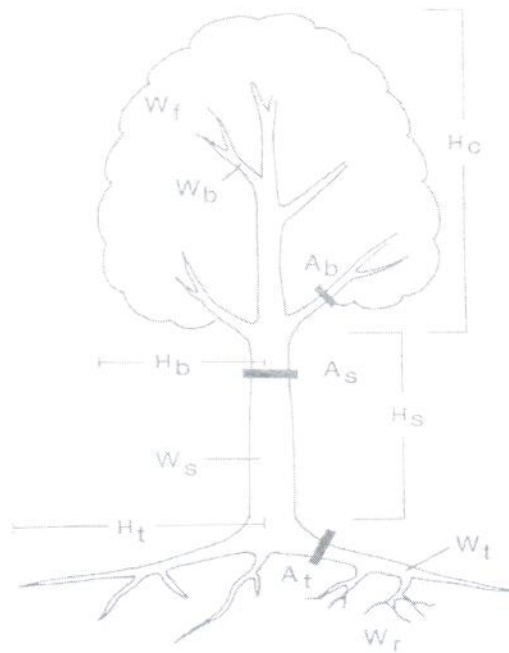


Figura 2. Representación esquemática de estructuras morfológicas de árboles, posible de relacionar en un modelo.

En esos términos, el autor menciona que la masa de carbono almacenado en bosques es un importante componente del ciclo global del mismo y que si los bosques son cosechados periódicamente, la cantidad de carbono retenido es menor que cuando la rotación se hace sobre el máximo crecimiento que el área puede soportar, mientras que si el bosque no es cosechado, el fuego, fenómenos meteorológicos y otros disturbios limitan la vida del carbono almacenado.

Para ello, Cooper (1982), dice que existe una controversia sobre la veracidad respecto de que los bosques son fuente o sumidero de dióxido de carbono, no obstante, asumiendo el sentido de que lo son, se tendrían que reforestar grandes extensiones de tierra para proyectos de acumulación de biomasa a gran escala que logre un impacto significativo en la reducción del carbono en el aire.

De manera general concluye que si los bosques son manejados por máxima cosecha sostenida de biomasa antes que por un máximo de almacenamiento de carbono, al igual que como lo expone Mäkelä (1997), el promedio de carbono contenido en la vida

del bosque es alrededor de un tercio que el contenido a la maduración o culminación del crecimiento; finalmente optimizando en rotaciones periódicas, se reduce la vida útil de almacenamiento, dependiendo del uso de la biomasa cosechada.

Un modelo planteado por Cooper (1982), establece que el principal componente de biomasa viva en bosques se encuentra en los tallos, donde la madera y corteza comprenden del orden de 76% del total de biomasa de árboles de 40 años de edad de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb) en sitios de alta productividad, la proporción fue de 73% en sitios de baja productividad; el crecimiento de los troncos en el bosque sigue una curva en forma de "S" en el tiempo, y una de las representaciones del crecimiento sigmoidal es la ecuación logística: $B_t = \frac{B_m}{1 + be^{-rt}}$

donde:

B_t : Biomasa en el tiempo t

B_m : Biomasa máxima asintótica

r : Tasa de crecimiento biológica intrínseca

t : Tiempo en años transcurridos

b : parámetro de escala el cual depende de la biomasa inicial B_o ; $b = \frac{B_m - B_o}{B_o}$

Señala que la máxima cosecha sostenida de biomasa, es obtenida cuando el bosque se cosecha en la culminación del incremento medio anual (IMA), bajo una curva de crecimiento en forma de "S"; dicha culminación ocurre cuando el IMA es igual a la derivada de la función de crecimiento.

Algunos autores citados por Cooper (1982), señalan una distribución porcentual de contenido de biomasa en las estructuras vegetativas en bosques, tal como se muestra en el Cuadro No. 1.

Muchas de las dimensiones de organismos vivos crecen en el tiempo desplegando una curva en forma de "S", por lo que se dice que su crecimiento sigue una curva sigmoide, de la que varias ecuaciones generan una gráfica como la ya explicada; Schumacher,

Weibull, Gompertz, Von Bertalanfy y Chapman-Richards como las principales, por lo que se han usado como modelos de crecimiento. De ellas, algunas han mostrado mucha consistencia entendida como “el tamaño a cierta edad sea el mismo, independientemente de cual sea la edad desde la que se proyecte” (Ramírez, 2005).

Cuadro No.1. Porcentaje aproximado de biomasa contenida en las estructuras vegetativas en árboles de distintos tipos de bosques.

Estructura Vegetativa	Coníferas		Maderas Duras	
	Rango	Promedio	Rango	Promedio
Tallo (madera, corteza)	72 - 77	75.0	49 - 60	55.0
Ramas	5 - 7	6.0	22 - 25	23.0
Tallo y ramas	78 - 85	81.0	72 - 82	78.0
Follaje	1.6 - 3.3	2.5	1.5 - 2.3	1.8
Raíces gruesas	12 - 16	15.0	13 - 21	16.0
Raíces finas	0.5 - 2.8	1.6	3 - 5	4.0
Todas las raíces	16 - 19	17.0	16 - 26	20.0
Tallo, ramas y raíces gruesas	94 - 98	96.0	93 - 95	94.0
Follaje y raíces finas	2.9 - 6.1	4.0	5 - 7	6.0

Fuente: Cooper (1982); se respetó la presentación del autor.

Ordóñez y Masera (2001), señalan que a nivel nacional los bosques son actualmente la segunda fuente de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) contribuyendo con aproximadamente el 30% del total; éstos representan un almacén de carbono aproximado de 8 GtC en México, cantidad equivalente a las emisiones mundiales actuales de CO₂. Sin embargo, la capacidad de almacenamiento de carbono se está perdiendo rápidamente por los procesos de deforestación y degradación de los ecosistemas forestales. Los principales almacenes de carbono (C) en los ecosistemas forestales son el suelo, la vegetación y el mantillo compuesto de hojarasca y materiales acumulados sobre el piso.

Asimismo manifiestan de acuerdo a estudios realizados por otros autores, que el suelo juega un papel muy importante en el ciclaje y almacén de carbono mediante los procesos de desnitrificación y descomposición de la materia orgánica, teniendo una gran capacidad para “secuestrar carbono” acumulándolo por miles de años, pero que de acuerdo con el Panel Intergubernamental Para el Cambio Climático (IPCC), la estimación precisa de la dinámica de los flujos netos de carbono entre los bosques y la atmósfera (balance emisión – captura), es uno de los problemas más importantes en la

discusión sobre cambio climático, resultado del complejo ciclo biogeoquímico del carbono en los ecosistemas forestales ya que los procesos de captura – emisión están asociados al tipo de vegetación, materia en descomposición, suelos, productos forestales, los cuales tienen tiempos de residencia y flujos muy diferentes.

Las implicaciones del cambio climático conllevan una serie de fenómenos, dado que cuando se modifica la temperatura en la tierra por el efecto invernadero, se asocian otros problemas atmosféricos como el incremento de la evaporación de los océanos, la presencia-ausencia de lluvia y en consecuencia la producción y escasez de alimentos, la alteración de condiciones ambientales donde regiones semiáridas podrían convertirse en áridas y los sitios donde llueve mucho podría incrementarse, todo ello repercutiría en las actividades humanas y específicamente en la agricultura como fuente principal de obtención de productos alimenticios.

Por estas razones es que se están estableciendo compromisos de colaboración internacional como el mecanismo de desarrollo limpio (MDL), a fin de que los países en vías de desarrollo puedan percibir incentivos por la venta de bonos de captura de carbono derivados de la certificación en la reducción de sus emisiones y establecimiento de proyectos de captura.

En las mediciones de la concentración atmosférica de gases como CO_2 , CH_4 y NO_2 se ha registrado aumento en forma gradual, primero paulatinamente hacia mediados del siglo XVIII y en forma acelerada en los últimos 50 años del siglo XX, debido al incremento en el uso de combustibles para satisfacer la demanda energética de la población, para lo que se ha utilizado y devastado grandes extensiones de bosques sin soslayar el consumo de grandes cantidades de madera y combustibles fósiles, así como el desarrollo de las actividades industriales de manera desregulada y las guerras como causas de la destrucción de grandes reservorios de carbono.

La reducción de las reservas de C en la biomasa y en el suelo, es un proceso antropogénico que ha provocado que se hayan incorporado grandes cantidades de CO_2 a la atmósfera, liberando adicionalmente SO_2 y NO_x como resultado de la combustión producida por vehículos automotores. Para dimensionar el efecto, la combinación de

estos gases con vapor de agua producen ácidos, los que al precipitarse junto con el agua de lluvia, niebla o nieve generan precipitaciones ácidas con valores de pH entre 3 y 4, los daños que ocasionan estas lluvias, se han manifestado en bosques y áreas verdes cercanas a zonas industrializadas provocando enfermedades crónicas en la vegetación como alteración en los procesos de nitrificación y disponibilidad de cationes básicos, alteración en el agua y en la macro y micro fauna (Arteaga, 2004).

El depósito de lluvia ácida puede afectar directamente a los órganos fotosintéticos, como provocar necrosis en bordes foliares y destrucción de cutícula o alteración de ceras cuticulares en el caso de acículas en coníferas.

Sabiendo que los almacenes o reservorios de C en nuestro planeta son: a) la atmósfera, b) la vegetación, c) el suelo, d) los océanos y e) combustibles fósiles; el hombre puede controlar con mayor efectividad los asociados a los componentes vegetales y al suelo de los ecosistemas, por lo que el manejo adecuado de las prácticas de cultivo y uso de los recursos naturales puede ser la diferencia entre continuar siendo sumideros de carbono o fuentes de emisión (Arteaga, 2004).

Varios autores citados por Acosta (2003), establecen que para estimar la cantidad de biomasa aérea de árboles, se debe contar con funciones que cuantifiquen la total con base en el tamaño y dimensiones estructurales de los árboles, es decir, funciones matemáticas basadas en relaciones alométricas que ocurren entre los órganos de un individuo, dichas relaciones han sido utilizadas ampliamente en especies forestales de clima templado – frío para estimar la biomasa aérea total y el área foliar a partir del diámetro normal o del área de la albura. Estas relaciones entre las dimensiones del fuste y la cantidad de biomasa han constituido una herramienta importante para construir modelos mecanicistas de crecimiento forestal, que han resultado útiles para predecir la captura de carbono por los árboles.

Con fundamento en lo expuesto, señala que los modelos alométricos se pueden generar por especie acorde al patrón de las características de desarrollo intrínseco, sin embargo es probable que varias especies que crecen en un mismo ecosistema presenten similitud del patrón morfológico de crecimiento consecuentemente biomasa

aérea similar; lo cual, si ocurriera, podría ser sujeto de estudio bajo un mismo modelo alométrico para estimar la biomasa de varias especies.

Para cuantificar biomasa y carbono asimilado en la parte aérea de la vegetación en ecosistemas mediante el uso de relaciones alométricas, integró información en pares de datos de biomasa y diámetro normal de árboles con lo que ajustó el modelo $Y = bX^k$ por ser uno de los más usados, donde Y es la biomasa aérea en kilogramos, X el diámetro normal en centímetros, b y k estimadores de los parámetros obtenidos mediante mínimos cuadrados.

En el estudio realizado por Acosta (2003), se ajustó el modelo para cada especie estudiada para obtener los parámetros b y k , se compararon los parámetros obtenidos para cada una y concluyó que estos son los mismos independientemente de la especie y por lo tanto que un solo modelo podría ser suficiente para estimar la biomasa del grupo de especies naturales estudiadas en.

Por su parte Bautista (2002), realizó un estudio cuyo objetivo fue valorar económicamente el almacenamiento de carbono en un bosque tropical, para lo cual, con base en la densidad de la madera de las especies basado en datos de un inventario, determinó el contenido de carbono en biomasa para cada especie y obtuvo la cantidad almacenada de carbono por hectárea. Empleando dichos datos, al analizar los volúmenes maderables a aprovechar y comercializar para la anualidad 2003, precios de venta y costos de extracción, concluyó que la relación beneficio/costo respecto a la venta del servicio ambiental captura de carbono y venta de productos maderables es de 3.5:1, sin embargo el análisis hecho es circunstancial en el tiempo, siendo necesario realizar una evaluación que permita conocer la máxima capacidad de carga del sitio respecto a la composición florística y estructura del bosque y analizar en el tiempo la proyección de los posibles beneficios y costos incurridos.

Con este fundamento, las estimaciones de almacenamiento de carbono y determinación de la capacidad potencial de carga del sitio respecto al crecimiento de la vegetación, pueden obtenerse mediante estimaciones directas, modelos de análisis estadístico,

inventarios de bosques, técnicas de teledetección, etc.; estos métodos difieren en exactitud, precisión, verificabilidad, costos y escala de aplicación.

En el caso particular, las técnicas y métodos de inventario forestal se basan en principios dasométricos, los cuales proporcionan información para planear el manejo forestal a partir de variables como: altura, diámetro (para obtención de volúmenes maderables), especies, clases de edad, crecimiento, cuantificación de existencias, etc.

La estimación de biomasa mediante el volumen maderable es relativa y en todo caso útil para bosques coetáneos y uniespecíficos, de otra forma deberá hacerse un estudio de los componentes involucrados en los estratos de la masa forestal.

Entre los modelos más conocidos y utilizados a la fecha para estimar el contenido de carbono en los ecosistemas, según Masera, *et al.* (2000), son: CO₂FIX, MODELO LUCS y MODELO GORCAM, los cuales han sido probados en distintos lugares; sin embargo la información disponible para alimentar uno de estos modelos es una limitante para su uso.

En septiembre de 2001, la Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural dependiente de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, realizó una estimación del contenido de carbono en la biomasa existente en el área del suelo de conservación de su jurisdicción, empleando para ello el volumen maderable del arbolado (Gobierno del Distrito Federal, 2001).

Una vez obtenidos los datos de campo y después de hacer un análisis de distintas ecuaciones alométricas para estimación de volúmenes, se decidió utilizar las tablas de volúmenes generadas por el Segundo Estudio Dasonómico del Estado de México (SEDEMEX) por presentar mejores condiciones de evaluación respecto a otras analizadas como las ecuaciones alométricas generadas por Ayala (1998), tablas de volúmenes de la Unidad Industrial de Explotación Forestal de Loreto y Peña Pobre, tablas de volúmenes de la Unidad Industrial de Explotación Forestal de San Rafael y los modelos generados para el bosque del Desierto de los Leones; además de que las

tablas y ecuaciones del SEDEMEX fueron construidas particularmente para los bosques del Estado de México (Gobierno del Distrito Federal, 2001).

3.1.2. Consideraciones del Panel Intergubernamental Sobre Cambio Climático (IPCC)

Este grupo fue establecido en 1988 por la Organización Meteorológica Mundial y el programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, se constituyó como un órgano de convocatoria a la participación en una Convención Marco sobre Cambio Climático, instrumento base para la definición de la cooperación internacional en el tema, quedando definido y aprobado en 1992 en Río de Janeiro, Brasil el cual fue uno de los principales resultados de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Ambiente y Desarrollo (www.morelia.gob.mx/html/MedioAmbiente/Kioto.html#Glosario).

Los acuerdos de esa convención entraron en vigor el 21 de marzo de 1994, cuyo objetivo se definió como el logro de “la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, a un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático”.

Los conceptos novedosos que se incluyeron se relacionan con el ámbito del derecho internacional como el de “responsabilidad común pero diferenciada” y el “principio precautorio” que exigen actuación de remediación.

En 1995, en la primera conferencia de los miembros ante la Convención, se determinó que los compromisos de los países desarrollados “no eran adecuados”; para revisarlos se adoptó el mandato de Berlín, proceso que desembocó en la Tercera Conferencia de las partes celebrada en diciembre de 1997 en Kyoto, Japón, donde se adoptó el Protocolo de Kyoto firmado por México el 9 de junio de 1998 y ratificado el 2 de septiembre de 2000.

3.1.3. Los Preceptos del Protocolo de Kyoto

El Protocolo de Kyoto, con sus compromisos vinculantes para reducir la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), propone por primera ocasión en la historia de la

humanidad límites a dichas emisiones en los países más prósperos. Este acuerdo, obliga asumiendo un compromiso voluntario por parte de los países industrializados a limitar las emisiones conjuntas de seis gases (CO₂, CH₄, NO₂, Compuestos Perfluorocarbonados (PFC), Compuestos Hidrofluorocarbonados (HFC) y Hexafluoruro de Azufre), reduciéndolos por lo menos un 5.2% respecto a los niveles de 1990 durante el período 2008-2012, en proporciones acordes a sus emisiones; los países de la Unión Europea en conjunto reducirán un 8%, EE.UU. un 7%, Japón 6%; Ucrania, La Federación Rusa y Nueva Zelanda las mantendrán en un 1.8% y Noruega, Australia e Islandia las mantendrán en un 10% (www.morelia.gob.mx/html/MedioAmbiente/Kioto.html#Glosario).

Entre los compromisos vinculantes para la reducción de emisiones de GEI, el Protocolo de Kyoto enumera la forestación, reforestación y deforestación, entre otras, como actividades de uso de la tierra que se han de considerar en los esfuerzos encaminados a conseguir los objetivos que se planteó.

Según la discusión que presenta Moura (2001), menciona que no se ha dilucidado de manera plena como se debe incluir a la actividad forestal en el marco del Protocolo y que ha quedado en una cuestión abierta a interpretaciones diferentes.

Señala que el Protocolo autorizó tres mecanismos de flexibilidad para conseguir los objetivos de reducción de emisión de gases; **a) el comercio de limitaciones de emisión y obligaciones de reducción cuantificada, b) la aplicación conjunta y c) el mecanismo para desarrollo limpio.**

El argumento que justifica la aplicación conjunta, es que los costos marginales de la reducción de las emisiones o de la fijación del dióxido de carbono son en general menores en los países en desarrollo que en los desarrollados, sin embargo, no señala con claridad que actividades forestales se pueden realizar en el marco del artículo 12 del mecanismo para un desarrollo limpio, por lo que la vaguedad del Protocolo en este respecto ha dejado un margen muy amplio para la interpretación generando opiniones totalmente contradictorias.

El autor antes mencionado, argumenta que en la actualidad el financiamiento de actividades de reducción de los gases de efecto invernadero abarca un total de 4 millones de hectáreas de bosques en todo el mundo y que según la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria (CIPF) por medio de las actividades forestales se puede compensar aproximadamente el 15% de las emisiones mundiales de GEI, lo que constituye una solución parcial al problema global.

Esto nos lleva a determinar que mientras el desarrollo económico esté sustentado en economías ineficientes en la asignación de recursos, seguirán siendo fuentes permanentes en la generación de externalidades como la emisión de GEI y que en el mejor de los casos, deberán complementarse esfuerzos en acciones encaminadas a la reducción con la renovación y transformación de tecnologías empleadas en los procesos productivos que sustentan los sistemas económicos.

3.1.4. El Mercado de los Servicios Ambientales

Quizá en el nivel internacional, Costa Rica es un ejemplo fehaciente de la comercialización de los servicios ambientales, donde el turismo es el segundo rubro en importancia en la contribución al Producto Interno Bruto (PIB). Costa Rica reconoce que el valor total de los servicios ambientales que ofrecen sus bosques tienen un potencial que va más allá del valor comercial de la madera procedente de bosques naturales y plantaciones forestales.

Rodríguez (2003), señala que los pagos no son subvenciones, sino una retribución equitativa por el valor de los servicios ambientales tales como:

- Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.
- Protección del agua para uso en zonas urbanas, rurales o para producir energía eléctrica.
- Protección de la biodiversidad con fines de conservación y uso sostenible de la misma con fines científicos y farmacéuticos.
- Investigación, mejoramiento genético y protección de los ecosistemas y formas de vida.

- Conservación de los paisajes naturales, particularmente para fines turísticos.

Menciona además que a pesar de la tradición costarricense en la conservación de los recursos naturales mediante un sistema de Parques Nacionales e incentivos para la recuperación de las tierras forestales, sólo tras muchos años de debate político se ha llegado a formar un consenso social y elaborar el concepto de pago por los servicios ambientales.

Acorde a las decisiones de la Conferencia de las Naciones Unidas Sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (CNUMAD) de 1992, diversos acuerdos internacionales como la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático (CMNUCC), su protocolo de Kyoto y el Mecanismo para el Desarrollo Limpio (MDL) han permitido a Costa Rica asumir una función central en la prevención del cambio climático mundial, mediante proyectos de manejo y conservación de bosques naturales y plantaciones forestales financiados por la comunidad internacional.

La principal fuente de financiamiento del programa es un impuesto especial sobre los combustibles, denominado impuesto ecológico (impuesto sobre todos los derivados del petróleo crudo) aprobado en la nueva Ley Forestal de 1996 de ese País y con la aprobación de esa Ley, ha conseguido que el sector forestal figure en un lugar destacado de las prioridades nacionales.

Los certificados de servicios ambientales como otro esquema de financiamiento, se emiten para dar crédito de las contribuciones voluntarias del sector privado y los fondos se destinan a financiar el programa de pago, por lo general los compradores de los certificados designan las zonas forestales en las que deben emplearse los fondos.

Además del Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO) suscribe acuerdos con empresas hidroeléctricas que pagan los costos de protección de los recursos hídricos.

Este programa y el marco institucional que han establecido el FONAFIFO y el Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) tienen una gran aceptación en la

comunidad internacional, tal como describe Rodríguez (2003), por ejemplo el Banco Mundial y el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM) a través del proyecto denominado ecomercados, han aportado una línea de crédito de 36.6 millones de dólares EE.UU. y un donativo de 8 millones de dólares EE.UU. para ayudar a financiar el programa.

Trexler (2003), señala que el fundamento del mercado de GEI y la rentabilidad de las actividades forestales tienen sentido en los mecanismos basados en el comercio o pago de bonos por emisiones, para conseguir los objetivos de mitigación del cambio climático.

Esto sucede en tanto que una molécula de bióxido de carbono no importando donde haya sido emitida, puede trasladarse a cualquier lugar del planeta en poco mas de una semana.

Él, evidencia que muchos observadores temían que los proyectos del cambio de uso de la tierra y la silvicultura dominarían por completo el mercado de estos gases y desplazarían otras fuentes de obtención de créditos de emisiones, incluida la mejora de la eficiencia energética y que a causa de ello los proyectos de conservación forestal (que en principio supusieron una proporción importante de los proyectos de compensación de emisiones), fueron excluidos de la atribución de créditos al menos durante el primer período de compromiso del Protocolo de Kyoto.

Ante esos prejuicios, se asumía un futuro de incertidumbre para los proyectos de forestación y reforestación, así como para las dos categorías de proyectos de cambio de uso de la tierra y la silvicultura en países en desarrollo aprobados en el marco del Mecanismo para un Desarrollo Limpio (MDL) del Protocolo.

Entre los aspectos controvertidos estaba la posibilidad de que estos proyectos no tuvieran la duración prolongada (permanencia), a diferencia de lo que ocurre con otras medidas de mitigación en las que los beneficios de la reducción de emisiones conseguidos podrían desaparecer.

En efecto, un bosque que se planta o se protege en un proyecto de compensación podría ser talado en el futuro o podría desaparecer por efecto de un incendio, de enfermedades o de otras causas, perdiendo los beneficios conseguidos.

Entre los requisitos para incluir un proyecto en el MDL relacionados con el cambio de uso de la tierra y la silvicultura se han expuesto algunos criterios como los siguientes:

- Probablemente, en estos proyectos solo se podrá contabilizar la tierra no cubierta de bosque desde 1989 y el país anfitrión deberá ser parte en el Protocolo de Kyoto.
- El proyecto debe demostrar que dará lugar a una retención de carbono mensurable y a largo plazo.
- Demostrar que la retención de carbono será adicional a la del nivel existente sin la ejecución del proyecto (aún no se ha aprobado todavía la metodología a estos efectos).
- Demostrar que impulsará los objetivos de desarrollo sostenible del país y contribuirá a la conservación de la biodiversidad.
- Los resultados deben ser validados y cuantificados de forma continua mediante auditoria realizada por terceros.

Asimismo los fondos o beneficios financieros potenciales de un proyecto deberán superar varias etapas como:

- Encontrar un posible inversionista o alguien dispuesto a comprar los créditos del proyecto.
- Negociar las condiciones del proyecto y los convenios de préstamo, incluso las posibles garantías, calendario de financiación, asignación de costos y riesgos del MDL y otras variables.
- Desarrollar el proyecto y preparar un documento de diseño del proyecto de conformidad con las normas del MDL y las condiciones del mercado determinarán la estructura preferida.

- Conseguir la aprobación del proyecto por el país anfitrión por una entidad operadora (un auditor) y finalmente por el Consejo Ejecutivo del MDL.
- Ejecutar el proyecto de forma satisfactoria y conseguir las metas acordadas de las que depende el financiamiento.

3.2. MATERIALES Y MÉTODOS

3.2.1. Información de Campo

Para el caso específico de este estudio, dada la falta de información suficiente que nos permita alimentar cualesquiera de los modelos ya mencionados para cuantificar la captura de carbono, o en todo caso el costo que implica obtenerla, se asumieron las recomendaciones que especialistas del tema hicieran a personal técnico del Distrito Federal, se determinó obtener mediante un estudio dasométrico la información de campo para calcular el volumen maderable en el arbolado y extrapolar estos datos a la obtención de volúmenes de biomasa en la plantación de estudio, considerando las siguientes relaciones:

$$CT = CV + CM \quad (1)$$

Donde:

CT = Carbono Total

CV = Carbono contenido en la vegetación

CM = Carbono contenido en el mantillo

CARBONO CONTENIDO EN LA VEGETACIÓN. El carbono contenido en la vegetación se estima de la suma del contenido en la biomasa aérea y el contenido en las raíces:

$$CV = C_{BA} + C_{BR} \quad (1.1)$$

Donde:

CV = Carbono contenido en la vegetación

C_{BA} = Carbono contenido en biomasa aérea

C_{BR} = Carbono contenido en biomasa de raíces

El carbono contenido en la biomasa aérea se obtiene de:

$$C_{BA} = V * DM * FEB * CC \quad (1.2)$$

Donde:

C_{BA} = Carbono contenido en biomasa aérea

V = Volumen maderable total árbol

DM = Densidad de la madera

FEB = Factor de expansión de biomasa

CC = Contenido de carbono

Es importante señalar que las relaciones aquí establecidas, asumen que el factor de expansión es utilizado para obtener el total de biomasa aérea en las estructuras de los árboles, partiendo del volumen maderable.

El carbono contenido en las raíces se obtiene de la siguiente relación:

$$C_{BR} = C_{BA} * F \quad (1.3)$$

Donde:

C_{BR} = Carbono contenido en biomasa de raíz

C_{BA} = Carbono contenido en biomasa aérea

F = Factor de expansión

CARBONO CONTENIDO EN EL MANTILLO U HOJARASCA. El carbono contenido en el mantillo u hojarasca acumulado en la plantación, se estima de la relación siguiente:

$$CM = \text{Peso seco} * 0.5 \quad (1.4)$$

Donde:

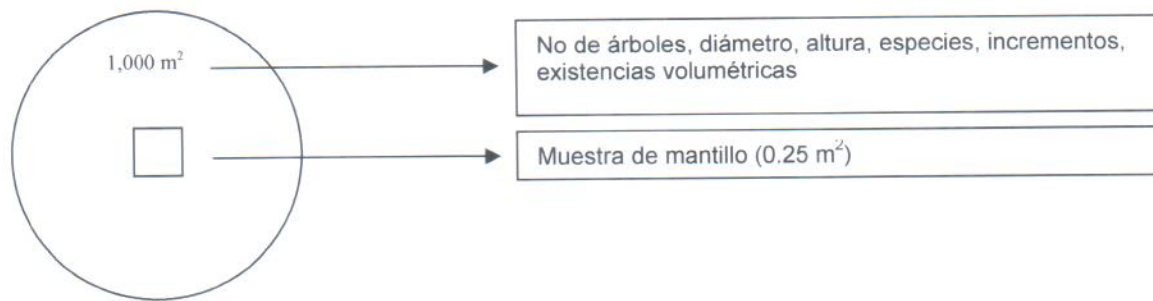
CM = Contenido de carbono en mantillo

Peso Seco = Peso seco de la hojarasca obtenido en laboratorio

a temperatura de 80° c durante 72 hrs.

0.5 = De acuerdo a lo señalado por distintos autores (50% de materia seca está constituida por carbono).

La conformación de los sitios que se levantaron en el muestreo aplicado a la plantación, quedaron conformados de la siguiente manera:



Para determinar el volumen maderable del arbolado, se realizó el siguiente procedimiento:

- Muestreo sistemático a intensidad del 5% en 38 ha, obteniendo un tamaño de muestra de 19 sitios;
- Levantamiento de información en sitios circulares de $1,000 \text{ m}^2$ equidistantes, distribuyéndolos sobre la superficie de estudio con orientación norte – sur, a una distancia de 140 metros;
- Obtención de volúmenes total árbol/ha mediante tablas de volúmenes de la zona;
- Recolección de hojarasca del mantillo en 0.25 m^2 en el centro de cada sitio;
- Densidad de la madera (WD) masa contenida en unidad de volumen; en base a revisión bibliográfica.
- Para obtención del volumen en biomasa de las distintas estructuras de los árboles, se realizó por medio de los índices de distribución propuestos por Cooper (1982) y el Factor de expansión de la biomasa (BEF) propuesto por FAO – IPCC (2003).
- Para obtención de biomasa en raíces, se aplicó un factor del 17% de la biomasa aérea propuesto por Cooper (1982) y otro del 18% en relación a lo propuesto por FAO - IPCC, respectivamente, generando dos escenarios de cálculo.
- Carbono contenido en hojarasca, secado de muestras a 80° C durante 72 horas para obtención del peso seco y multiplicado por el factor 0.5.

3.2.1.1. Descripción de la Plantación de Estudio

La plantación forestal con fines de restauración sujeto de estudio, fue establecida mediante los programas gubernamentales de reforestación y restauración de suelos del Gobierno del Estado de México, por el entonces denominado Organismo Público

Descentralizado Protectora e Industrializadora de Bosques (PROTINBOS), entre los años de 1980-1985, por lo que la edad aproximada de dicha plantación es de 23 años, como se estimó de las observaciones en campo (se carece de registros documentales).

Mediante comunicación verbal con técnicos de este Organismo, actualmente Protectora de Bosques (PROBOSQUE), se informó que dado el grado de deterioro de los bosques de la zona, se realizaron trabajos intensivos para la restauración, para lo cual se subsoleó y construyó terrazas utilizando maquinaria pesada con las que se delimitaron a nivel o en contorno siguiendo la configuración natural del terreno.

Asimismo, se reforestó plantando arbolitos de distintas especies como *Pinus montezumae*, *Pinus ayacahuite* y *Cupressus lindleyii*, aunque en mayor proporción la primera de ellas acorde a la vegetación nativa; posterior al establecimiento de la reforestación, el Gobierno del Estado ha aplicado acciones de protección principalmente encaminadas a la prevención y combate de incendios forestales, sin embargo se han excluido labores de manejo silvícola como aclareos u otras que propiciaran un mejor desarrollo de la plantación.

De hecho, los convenios establecidos con los propietarios de los terrenos restaurados, establecían que el Gobierno del Estado realizaría las acciones de restauración y que la plantación quedaría en beneficio de los propietarios, quienes al carecer de recursos económicos y asesoría para dar manejo a estas plantaciones, no realizaron acciones complementarias y por el contrario si se siguieron realizando actividades de ganadería extensiva, pastando hatos de ganado ovino y bovino principalmente, esto afectó las plantaciones con las prácticas tradicionales como la quema de pastos para promover el renuevo o brotes tiernos y alimentarlo en época de sequía.

3.2.1.2. Estudio Dasométrico

Para la obtención de indicadores de biomasa acumulada en la plantación de estudio, se ubicó en la ortofotografía número 281 escala 1:10,000 el área donde se encuentra ubicada la plantación, de la cual, se eligió una superficie donde las características de la plantación fueran homogéneas tales como lograr que la plantación esté constituida por

árboles de la misma especie (*Pinus montezumae*), dado que es una especie nativa y con perspectivas para proyectar la recuperación de los bosques de la zona con el establecimiento de plantaciones forestales para la restauración del ecosistema.

Por otra parte, se buscó que el área en estudio estuviera lo menos afectada posible por disturbios que alteren el crecimiento del arbolado con el propósito de lograr la mejor proyección respecto a la capacidad de este tipo de plantaciones para la captura de carbono en el sitio específico.

De lo anterior, se obtuvo una superficie de 38 hectáreas ubicadas entre las coordenadas UTM 2'119,000 y 2'121,500 de latitud Norte y 420,700 y 421,800 de longitud Este. A esta superficie se le aplicó una intensidad de muestreo del 5% considerando que las recomendaciones establecidas como norma para el levantamiento de inventarios forestales señalan una intensidad adecuada entre el 2 y 5% (Ley Forestal de 1996).

Con el 5% de intensidad de muestra, se determinaron 19 sitios de muestreo de 1,000 m² (un décimo de hectárea), mismos que se distribuyeron en forma sistemática y equidistante entre sí; con los datos de campo obtenidos se derivaron los resultados mostrados en el Cuadro No. 2.

Cuadro No. 2. Totales de número de árboles y volumen maderable arrojado en la muestra y proyección a la hectárea.

No de Árboles y Volumen	CATEGORÍA DIAMÉTRICA								TOTALES
	5	10	15	20	25	30	35	40	
No. árb. (muestra)	161	679	831	530	221	55	3	1	2,481
Vol. (m³) (muestra)	0.83	18.05	59.20	76.74	54.43	22.09	1.67	0.71	233.710
No. árb por ha.	85	357	437	279	116	29	2	1	1,306
Vol. (m³) por ha	0.44	9.50	31.16	40.39	28.65	11.63	0.88	0.37	123.005

Los volúmenes maderables obtenidos con base en diámetros y alturas del arbolado, se generaron mediante las tablas creadas por el SEDEMEX, las que con fundamento en el modelo de Schumacher y Hall estimaron los parámetros que permiten el cálculo del volumen maderable total árbol (vta) para esta especie, conformado como: $VTAm^3 = e^{C1} D^{C2} H^{C3}$ cuyos estimadores son: $C1=-9.7753$, $C2=2.04668$ y $C3=0.81883$.

Estos estimadores fueron obtenidos mediante muestras destructivas de árboles de distintas especies existentes en los bosques del territorio estatal, cubicando el total del volumen maderable contenido en cada árbol, excluyen las ramillas, follaje y los tocones, lo que es considerado en las autorizaciones de aprovechamiento forestal al descontar un 10% del volumen autorizado valorado como desperdicios o materiales sin valor comercial (Gobierno del Estado de México, 1990).

Entre los datos obtenidos del estudio dasométrico, con el empleo del taladro de Pressler se extrajeron virutas a la altura del diámetro normal en el árbol dominante de cada sitio con las cuales se calculó el promedio de tiempo para el cambio de categoría diamétrica (tiempo de paso) en el área de la plantación, el cual resulta de 6.25 años; pero obteniendo el tiempo de paso mediante la media armónica, medida que tiende a estimar de manera más adecuada el tiempo de paso para el “árbol tipo” (Ramírez, 2005), se obtiene un tiempo de paso de alrededor de 4 años, período que será necesario para el incremento de 2.5 cm referido al radio y de incremento de 5 cm referido al diámetro.

El criterio para dirigir la obtención del tiempo de paso sobre los árboles dominantes, tiene fundamento en lo expuesto por Suprr Y Barnes (1982), quienes establecen que el uso de la altura como estimador de la calidad de sitio, se debe a que ésta tiene una mayor relación con la productividad que la que tiene cualquier otro parámetro, estando estrechamente relacionada con el volumen; además se puede estimar de forma más sencilla y rápida y entre sus bondades se ha determinado que la influencia que ejerce la densidad sobre ella es mínima en varias especies, lo cual no ocurre con el diámetro normal, ya que éste se manifiesta en relación inversa a la densidad.

Smith (1959), argumenta que los estudios de espaciamiento y aclareo en rodales naturales y plantaciones, están más relacionados con la medición de cantidades comunes y estimaciones de las tendencias de variables tales como volumen, área basal y número de árboles por unidad de área. Otras variables adicionales de interés describen el promedio de árboles en términos de volumen, altura, diámetro normal, tiempo de paso, forma y longitud de la copa viva, espesor de corteza y tamaño de ramas; siendo esta información convencional para reportar volumen, área basal y número de árboles por unidad de área.

3.2.1.3. Biomasa Aérea y Biomasa en Raíces de la Vegetación

Acorde a la metodología planteada, se encontró en la revisión bibliográfica que la densidad de la madera de *Pinus montezumae* tiene un valor que varía desde 0.37 a 0.57 gr/cm³ en peso anhidro (Borja,1995), factor que es importante para determinar el contenido de materia seca por cada metro cúbico, es decir descontar la cantidad de agua y espacios vacíos que contiene la madera; con ello, la estimación de carbono contenido en el volumen maderable obtenido del estudio dasométrico podrá calcularse por hectárea y a su vez para la superficie que ocupa la plantación estudiada.

De esta manera, se utilizó un promedio del rango de peso específico (densidad básica) para estimar el volumen y/o peso en kilogramos de materia seca existente por metro cúbico maderable, siendo este valor de 0.47 gr/cm³.

Siguiendo las relaciones establecidas para el cálculo de la biomasa donde $C_{BA}=V*DM*FEB*CC$, se calcula el contenido de carbono en la biomasa aérea del arbolado partiendo del volumen maderable, bajo la estimación de volúmenes maderables que arroja el modelo ajustado por el SEDEMEX (1990).

De esa manera, de los 123.005 m³ de madera obtenida por hectárea, se obtiene un aproximado de 57,812.35 kilogramos de materia seca y aplicando el factor del 50% de constitución de carbono, arroja una existencia de 28,906 kilogramos de carbono por hectárea contenido en biomasa aérea.

Por otra parte, según FAO (2000) citado por el Gobierno del Distrito Federal (2001), el factor de expansión de biomasa (FEB) es la proporción de la densidad total de la madera secada en estufa de árboles con un diámetro normal mínimo de 10 cm y la biomasa secada al horno del volumen inventariado.

Sin embargo, Ordóñez (2000) menciona que no existen modelos específicos para calcular el FEB en árboles de bosques de coníferas y que los existentes han sido calculados utilizando bases de datos con muy poca información, destaca que el promedio de los FEB obtenidos son de 1.3 y que hasta el momento en que se genere nueva información, el FEB de 1.3 puede ser utilizado para estimar la biomasa aérea en los bosques de coníferas, tomando como base el volumen total maderable de los árboles y en caso de ser necesario para convertir el volumen maderable comercial se puede utilizar un factor de 1.8 el cual fue consignado por De Jong (2000).

En un estudio elaborado por el IPCC en el año 2003, se señala también factores de conversión de biomasa aérea para arbolado de bosques templados con un valor promedio de 1.3 (IPCC, 2003).

Respecto a la estimación de biomasa contenida en raíces, quizá el método más preciso es la obtención de datos mediante el muestreo destructivo, pero dadas las condiciones y limitantes para obtener esa información por la ubicación del área de estudio, se recurrió a la estimación indirecta de volúmenes de biomasa en raíces en el suelo.

Para el estudio realizado en el Distrito Federal, se señala la utilización de un factor de proporción con respecto a la biomasa aérea de un 18 %, sustentado en antecedentes de otros estudios realizados en México. Sin embargo se considera que es de importancia hacer estimaciones confiables dado que la biomasa en raíces puede representar una variación entre el 10 y 40 % de la contenida en la vegetación.

Teniendo esto en cuenta, se realizaron dos estimaciones de biomasa aérea contenida en ramillas, follaje y raíces; una de ellas expandiendo a partir de las proporciones de contenido de biomasa mencionadas por Cooper (1982), y la otra considerando el FEB de 1.3 con base en el volumen maderable del arbolado, se aplicó un factor de

proporción de 18 % en raíces respecto a la biomasa aérea para este último caso, como lo señala el estudio realizado para el Distrito Federal.

La proyección de los volúmenes de biomasa contenida en follaje y ramillas así como en raíces, estimada en forma indirecta mediante los factores proporcionados por Cooper (1982) y los utilizados por el Gobierno del Distrito Federal 2001, los cuales presentan semejanza en los valores de distribución de biomasa acumulada en las distintas estructuras del arbolado, generan los resultados mostrados en el Cuadro No 3.

Cuadro No. 3. Distribución de biomasa y contenido de carbono en distintas estructuras del arbolado de la plantación de estudio.

ESTRUCTURA	% DE BIOMASA	MATERIA SECA Ton/Ha	CONTENIDO DE CARBONO Ton/Ha
Troncos y Ramas	81	57.812	28.906
Ramillas y Follaje	2	1.427	00.713
Raíces	17	12.133	6.066
Total	100	71.372	35.685

Con base a proporciones establecidas por Cooper (1982).

Por otro lado, aplicando el factor de expansión con valor de 1.3 respecto al volumen maderable del arbolado obtenido mediante el muestreo y desarrollando la relación $C_{BA}=V*WD*BEF*CC$ donde el volumen (V) como base del cálculo es 123.003 m³ volumen total árbol ($C_{BA}=123.005*0.47*1.3*0.5$), obtenemos los datos mostrados en el Cuadro No 4.

Cuadro No. 4. Contenido de carbono estimado por el factor de expansión de biomasa de FAO-IPCC (1.3), partiendo del volumen maderable.

ESTRUCTURA	VOLUMEN MADERABLE (m ³ /ha)	MATERIA SECA (Ton/ha)	CONTENIDO DE CARBONO (Ton/ha)
Troncos y Ramas (vta)	123.005	57.812	28.906
Biomasa Aérea			37.578
Biomasa de Raíces			6.764
Carbono en Vegetación			44.342

Con base a proporciones establecidas por medio del BEF, propuesto por FAO e IPCC.

En ambos cuadros, se aprecia una diferencia de 8.6 toneladas de carbono contenido por hectárea obtenido mediante las distintas formas de cálculo descritas, por lo que es

evidente la necesidad de estudios que puedan alimentarse con el total de la información recabada en el sitio de interés y tener una evaluación más realista del comportamiento de carbono capturado y almacenado en la vegetación.

Para los efectos del presente estudio, bajo las condiciones de limitación en la disponibilidad de la información requerida para las estimaciones, se tomaron ambos procedimientos y se desarrollaron dos escenarios conforme a lo explicado.

3.2.1.4. Biomasa en el Mantillo

Para satisfacer los requerimientos del protocolo de Kyoto, ha sido necesario desarrollar métodos para estimar cambios en el almacén de carbono y cómo estos almacenes pueden cambiar en resultado al manejo, el interés ha sido particularmente importante respecto al almacenamiento de carbono en los bosques por la dinámica con que pueden cambiar dada la demanda cada vez más grande de productos forestales; se considera que más del 70% del carbono almacenado en el suelo de bosques lo producen las raíces finas y el follaje que cae de los árboles, lo que resulta importante, dado que algunos estudios muestran que los pinos pierden el 25% del follaje por año (Göran y Riitta, 2001).

La materia orgánica de los suelos está formada por los restos y productos de descomposición de plantas y animales, la cantidad, es derivada de las plantas tanto de sus partes aéreas como de las raíces. Por lo general las acículas constituyen el 80% de los restos y las raíces el 20%, entre los factores que influyen en la descomposición de la materia orgánica son:

- a). La temperatura ambiental y del suelo;
- b). Humedad, precipitación y clima en general;
- c). Tipo de material que incorpora; y
- d). Tipo de microorganismos del suelo.

Los principales materiales acumulados en el suelo que más tardan en descomponerse, son aquellos formados por carbono como la celulosa, hemicelulosa, lignina, citina ± humus (Arteaga, 2004).

Con datos observados y recabados de otros autores, Arteaga (2004), describe el ciclo de descomposición de las acículas de *Pinus silvestris* en las siguientes fases:

Primavera 40% de las agujas vivas que están en el árbol son infectadas por el hongo parásito *Lophodermium pinaster*.

Otros hongos atacan hasta que las acículas envejecen y adquieren una coloración parda infectándose el 90% de ellas.

Otoño Las agujas caen al suelo formando parte del mantillo durante 6 meses, son atacadas por *Desmazeriella acícula* y las agujas se hacen parte de la materia orgánica.

El exterior de las agujas es atacado por *Sympodiella acícula* y *Helicoma monosperma* produciendo materiales oscuros.

Después de dos años las agujas se comprimen y fragmentan siendo atacadas por la mesofauna.

Los ácaros y otros como basidiomicetos y las conidiosporas de los hongos atacan en forma simultánea.

En siete años los restos se convierten en materia orgánica.

Todos los productos que resultan de la descomposición y humificación de la materia orgánica se convierten en agua, anhídrido carbónico y minerales, este proceso se llama mineralización; asimismo menciona que según Swift, *et al.* (1979), existen algunas constantes de descomposición por tipos de tejido para diferentes climas, como se muestra en el Cuadro No 5.

Cuadro No. 5. Constantes de descomposición por tipo de tejido.

TEJIDO	CONSTANTE DE DESCOMPOSICION K/AÑO	
	Bosques templados Deciduos	Bosques tropicales Lluviosos
Estructuras reproductivas	2.22	9.65
Acículas	1.61	2.55
Madera	0.33	0.37

Göran y Riitta (2001), señalan que en pinos se asume normalmente una pérdida del 25% de sus agujas por año y 5% de sus ramas, materiales que van formando el mantillo en el suelo para después ser transformado en materia orgánica.

En la plantación, se encontró un promedio de 1,136.74 gramos de hojarasca por m² que constituye el mantillo y de ella, una vez que las muestras fueron secadas a 80° C por 72 horas, se obtuvo 1,024.18 gramos de materia seca por m².

Estos datos evidencian la existencia de 10,241.83 kilogramos de materia seca por hectárea la cual se traduce en alrededor de 5,120.91 kg de carbono (5.1 ton/ha), si consideramos que el 50% de la materia seca está constituida por carbono.

Con esta base, podemos aseverar que existe acumulado en el mantillo un promedio de ½ kg de carbono por metro cuadrado, sin embargo es necesario resaltar que en las desviaciones obtenidas para cada sitio de la muestra, se tienen diferencias desde 13.42 gr hasta 577.22 gr de materia seca por metro cuadrado.

Lo anterior se atribuye a que la plantación ha sido afectada por incendios forestales en forma aleatoria en el tiempo y espacio que si bien no han acabado con los árboles, si ha alterado la cantidad de hojarasca que se ha depositado en el suelo y la que ha logrado incorporarse mediante la descomposición, provocando que la acumulación de biomasa no haya sido homogénea en toda la superficie de estudio.

Bajo esas condiciones, al saber que los datos obtenidos de materia seca acumulada en el mantillo, no representan las cantidades totales acumuladas desde el establecimiento de la plantación, sería impreciso aventurar datos sobre el carbono que se almacena por efecto de la acumulación del mantillo.

Por ello, se puede aseverar que en las condiciones y cantidades actuales de materiales acumulados sobre el piso de la plantación, se pueden emitir alrededor de 5 toneladas de carbono por hectárea que se queme por efecto de los incendios forestales.

3.2.1.5. Crecimiento y Acumulación de Biomasa

En bosques de coníferas no es difícil determinar el comportamiento del incremento o crecimiento del arbolado, vástenos saber el tiempo de paso mediante el que podemos calcular los incrementos en volumen maderable en el bosque, o bien conocer el crecimiento en biomasa vegetal, la que puede ser derivada de conocer el crecimiento en altura, en diámetro y volumen maderable.

Rodríguez (2004), describe que la Sociedad Americana de Forestales (SAF) define el término “sitio” como un área considerada en términos de su ambiente, particularmente determinada por el tipo y calidad de la vegetación que el área soporta y que una estimación de la producción potencial de madera de un sitio para una especie en particular o para un tipo de bosque, se puede considerar como una medida de la productividad potencial del terreno forestal, medida a la que se le ha llamado “calidad de estación”.

Existen los métodos directos e indirectos para evaluar la calidad del sitio, desde los años de 1870's algunos investigadores dedujeron que existe una notable correlación entre la calidad y la altura media de los árboles en un rodal, asimismo se encontró una correlación negativa entre densidad y crecimiento en diámetro y de igual forma con el volumen; pero el crecimiento en altura no se conduce en el mismo sentido, deduciendo que el crecimiento en altura es utilizable como índice de calidad (Clutter *et al.*, 1983).

De todas las medidas indirectas obtenidas del sitio, la altura de árboles en relación con la edad ha sido la más práctica, consistente y útil lo que es llamado "índice de sitio". En teoría, el crecimiento en altura es sensible a las diferencias en calidad de sitio, el que es poco afectado por la densidad y composición de especies y es relativamente estable bajo la variación de intensidades de corta (Avery y Burkhart, 1983; Clutter et al, 1983).

En bosques o árboles de otras especies diferentes a las coníferas, aunque el proceso de crecimiento y acumulación de biomasa es similar de manera natural, para realizar investigaciones que permitan cuantificar ese proceso en el tiempo, es una tarea más elaborada para lo que se tiene que hacer uso de herramientas de estadística que ayuden a predecir los volúmenes generados en crecimiento y acumulados en la vegetación; normalmente esto se hace alimentando modelos con información tomada de relaciones alométricas del arbolado y relacionando de alguna forma su comportamiento en el tiempo (con respecto a la edad) obteniendo una aproximación de los volúmenes concentrados en el bosque.

Sin embargo, dado el comportamiento dibujado por una curva sigmoideal típica representativa del crecimiento e incremento de los bosques que caracteriza de manera genérica el ciclo biológico de la vegetación, nos sugiere la existencia de períodos de crecimiento que se asocian con la funcionalidad de la vegetación en términos de acumulación de biomasa.

Esto es, existe un periodo de crecimiento permanente o sostenido hasta un momento en el que la curva tiende a conformarse en una asíntota, iniciándose de manera correspondiente un proceso de acumulación asíntótico en relación al crecimiento del arbolado.

De ello, es prudente interpretar entonces que el bosque tiene dos funciones bien diferenciadas respecto a la transformación de biomasa, traducidas en un periodo de captura de carbono y otro de almacenamiento.

En el momento en que el bosque ha llegado a su máximo crecimiento, ha dejado de tener funciones de captura e inicia un proceso de almacenamiento dado que la cantidad

de carbono capturado es menor que la cantidad de carbono emitido por los procesos de respiración y descomposición de materiales depositados en el suelo (detritus), en el sentido de que la acumulación de biomasa tiene un comportamiento asintótico.

Con ello, la durabilidad o residencia del carbono almacenado condicionada por los fenómenos que lo regresan a la atmósfera, estará en función del manejo técnico que se aplique para su conservación, manejo que deberá atender explícitamente acciones de control y combate de incendios forestales, prevención y combate de plagas y enfermedades, reforestación, manejo de arbolado dañado por fenómenos meteorológicos, programas de reconversión de terrenos al uso forestal, utilización de productos maderables en materiales duraderos, etc.

De esta forma, se puede entender que en función del máximo crecimiento de la vegetación soportado en un sitio dado, se traduce en la capacidad de carga de biomasa acumulada y capacidad de carga de carbono almacenado en la biomasa por efecto de la productividad del sitio.

3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.3.1. Capacidad de Carga del Sitio

La evaluación de la capacidad de carga del sitio, requiere un análisis detallado del comportamiento de la acumulación de biomasa por efecto del crecimiento, de tal manera que, si el volumen maderable de cada árbol nos puede servir para su estimación, entonces es necesario conocer el comportamiento de tres variables proyectadas en el tiempo para calcular dicho volumen, las cuales son:

- 1.- Comportamiento del crecimiento en altura del arbolado;
- 2.- Comportamiento del crecimiento en diámetro del arbolado; y
- 3.- Comportamiento del número de árboles por hectárea.

En el SEDEMEX (1990), se señala que el máximo crecimiento en bosques naturales de esta especie ubicados en la zona de estudio, ocurre aproximadamente a la edad de entre 45 y 50 años alcanzando la altura máxima entre los 28 y 30 metros y un diámetro aproximado a los 40 cm.

Por lo anterior, fue necesario consultar modelos de crecimiento en altura para la zona, se encontró que en un estudio de modelos de manejo forestal para el Estado de México elaborado en 1993, se determinó que el modelo de crecimiento en altura para la especie bajo estudio es:

$$Hx = \beta_1 [1 - \exp(\beta_2 E)]^{\beta_3} \quad (1.5)$$

donde:

Hx: Altura dominante de la especie x en un sitio definido

E: Edad del arbolado

Exp: antilogaritmo

cuyos estimadores de los parámetros fueron:

$$\beta_1 = 28.7137$$

$$\beta_2 = -0.0822$$

$$\beta_3 = 3.58088$$

Esta ecuación derivada del modelo de Chapman Richards, de acuerdo a los autores fue el que mejor ajuste presentó y como característica muestra una curva sigmoideal con asíntota constante y definida por su parámetro β_1 , la ventaja de este modelo es que presenta dos parámetros de forma (β_2 y β_3), los cuales definen diferentes tasas de aceleración del crecimiento e incluso pueden mostrar tasas casi lineales como las que presenta frecuentemente el crecimiento en altura de algunas especies a edades específicas.

Para estimar el crecimiento en diámetro del arbolado con respecto a la edad, se encontró que el modelo que ajustó esta variable estaba representado por:

$$DN = e^{\beta_1/E} SI^{\beta_2} \quad (1.6)$$

$$\text{Ln}(\text{DN}) = \beta_1/E + \beta_2 \text{Ln}(\text{SI})$$

donde:

Ln(DN): Expresión logarítmica del diámetro normal;

E: Edad del arbolado;

Ln(SI): Expresión logarítmica de índice de sitio en diámetro;

SI = 15;

$\beta_1 = -12.379298$; y

$\beta_2 = 1.1777687$

Esta ecuación arroja un diámetro excesivo cuando se usa un IS=40, cuando IS=30 predice a la edad de 50 años un diámetro de 42.8 cm, sin embargo a la edad actual estima 32.0 cm, lo cual es inadecuado a las condiciones reales; para IS=20 predice 26.5 cm de diámetro a la edad de 50 años y 19.8 a la edad actual; el IS=15 establece un diámetro de 14.1 cm a la edad actual, pero a los 50 años de edad llega solamente hasta los 18.9 cm.

Ese comportamiento obligó a utilizar un IS=15 y generar una gama de parámetros mediante la manipulación algebraica de la ecuación, con la finalidad de encontrar aquellos que pudieran ajustar al diámetro encontrado en campo y que se comportara alcanzando diámetros alrededor de los 40 cm a la edad de los 50 años.

Para ello, se despejó la ecuación dejando un parámetro fijo y otro en función de la edad en cada caso, de los parámetros que se obtienen de este manejo se seleccionaron los que de manera más comportada predijeron el diámetro existente en campo y su tendencia de crecimiento se acercó al que se alcanza a la edad de máximo crecimiento.

El procedimiento fue:

$$\text{Ln}(\text{DN}) = \beta_1/E + \beta_2 \text{Ln}(\text{SI})$$

despejando β_1 ; obtenemos:

$$\beta_1 = E \text{Ln} \left[\text{DN}/(\text{SI})^{\beta_2} \right]$$

despejando β_2 , obtenemos:

$$\beta_2 = \frac{E \ln(DN) - \beta_1}{E \ln(SI)}$$

Para:

DN = 13.8 (Diámetro cuadrático en la plantación)

SI = 15

E = 23

No obstante, realizado la combinación de los valores estimados de los parámetros, se observó que en las combinaciones hechas, el comportamiento modelado de crecimiento en diámetro era adecuado sólo para la primera etapa (1 a 23 años) de crecimiento de los árboles y en otra combinación era adecuado para la segunda etapa (24 a 50 años); ello determinó la necesidad de ajustar los datos de diámetros estimados, conjuntándolos y aplicando un procedimiento de regresión no lineal con el uso del paquete de cómputo estadístico SAS y bajo la estructura del modelo Chapman - Richards, se obtuvo un modelo con valores estimados de los parámetros, como el que se muestra en seguida y que al mismo tiempo presentó un coeficiente de ajuste $R^2 > 0.90$.

$$DN = \beta_0 [1 - \exp (\beta_1 E)]^{\beta_2} \quad (1.7)$$

$$DN = 35 [1 - \exp (- 0.0431 E)]^{1.9605}$$

Ahora, si bien a este momento tenemos las ecuaciones que nos pueden predecir el diámetro y la altura como variables importantes para el cálculo del volumen maderable, es necesario conocer el comportamiento de la densidad.

Para la obtención del número de árboles por hectárea, en el estudio de modelos de manejo forestal para el Estado de México, sus autores derivaron un modelo del índice de densidad de Reineke, el cual estima la relación entre el número máximo de árboles y el diámetro cuadrático y tomando en cuenta varias aseveraciones y supuestos sobre las

condiciones de los bosques que se ubican en el territorio estatal, se pudo determinar que el modelo que arroja el número de árboles por hectárea estaría conformado por:

$$N = \exp (\beta_2 PP) DN^{\beta_1} \quad (1.8)$$

donde:

- N:** Número de árboles por hectárea;
- exp:** Base de los logaritmos naturales;
- PP:** Proporción de ocupación de espacio de la especie;
- DN:** Diámetro cuadrático (cm); y
- β_i :** Estimadores de parámetros

Utilizando el modelo ajustado en el estudio de referencia y aplicando logaritmos para linealizar la ecuación, el modelo resultante fue:

$$\ln(N) = \beta_2 PP + \beta_1 \ln(DN)$$

$$\ln(N) = 10.7170164 - 1.352889 \ln(DN)$$

Dado que PP tiene en este caso un valor de uno (PP = 1) bajo la consideración de que la ocupación del espacio por la especie es del 100%, podemos entonces estimar el número de árboles por ha y volumen maderable conforme a la edad de la plantación.

Cuadro No. 6. Estimación de altura, diámetro, número de árboles y volúmenes por hectárea de acuerdo a la edad del arbolado.

EDAD (años)	ALTURA (m)	DIAMETRO NORMAL (cm)	ARBOLES/ha	VOLUMEN m ³ /ARBOL	VOLUMEN m ³ /ha
1	0.0032	0.07	2500.00	0.00	0.00
2	0.0334	0.26	2500.00	0.00	0.06
3	0.1239	0.56	2500.00	0.00	0.31
4	0.3018	0.94	2500.00	0.00	0.92
5	0.5845	1.40	2500.00	0.00	2.09
6	0.9799	1.93	2500.00	0.00	3.98
7	1.4882	2.50	2500.00	0.00	6.71
8	2.1035	3.13	2500.00	0.00	10.39
9	2.8156	3.78	2500.00	0.00	15.07
10	3.6119	4.47	2500.00	0.00	20.75
11	4.4783	5.18	2500.00	0.01	27.42
12	5.4005	5.92	2500.00	0.01	35.02
13	6.3643	6.66	2500.00	0.01	43.49

Cuadro No. 6. Continuación...

EDAD (años)	ALTURA (m)	DIAMETRO NORMAL (cm)	ARBOLES/ha	VOLUMEN m ³ /ARBOL	VOLUMEN m ³ /ha
14	7.3563	7.41	2500.00	0.02	52.75
15	8.3645	8.17	2500.00	0.02	62.69
16	9.3779	8.93	2333.04	0.03	73.23
17	10.3870	9.69	2089.27	0.04	84.26
18	11.3836	10.44	1887.50	0.05	95.67
19	12.3609	11.19	1718.56	0.06	107.39
20	13.3133	11.94	1576	0.08	119.32
21	14.2362	12.67	1454	0.09	131.36
22	15.1264	13.39	1349	0.11	143.46
23	15.9811	14.10	1258	0.12	155.54
24	16.7987	14.80	1178	0.14	167.53
25	17.5781	15.48	1109	0.16	179.40
26	18.3187	16.15	1047	0.18	191.08
27	19.0205	16.80	992	0.20	202.54
28	19.6839	17.43	944	0.23	213.76
29	20.3095	18.06	900	0.25	224.69
30	20.8983	18.66	861	0.27	235.33
31	21.4515	19.25	825	0.30	245.65
32	21.9702	19.82	793	0.32	255.64
33	22.4560	20.38	764	0.35	265.30
34	22.9102	20.91	738	0.37	274.62
35	23.3344	21.44	714	0.40	283.59
36	23.7301	21.94	691	0.42	292.22
37	24.0988	22.43	671	0.45	300.50
38	24.4421	22.91	652	0.47	308.46
39	24.7614	23.37	635	0.50	316.08
40	25.0581	23.81	619	0.52	323.37
41	25.3337	24.24	604	0.55	330.35
42	25.5894	24.66	590	0.57	337.02
43	25.8267	25.06	578	0.59	343.40
44	26.0465	25.44	566	0.62	349.48
45	26.2503	25.82	555	0.64	355.29
46	26.4389	26.18	545	0.66	360.82
47	26.6136	26.52	535	0.68	366.10
48	26.7752	26.86	526	0.71	371.13
49	26.9246	27.18	518	0.73	375.93
50	27.0628	27.49	510	0.75	380.49

Las estimaciones de altura del arbolado, se obtuvieron usando el modelo encontrado, al cual no se le hizo ningún arreglo adicional para ajustar sus predicciones específicas al sitio, por las siguientes razones.

Es prudente comentar que el sitio de crecimiento de la plantación presenta condiciones más limitadas por los factores climáticos, tales como la altura sobre el nivel del mar, afectación recurrente de incendios forestales y pastoreo, terrenos con un grado de deterioro considerable al momento de establecer la plantación, la afectación de despuntado por roedores (ardillas) que se observó en los árboles, de lo que, sin que se haya hecho una estimación del grado de ataque, estos factores nos permiten asumir

que en el transcurso de crecimiento, los árboles han sido dañado de manera recurrente y que son los motivos por los cuales no se haya expresado el crecimiento en el potencial que el modelo refleja, observando que las alturas que predice el modelo están un poco arriba de las encontradas en la plantación.

De esta manera, se asumió que este representa la generalidad esperada en el crecimiento en altura de la especie para todo el territorio del Estado de México y observando que la altura asintótica se apeg a lo que ocurre en la zona de estudio.

Hechas estas aclaraciones, podemos apreciar entonces la curva de crecimiento en volumen mostrada en la Figura No 3, que a su vez representa la capacidad de carga del sitio en acumulación de biomasa, mediante el establecimiento de plantaciones con estos fines en el área natural protegida.

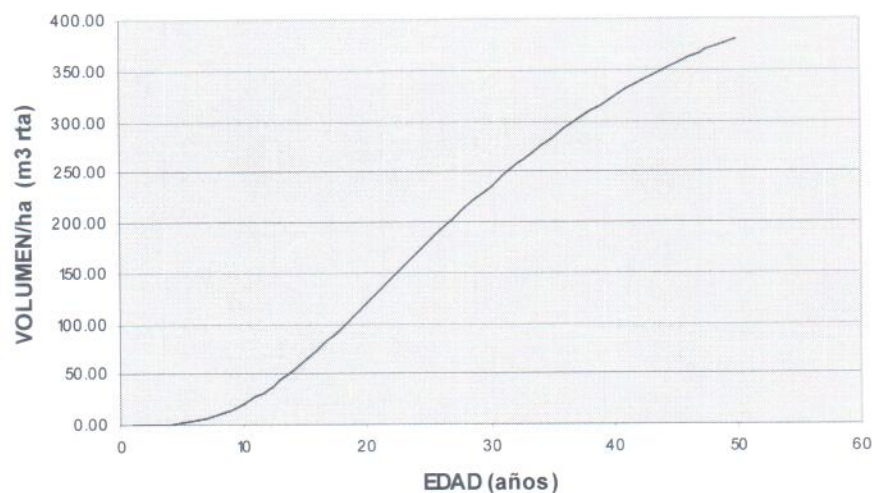


Figura 3. Curva de crecimiento y acumulación de volumen maderable, representativa de la capacidad de carga del sitio

Por otra parte, los modelos aquí utilizados fueron creados para estimar crecimientos en bosques naturales, por lo que el número de árboles iniciales debe ser considerado el que se haya establecido en la plantación, siendo de 2,500 por hectárea y que de acuerdo al modelo de densidad, este número se conservaría hasta una edad entre los 15 y 20 años, empezando en ese momento la mortandad por la competencia dada por espacio de crecimiento, disponibilidad de nutrientes, agua, luz, etc., entre individuos.

Dicho lo anterior, una estimación del crecimiento y acumulación de biomasa en la plantación, se considera adecuada si se proyecta anualmente, para efectos de valorar económicamente las cantidades de carbono que se están capturando y almacenando en la vegetación, como se planteó en el objetivo de este estudio.

Con estos datos, la capacidad de carga del sitio respecto al crecimiento y la acumulación de biomasa en la vegetación, se puede plantear en los dos escenarios propuestos. Uno generando la expansión de biomasa a partir de volumen maderable obtenido del arbolado, usando los índices de distribución propuestos por Cooper (1982) y el otro método usando el factor de expansión de biomasa propuesto por FAO e IPCC (BEF=1.3). Estos resultados y escenarios posibles, se presentan en los Cuadros 7 y 8.

Cuadro No. 7. Proyección de biomasa acumulada a la capacidad de carga del sitio, con índices de distribución propuestos por Cooper (1982).

	SITUACION ACTUAL	POTENCIAL (A edad actual)	POTENCIAL (A edad de máximo crecimiento)
EDAD	23	23	50
DENSIDAD (Arb/ha)	1,306	1,258	510
DIAMETRO (cm)	13.8	14	27.49
ALTURA (m)	7.0	15.9	27.0
BIOMASA POTENCIAL EN TRONCOS Y RAMAS (m ³)	123.005	155.54	380.49
CARBONO (Ton/ha)	35.69	45.12	110.40

Cuadro No. 8. Proyección de biomasa y carbono acumulados a la capacidad de carga del sitio, mediante el factor de expansión de FAO e IPCC.

	SITUACION ACTUAL	POTENCIAL (A edad actual)	POTENCIAL (A edad de máximo crecimiento)
BIOMASA EN TRONCOS Y RAMAS (m ³ vta)	123.005	155.54	380.49
CARBONO CONTENIDO (ton/ha)	44.342	56.07	137.16

3.3.2. Rentabilidad Económica por Captura de Carbono

3.3.2.1. Beneficios Esperados

Una vez conocida la capacidad de carga del sitio, se pueden hacer evaluaciones económicas del carbono en su modalidad de captura y de almacenamiento, dado que el valor real del servicio ambiental está en función del carbono absorbido y sustraído de las concentraciones atmosféricas; esto implica que la valoración económica deberá hacerse estimando el valor inicial de captura en el primer año y posteriormente debiera valorarse la función de almacenamiento del volumen acumulado en el sitio conforme se mantenga la plantación sin daños que mermen esta función, adquiriendo un nuevo valor económico en función de la biomasa acumulada anualmente, lo anterior se sustenta en el hecho de que no basta con que se haya capturado un volumen de carbono en la vegetación a través de la transformación en biomasa, sino la importancia de retenerlo por periodos prolongados en alguna forma de almacenamiento.

Posterior a la edad de 50 años, se pagaría en mayor proporción el servicio de almacenamiento y mínima proporción el de captura, dado que las tasas de incremento de biomasa han dejado de ser persistentes, por lo que el valor de la plantación tiende a ser casi constante en los años donde el crecimiento se comporta de manera asintótica, bajo el supuesto de la venta de la cantidad de carbono capturada anualmente y el almacenado en biomasa generada por crecimiento.

Una vez estimada la biomasa acumulada a la edad actual de la plantación y haber proyectado los volúmenes posibles de obtener a la capacidad de carga del sitio en base al potencial productivo, se puede valorar el almacenamiento de carbono en términos de intercambio económico.

Para ello, tomamos de base el ejercicio realizado en Costa Rica, en el que se estableció un precio unitario o precio piso de comercialización (país vendedor certificado internacionalmente), donde se consideró únicamente el costo de oportunidad del cambio en el uso del suelo de ganadería extensiva a conversión forestal; precio que

incluso se ha manejado en otros países como Estados Unidos y Noruega, estableciéndose en un monto de diez dólares (us \$10.00) por tonelada de carbono.

Este precio ha sido vigente hasta en tanto sean establecidas las reglas claras del mercado de carbono para que posteriormente sea regulado por las fuerzas del mercado.

Con los argumentos específicos del caso, podemos proyectar un valor en el mercado del servicio ambiental que ofrece la plantación; arrojando los beneficios económicos siguientes.

Cuadro No. 9. Proyección de captura y acumulación de carbono mediante índices de Cooper (1982) y su valor económico.

EDAD (años)	VOL (m ³) MADERABLE	TONELADAS BIOM. SECA	CARBONO (Ton/ha)	CREC. ANUAL (Ton C/ha)	VALOR ECONOMICO (\$/ha)	
					Captura (\$)	Almac. (\$)
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.12
2	0.06	0.04	0.02	0.02	1.89	2.01
3	0.31	0.18	0.09	0.07	7.88	9.89
4	0.92	0.54	0.27	0.18	19.57	29.46
5	2.09	1.21	0.61	0.34	37.18	66.64
6	3.98	2.31	1.15	0.55	60.11	126.75
7	6.71	3.89	1.95	0.79	87.28	214.03
8	10.39	6.03	3.02	1.07	117.37	331.40
9	15.07	8.74	4.37	1.36	149.07	480.46
10	20.75	12.04	6.02	1.65	181.15	661.61
11	27.42	15.91	7.95	1.93	212.56	874.17
12	35.02	20.32	10.16	2.21	242.43	1,116.60
13	43.49	25.24	12.62	2.46	270.10	1,386.70
14	52.75	30.61	15.30	2.69	295.09	1,681.79
15	62.69	36.38	18.19	2.89	317.10	1,998.89
16	73.23	42.49	21.25	3.06	335.95	2,334.84
17	84.26	48.89	24.44	3.20	351.61	2,686.44
18	95.67	55.52	27.76	3.31	364.11	3,050.55
19	107.39	62.31	31.16	3.40	373.58	3,424.13
20	119.32	69.23	34.62	3.46	380.19	3,804.32
21	131.36	76.22	38.11	3.50	384.15	4,188.48
22	143.46	83.24	41.62	3.51	385.70	4,574.17
23	155.54	90.25	45.12	3.50	385.06	4,959.23
24	167.53	97.21	48.61	3.48	382.49	5,341.72
25	179.40	104.09	52.05	3.44	378.23	5,719.95
26	191.08	110.87	55.44	3.39	372.51	6,092.46
27	202.54	117.52	58.76	3.33	365.54	6,458.00
28	213.76	124.03	62.02	3.25	357.54	6,815.53
29	224.69	130.38	65.19	3.17	348.68	7,164.22
30	235.33	136.55	68.27	3.09	339.15	7,503.36
31	245.65	142.54	71.27	2.99	329.08	7,832.45

Cuadro No. 9. Continuación...

EDAD (años)	VOL (m ³) MADERABLE	TONELADAS BIOM. SECA	CARBONO (Ton/ha)	CREC. ANUAL (Ton C/ha)	VALOR ECONOMICO (\$/ha)	
					Captura (\$)	Almac. (\$)
32	255.64	148.34	74.17	2.90	318.63	8,151.08
33	265.30	153.94	76.97	2.80	307.91	8,458.98
34	274.62	159.35	79.67	2.70	297.02	8,756.01
35	283.59	164.55	82.28	2.60	286.07	9,042.08
36	292.22	169.56	84.78	2.50	275.12	9,317.20
37	300.50	174.37	87.18	2.40	264.25	9,581.46
38	308.46	178.98	89.49	2.31	253.52	9,834.97
39	316.08	183.40	91.70	2.21	242.96	10,077.93
40	323.37	187.64	93.82	2.12	232.63	10,310.56
41	330.35	191.69	95.84	2.02	222.54	10,533.10
42	337.02	195.56	97.78	1.94	212.73	10,745.83
43	343.40	199.25	99.63	1.85	203.21	10,949.04
44	349.48	202.79	101.39	1.77	194.01	11,143.05
45	355.29	206.15	103.08	1.68	185.12	11,328.17
46	360.82	209.37	104.68	1.61	176.55	11,504.72
47	366.10	212.43	106.21	1.53	168.31	11,673.03
48	371.13	215.35	107.67	1.46	160.39	11,833.42
49	375.93	218.13	109.06	1.39	152.80	11,986.22
50	380.49	220.78	110.39	1.32	145.53	12,131.75

\$10.99 VALOR DEL DÓLAR EL 14 DE JUNIO DE 2005.

Cuadro No. 10. Proyección de captura y acumulación de carbono por el factor de expansión de FAO e IPCC y su valor económico.

EDAD (años)	VOL (m ³) MADERABLE	TONELADAS BIOM. SECA	CARBONO (Ton/ha)	CREC. ANUAL (Ton C/ha)	VALOR ECONOMICO (\$/ha)	
					Captura (\$)	Almac. (\$)
1	0.00	0.01	0.00	0.00	0.15	0.15
2	0.06	0.10	0.02	0.02	2.35	2.49
3	0.31	0.48	0.11	0.09	9.80	12.29
4	0.92	1.42	0.33	0.22	24.31	36.60
5	2.09	3.21	0.75	0.42	46.20	82.80
6	3.98	6.10	1.43	0.68	74.69	157.49
7	6.71	10.30	2.42	0.99	108.44	265.94
8	10.39	15.94	3.75	1.33	145.83	411.77
9	15.07	23.12	5.43	1.69	185.22	596.99
10	20.75	31.83	7.48	2.05	225.08	822.08
11	27.42	42.06	9.88	2.40	264.11	1,086.19
12	35.02	53.72	12.62	2.74	301.23	1,387.42
13	43.49	66.72	15.68	3.05	335.61	1,723.03
14	52.75	80.91	19.01	3.34	366.66	2,089.69
15	62.69	96.17	22.60	3.59	394.01	2,483.70
16	73.23	112.33	26.40	3.80	417.43	2,901.13
17	84.26	129.25	30.37	3.98	436.88	3,338.01
18	95.67	146.77	34.49	4.12	452.42	3,790.43
19	107.39	164.74	38.71	4.22	464.19	4,254.62
20	119.32	183.03	43.01	4.30	472.40	4,727.02
21	131.36	201.51	47.36	4.34	477.33	5,204.35
22	143.46	220.07	51.72	4.36	479.24	5,683.59
23	155.54	238.59	56.07	4.35	478.45	6,162.04

Cuadro No. 10. Continuación...

EDAD (años)	VOL (m ³) MADERABLE	TONELADAS BIOM. SECA	CARBONO (Ton/ha)	CREC. ANUAL (Ton C/ha)	VALOR ECONOMICO (\$/ha)	
					Captura (\$)	Almac. (\$)
24	167.53	257.00	60.39	4.32	475.26	6,637.30
25	179.40	275.19	64.67	4.28	469.96	7,107.27
26	191.08	293.11	68.88	4.21	462.85	7,570.12
27	202.54	310.70	73.01	4.13	454.20	8,024.32
28	213.76	327.90	77.06	4.04	444.25	8,468.57
29	224.69	344.68	81.00	3.94	433.25	8,901.82
30	235.33	360.99	84.83	3.83	421.40	9,323.23
31	245.65	376.83	88.55	3.72	408.90	9,732.13
32	255.64	392.16	92.16	3.60	395.91	10,128.04
33	265.30	406.97	95.64	3.48	382.59	10,510.63
34	274.62	421.26	99.00	3.36	369.06	10,879.69
35	283.59	435.02	102.23	3.23	355.45	11,235.14
36	292.22	448.26	105.34	3.11	341.85	11,577.00
37	300.50	460.97	108.33	2.99	328.35	11,905.34
38	308.46	473.17	111.20	2.87	315.01	12,220.35
39	316.08	484.86	113.94	2.75	301.89	12,522.24
40	323.37	496.05	116.57	2.63	289.05	12,811.28
41	330.35	506.76	119.09	2.52	276.51	13,087.80
42	337.02	516.99	121.49	2.41	264.33	13,352.12
43	343.40	526.77	123.79	2.30	252.50	13,604.62
44	349.48	536.10	125.98	2.19	241.06	13,845.69
45	355.29	545.01	128.08	2.09	230.01	14,075.70
46	360.82	553.50	130.07	2.00	219.37	14,295.07
47	366.10	561.60	131.98	1.90	209.13	14,504.20
48	371.13	569.32	133.79	1.81	199.30	14,703.50
49	375.93	576.67	135.52	1.73	189.86	14,893.36
50	380.49	583.67	137.16	1.65	180.83	15,074.18

\$10.99 VALOR DEL DÓLAR EL 14 DE JUNIO DE 2005.

3.3.2.2. Costos de Establecimiento y Mantenimiento

Para los propósitos de la valoración económica por la comercialización del servicio ambiental, es necesario estimar los costos de establecimiento de la plantación que serán analizados con referencia a los beneficios para la obtención de los indicadores de rentabilidad.

Asumiendo que para la instalación de la plantación debieron realizarse actividades de establecimiento en el primer año y de mantenimiento en los años subsecuentes, se consultaron los generadores de costos manejados por el Gobierno del Estado de México a través de PROBOSQUE, no sin antes resaltar que el costo de establecimiento fue asumido en su totalidad por el programa gubernamental de restauración de suelos; sin embargo el mantenimiento fue una actividad conferida a los propietarios de los

terrenos y que ocasionalmente mediante el programa de gobierno de prevención y combate de incendios forestales se realizaron acciones de protección.

Ello ocasionó que la plantación fuera afectada en forma recurrente por los incendios forestales, dado que los productores se desentendieron de esas actividades desalentados por la falta de recursos económicos que les permitieran invertir en labores de mantenimiento, cuidado y protección.

De esta manera, los costos se estimaron con los generadores siguientes:

a). Preparación del terreno con equipo komatsu D85A.

Costos Directos por Hora

Depreciación y mantenimiento	\$ 554.10
Combustibles y lubricantes	\$ 145.00
Operación	\$ 62.50
Suma	\$ 761.60

Rendimiento de subsoleo	1.25 ha/día (8 hrs)
Costo de subsoleo por hectárea/ha	\$ 4,874.24

Rendimiento de terraceo	1.00 ha/día (8 hrs)
Costo de terraceo por hectárea	\$ 6,092.80

Es necesario tomar en cuenta que el subsoleo en terrenos de mediana dureza se profundiza a 50 cm mínimamente, se estima que el volumen de material necesario a remover para formar una terraza es de 400 m³/ha; el costo del combustible (diesel) a junio de 2005 es de \$5.50/litro, el costo del operador del equipo es de \$250.00/día y el salario de un ayudante es de \$125.00/día.

Sin embargo, para tener mayor certeza en los costos de preparación del terreno, se consultaron los precios que cobran contratistas de maquinaria pesada para la realización de subsoleo y terraceo en forma simultánea, los cuales son del orden de los \$3,500.00 por hectárea en la zona, precio que al sumarle el costo de combustibles y

suelo del operador, arroja un costo promedio de preparación del terreno de \$5,000.00 por hectárea, valor usado para este análisis.

b). Producción de planta en viveros del Gobierno del Estado.

Producción de planta en bolsa forestal \$ 0.75/árbol

Densidad de plantación 2,500/ha
Costo de planta/ha \$ 1,875.00/ha

c). Transporte de planta al sitio de plantación.

Transporte en camión tipo rabón (2viajes/día) 5,000 arbolitos/viaje

Salario de Chofer	\$ 125.00/día	\$ 62.50/ha
Carga y descarga (4 jornales)	\$ 320.00/día	\$ 160.00/ha
Combustible (80 lts/día)	\$ 440.00/día	\$ 220.00/ha
Renta de vehículo de transporte	\$ 500.00/día	\$ 250.00/ha
Total de transporte/ha		\$ 692.50/ha

d). Plantación.

Una persona por jornal cepea y planta 100 arbolitos	25 jornales/ha
Costo de jornales/ha (\$80.00/jornal)	\$ 2,000.00/ha
Trazo de la plantación y supervisión (2 técnicos) 5ha/día	\$ 80.00/ha
Total de plantación/ha	\$ 2,080.00/ha

e). Mantenimiento principalmente en prevención y combate de incendios forestales, programa anual.

Vehículo 3½ toneladas (vida útil 7 años)	\$ 450,000.00	\$ 64,285.71
Brigada 10 elementos 212 días (\$80/jor)	\$ 800.00/día	\$ 169,600.00
Comb. y lub. 60 lts/día (\$7.00/lt)	\$ 420.00/día	\$ 89,040.00
Lote de herramientas y prendas de vestir	\$ 40,200.00	\$ 42,800.00
	Suma	\$ 365,725.71
Total de mantenimiento/ha		\$ 365.72

De manera empírica, se ha considerado que una brigada de estas características tiene la capacidad para atender de manera eficiente una superficie de 1,000 hectáreas, lo que nos arroja un estimado del costo aplicado para protección en esas condiciones de \$ 365.72 por hectárea por año.

3.3.2.3. Análisis de Rentabilidad

Con los beneficios y costos generados para la operación de la plantación en términos de producción de servicios ambientales por captura de carbono, se realizó el cálculo del valor actual neto (VAN), considerando para esto una tasa de descuento de 9.62 valor correspondiente a CETES a 28 días de fecha 22 de junio de 2005, se obtiene el factor de actualización por la expresión $FA=(1+0.0962)^{-n}$ y se calcularon los resultados mostrados en los Cuadros No. 11 y 12.

Lo anterior bajo el concepto de que el valor dado al servicio ambiental, está entendido en términos de la captura de carbono por efecto del crecimiento en biomasa y no el almacenamiento, ya que éste último concepto se ha definido y discutido en el diseño del programa internacional enmarcado en el Protocolo de Kyoto, el cual para fines de financiamiento, no contempla el valor del carbono almacenado en la vegetación.

Cuadro No. 11. Estimación de rentabilidad de producción de servicios ambientales por captura de carbono con base en los indicadores de distribución de biomasa de Cooper (1982).

AÑO	COSTOS (\$) JUNIO DE 2005	BENEFICIOS (\$) JUNIO DE 2005	FACTOR DE ACTUALIZACION	COSTOS ACTUALIZADOS	BENEFICIOS ACTUALIZADOS
1	9,647.50	0.12	0.91	8,800.86	0.11
2	365.72	1.89	0.83	304.35	1.57
3	365.72	7.88	0.76	277.64	5.98
4	365.72	19.57	0.69	253.27	13.55
5	365.72	37.18	0.63	231.05	23.49
6	365.72	60.11	0.58	210.77	34.64
7	365.72	87.28	0.53	192.27	45.88
8	365.72	117.37	0.48	175.40	56.29
9	365.72	149.07	0.44	160.01	65.22
10	365.72	181.15	0.40	145.97	72.30
11	365.72	212.56	0.36	133.16	77.39
12	365.72	242.43	0.33	121.47	80.52
13	365.72	270.10	0.30	110.81	81.84
14	365.72	295.09	0.28	101.09	81.56
15	365.72	317.10	0.25	92.22	79.96
16	365.72	335.95	0.23	84.12	77.28
17	365.72	351.61	0.21	76.74	73.78
18	365.72	364.11	0.19	70.01	69.70
19	365.72	373.58	0.17	63.86	65.23
20	365.72	380.19	0.16	58.26	60.56
21	365.72	384.15	0.15	53.15	55.82
22	365.72	385.70	0.13	48.48	51.13
23	365.72	385.06	0.12	44.23	46.57
24	365.72	382.49	0.11	40.35	42.20
25	365.72	378.23	0.10	36.80	38.06

Cuadro No. 11. Continuación...

AÑO	COSTOS (\$) JUNIO DE 2005	BENEFICIOS (\$) JUNIO DE 2005	FACTOR DE ACTUALIZACION	COSTOS ACTUALIZADOS	BENEFICIOS ACTUALIZADOS
26	365.72	372.51	0.09	33.57	34.20
27	365.72	365.54	0.08	30.63	30.61
28	365.72	357.54	0.08	27.94	27.32
29	365.72	348.68	0.07	25.49	24.30
30	365.72	339.15	0.06	23.25	21.56
31	365.72	329.08	0.06	21.21	19.09
32	365.72	318.63	0.05	19.35	16.86
33	365.72	307.91	0.05	17.65	14.86
34	365.72	297.02	0.04	16.10	13.08
35	365.72	286.07	0.04	14.69	11.49
36	365.72	275.12	0.04	13.40	10.08
37	365.72	264.25	0.03	12.22	8.83
38	365.72	253.52	0.03	11.15	7.73
39	365.72	242.96	0.03	10.17	6.76
40	365.72	232.63	0.03	9.28	5.90
41	365.72	222.54	0.02	8.47	5.15
42	365.72	212.73	0.02	7.72	4.49
43	365.72	203.21	0.02	7.05	3.91
44	365.72	194.01	0.02	6.43	3.41
45	365.72	185.12	0.02	5.86	2.97
46	365.72	176.55	0.01	5.35	2.58
47	365.72	168.31	0.01	4.88	2.25
48	365.72	160.39	0.01	4.45	1.95
49	365.72	152.80	0.01	4.06	1.70
50	365.72	145.53	0.01	3.70	1.47
TOTAL				12,230.39	1,583.19

Cuadro No. 12. Estimación de rentabilidad de producción de servicios ambientales por captura de carbono con base al factor de expansión de biomasa propuesto por FAO-IPCC.

AÑO	COSTOS (\$) JUNIO DE 2005	BENEFICIOS (\$) JUNIO DE 2005	FACTOR DE ACTUALIZACION	COSTOS ACTUALIZADOS	BENEFICIOS ACTUALIZADOS
1	9,647.50	0.15	0.91	8,800.86	0.13
2	365.72	2.35	0.83	304.35	1.95
3	365.72	9.80	0.76	277.64	7.44
4	365.72	24.31	0.69	253.27	16.84
5	365.72	46.20	0.63	231.05	29.19
6	365.72	74.69	0.58	210.77	43.05
7	365.72	108.44	0.53	192.27	57.01
8	365.72	145.83	0.48	175.40	69.94
9	365.72	185.22	0.44	160.01	81.04
10	365.72	225.08	0.40	145.97	89.84
11	365.72	264.11	0.36	133.16	96.16
12	365.72	301.23	0.33	121.47	100.05
13	365.72	335.61	0.30	110.81	101.69
14	365.72	366.66	0.28	101.09	101.35
15	365.72	394.01	0.25	92.22	99.35
16	365.72	417.43	0.23	84.12	96.02
17	365.72	436.88	0.21	76.74	91.67
18	365.72	452.42	0.19	70.01	86.60
19	365.72	464.19	0.17	63.86	81.06
20	365.72	472.40	0.16	58.26	75.25
21	365.72	477.33	0.15	53.15	69.36
22	365.72	479.24	0.13	48.48	63.53

Cuadro No. 12. Continuación...

AÑO	COSTOS (\$) JUNIO DE 2005	BENEFICIOS (\$) JUNIO DE 2005	FACTOR DE ACTUALIZACION	COSTOS ACTUALIZADOS	BENEFICIOS ACTUALIZADOS
23	365.72	478.45	0.12	44.23	57.86
24	365.72	475.26	0.11	40.35	52.43
25	365.72	469.96	0.10	36.80	47.30
26	365.72	462.85	0.09	33.57	42.49
27	365.72	454.20	0.08	30.63	38.04
28	365.72	444.25	0.08	27.94	33.94
29	365.72	433.25	0.07	25.49	30.20
30	365.72	421.40	0.06	23.25	26.79
31	365.72	408.90	0.06	21.21	23.72
32	365.72	395.91	0.05	19.35	20.95
33	365.72	382.59	0.05	17.65	18.47
34	365.72	369.06	0.04	16.10	16.25
35	365.72	355.45	0.04	14.69	14.28
36	365.72	341.85	0.04	13.40	12.53
37	365.72	328.35	0.03	12.22	10.98
38	365.72	315.01	0.03	11.15	9.61
39	365.72	301.89	0.03	10.17	8.40
40	365.72	289.05	0.03	9.28	7.33
41	365.72	276.51	0.02	8.47	6.40
42	365.72	264.33	0.02	7.72	5.58
43	365.72	252.50	0.02	7.05	4.86
44	365.72	241.06	0.02	6.43	4.24
45	365.72	230.01	0.02	5.86	3.69
46	365.72	219.37	0.01	5.35	3.21
47	365.72	209.13	0.01	4.88	2.79
48	365.72	199.30	0.01	4.45	2.43
49	365.72	189.86	0.01	4.06	2.11
50	365.72	180.83	0.01	3.70	1.83
TOTAL				12,230.39	1,967.18

En el primer caso, obtenemos un **VAN = \$ -10,647.20**, representando una relación beneficio-costo **B/C= 0.13**; y en el segundo caso, el **VAN = \$-10,263.22** generando un **B/C=0.16**; indicadores que hacen referencia a la nula rentabilidad bajo las condiciones del mercado, costos de establecimiento de plantaciones forestales, comportamiento del crecimiento de la vegetación en el sitio y los precios de venta del servicio ambiental.

Aplicando un análisis de sensibilidad, para identificar el precio de venta del servicio ambiental, mediante el cual su producción sería rentable en el área natural protegida, se encontró que la tonelada de carbono capturada debería tener un valor mínimo de \$900.00.

3.4. Conclusiones y Recomendaciones

3.4.1. Conclusiones

De acuerdo a los indicadores de rentabilidad obtenidos, existe la evidencia de que el establecimiento de plantaciones forestales con especies nativas en el área que ocupa el parque nacional “nevado de Toluca”, no ofrecen los beneficios suficientes que cubran por lo menos los costos de inversión necesarios para el establecimiento y mantenimiento de las mismas; sin embargo es necesario reparar en las siguientes conclusiones:

1.- La zona de estudio presenta como característica intrínseca el lento crecimiento de la vegetación, condicionado por la temperatura fría durante casi todo el año y la altura que rebasa los 3,000 metros sobre el nivel del mar lo que define una zona de crecimiento difícil o crítico para la vegetación.

2.- No obstante, es imprescindible restaurar y mantener la cubierta vegetal en el cuerpo de la elevación montañosa dadas sus características de fragilidad ecológica, lo que se traduce en riesgo de pérdida del suelo por efecto de la erosión hídrica y eólica, así como el escurrimiento torrencial y desenfrenado que conduce al daño de toda la infraestructura urbana y productiva ubicada en la base de la cuenca.

3.- En términos de la funcionalidad de la vegetación para amortiguar los efectos de la contaminación, retoma gran importancia la conservación de la vegetación del área por la ubicación geográfica con respecto a uno de los centros urbanos más grandes del mundo que es la ciudad de México y todas sus áreas conurbadas, donde se generan grandes cantidades de contaminantes a la atmósfera y en especial la emisión de CO₂ por efecto de los procesos productivos y dinámica de la sociedad.

4.- Dado que, bajo la estructura actual de costos y mercado para la producción del servicio ambiental de captura de C mediante la acumulación de biomasa, no es rentable, es necesario establecer un esquema de financiamiento que sume recursos de los programas existentes para este fin y otros programas de subsidios y apoyos

destinados a esos propósitos; asimismo debe preverse la posibilidad de financiar distintos proyectos productivos en forma simultánea como el pago por captación de recursos hídricos y captura de carbono, dado que en la actualidad son excluyentes uno del otro en los programas oficiales.

5.- No es posible cuantificar y valorar en este estudio el carbono fijado y contenido en el mantillo (hojarasca y detritus) que se acumulan en el suelo, los cuales bajo un proceso normal sin afectación de otros factores, debiera incorporarse al suelo conforme se da el proceso de descomposición e integración. Ello por la ocurrencia de incendios forestales de manera recurrente provocado por los pastores y agricultores, quienes al no obtener ningún beneficio económico de sus bosques, deciden realizar otras actividades productivas.

De esta manera, con los datos que se levantaron en campo, se puede argumentar que por la quema del mantillo se puede emitir a la atmósfera alrededor de 5 toneladas de carbono por hectárea, dadas las cantidades actuales de materiales existentes en el piso de la plantación.

6.- En este caso, el propósito del estudio fue analizar las funciones de captura de carbono por la vegetación, como una actividad productiva traducida en servicios ambientales, por lo que no se consideró un estudio de contenido de carbono en el suelo, como un reservorio adicional.

7.- No se puede obviar la necesidad de incorporar a un esquema productivo las áreas naturales protegidas, dado que conforme se ha incrementado la población, mayores han sido las necesidades y demanda de productos y recursos naturales implicados en ellas.

8.- Si bien es cierto que los costos de inversión para establecer proyectos productivos en términos de producción de servicios ambientales como captura de carbono, no generan la recuperación económica de la inversión, en realidad, al promover ese tipo de proyectos, se tienen beneficios adicionales como la generación de empleos y derrama económica a la población del medio rural ligada a esos bosques, proporcionándoles una

alternativa de producción con el consecuente interés que se generará por cuidar y manejar sus recursos forestales.

9.- La capacidad de carga del sitio en crecimiento maderable en árboles de *Pinus montezumae*, tiene una expectativa a convertirse en asintótica alrededor de los 400 m³/ha, lo que se traduce en promedio de 240 toneladas de materia seca y 120 toneladas de carbono capturado y almacenado por hectárea.

10.- El costo de establecimiento y mantenimiento de plantaciones para esos fines, requieren de una inversión que rebasa las posibilidades de amortización de la inversión, con los costos y precios actuales de venta del servicio, concluyendo en que los programas oficiales de apoyo existentes para promover la generación de servicios ambientales, no son de la magnitud suficiente que permita la incorporación plena de los propietarios a la producción de esos servicios.

3.4.2. Recomendaciones

1.- Es evidente que una actividad productiva como la analizada, no tiene por sí sola el potencial suficiente para cubrir todas las demandas y necesidades de la población que permitan preservar los bosques de la zona, por lo que es necesario definir un plan de inversión y apalancamiento simultáneo y adicional a esta actividad, tales como sumar pagos por servicios ambientales de captura de carbono e hidrológicos, sin que uno sea excluyente del otro, asimismo establecer áreas de ecoturismo y recreación en el mismo esquema.

2.- Dado que en términos financieros el servicio ambiental de captura de carbono, mediante el establecimiento de plantaciones forestales de restauración en la zona de estudio no es rentable, es necesario realizar actividades de preparación del terreno menos costosas ya que esos costos de establecimiento se consideran muy altos en referencia a los incurridos en el establecimiento de plantaciones comerciales, como en el sureste mexicano.

3.- Sí México es miembro de la convención definida en el Protocolo de Kyoto, es necesario elevar de nivel las gestiones para hacer llegar recursos económicos destinados por otros países en su afán de pago de créditos por la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

4.- El manejo en términos de la administración de los recursos naturales, es una actividad que está teniendo nuevos propósitos y objetivos en el orden internacional, por lo que nuestro País debe integrarse a esas corrientes, involucrándose a los distintos niveles de gobierno, dado que el esfuerzo que se haga por iniciativa particular de los propietarios de los bosques se verá mermado y poco fructífero ante la falta de capacidad de negociación con terceros.

3.5. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- ACOSTA, M. M.; VARGAS, H. J., VELAZQUEZ, M. A., ETCHEVERS, B. J.D. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. Agrociencia, Colegio de Postgraduados. Volumen 36, Número 6.
- ACOSTA, M. M. 2003. Diseño y aplicación de un método para medir los almacenes de carbono en sistemas con vegetación forestal y agrícolas de ladera en México. Tesis Doctoral. Instituto de Recursos Naturales, Programa Forestal. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 135 P.
- ARTEAGA, M. B. 2004. Apuntes del curso de nutrición de plantaciones forestales. Programa de Postgrado de la División de Ciencias Forestales; Universidad Autónoma Chapingo. 110 p. Inédito.
- AYALA L., R. S. 1998. Ecuaciones para estimar biomasa de pinos y encinos en la Meseta Central de Chiapas. Tesis de licenciatura. División de Ciencias Forestales. UACH. Chapingo, México. 70 p.
- BAUTISTA H., J. 2002. Valoración económica del almacenamiento de carbono del bosque tropical del Ejido Noh Bec, Quintana Roo, México. Tesis de Maestría en Ciencias. División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo; Chapingo, México. 145 P.
- BEN H. DE J. 2000. Forestry for mitigation the greenhouse effect: An ecological and economic assessment of the potential of land use to mitigate CO2 emissions in the lighalands of Chiapas, Mexico. 220 p.
- BORJA DE LA R., MA. A. M. 1995. Comparación de algunas características anatómicas y físico – mecánicas de madera normal y madera de compresión en *Pinus montezumae* Lamb. Tesis de licenciatura, División de Ciencias Forestales; Universidad Autónoma Chapingo; Chapingo, Méx. pp 11 – 41.
- COOPER CHARLES F. 1982. Carbon storage in managed forests. Biology Departament, San Diego State University, San Diego, Ca, U.S.A.
- COSTANZA, R. et al. 1999. Una introducción a la economía ecológica. Ed. Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V., Primera Edición, México, D.F.
- CETENAL. 1980. Carta Geología, Volcán Nevado de Toluca. Serie E-14-A-47, Escala 1:50,000, Ed. CETENAL.
- GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL, SECRETARIA DEL MEDIO AMBIENTE – CORENA. 2001. Estimación del contenido de carbono en la biomasa en el área del Suelo de conservación del Distrito Federal. México, D. F. 33 p.
- GOBIERNO DEL ESTADO DE MEXICO. 1990. Memoria del Segundo Estudio Dasonómico del Estado de México, SEDEMEX; Toluca, México. 334 p.

- GOBIERNO DEL ESTADO DE MEXICO. 1993. Estudio de modelos de manejo forestal para el Estado de México. 300 p.
- GOBIERNO DEL ESTADO DE MEXICO, SEDAGRO-PROBOSQUE. 1995. Programa de desarrollo forestal sustentable del Estado de México; Metepec, México.
- GÖRAN I. Å. Y RIITTA H. 2001. Changes in carbon stores in swedish forest soil due increased biomass harvest and increased temperatures analysed with a semi-empirical model. Forest Ecology and Management, Vol 174.
- <http://www.esi.unav.es/asignaturas/ecologia/Hipertexto/04Ecosis/131CicC.htm>, 25 de enero de 2005.
- <http://www.morelia.gob.mx/html /MedioAmbiente/Kioto.html#Glosario>; 18 de mayo de 2005.
- INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). 2003. Good practice guidance for land-use, change and forestry. Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC. Hayama, Kanagawa; Japan. s/p.
- MÄKELÄ, A. 1997. A Carbon Balance model of growth and self-pruning in trees based on structural relationships. Forest Science 43(1) 1997.
- MOURA C., P. 2001. La Convención sobre el clima y el mercado de contrapartidas de las emisiones de carbono basadas en las actividades forestales. FAO – UNASYLVA 206, Vol. 52 pp. 34 – 40
- MASERA, R. O., DE JONG, RICALDE I., Y ORDOÑEZ A. 2000. Consolidación de la oficina para la mitigación de gases de efecto invernadero. ECOSUR e Instituto de Ecología. Universidad Nacional Autónoma de México. 172 p.
- ORDOÑEZ D., J. A. B. 1999. Captura de carbono en un bosque templado: El Caso de San Juan Nuevo, Michoacán. INE-SEMARNAP; Primera Ed.
- ORDOÑEZ D., J. A. B. Y MASERA, O. 2001. Captura de carbono ante el cambio climático. Madera y Bosques Vol. 7, Núm 1.
- ORTEGA C., H. et al. 1966. Parque Nacional Nevado de Toluca. Proyecto de recuperación. Gobierno del Edo. de México. Toluca, México.
- RAMIREZ M., H. 2005. Implicaciones del método de la diferencia algebraica al desarrollar modelos de crecimiento de arboles y rodales coetáneos. Apuntes del Curso del Seminario de Investigación II; Programa de Postgrado de la División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México. (Inédito).
- RAMIREZ M., H. 2005. Sobre el tiempo de paso medio y el diámetro cuadrático medio. Notas del Programa de Postgrado en Ciencias Forestales de la División de

Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo,. Chapingo, México.
(Inédito).

- RODRIGUEZ A., M. 2004. Índice de sitio para *Pinus chiapensis* (Martinez) Andresen, en su área de distribución natural en los Estados de Veracruz y Puebla, México. Tesis de Licenciatura, División de Ciencias Forestales; Universidad Autónoma Chapingo; Chapingo, Méx. 59 p.
- RODRIGUEZ Z., J. M. 2003. Pago por los Servicios Ambientales: La experiencia de Costa Rica. FAO – UNASYLVA 212, Vol. 54 pp. 31 – 33.
- SECRETARIA DE PROGRAMACION Y PRESUPUESTO. 1980. Carta estatal topográfica. Estado de México.
- _____. 1981. Atlas nacional del medio físico. Ed. SPP. México, D.F.
- SMITH, J.H.G. 1959. Comprehensive and economical designs for studies of spacing and thinning. Forest Science 5 (3) :237-245
- SPURR, S.H. Y B.V.BARNES. 1982. Ecología forestal. México. AGT Editor. 690 p.
- TREXLER, M. C. 2003. El mercado de gases de efecto invernadero y la rentabilidad de las actividades forestales. FAO – UNASYLVA 212, Vol. 54 pp. 34 – 36.
- TORRES R. J. M., RODRIGUEZ F., C. Y MAGAÑA T., O. S. 1993. Estudio de modelos de manejo forestal para el Estado de México. Metepec, Edo. de México. 170 p.
- ZETINA E., J. G. 1995. Estrategias de manejo, conservación y aprovechamiento de recursos naturales en áreas naturales protegidas; Caso: Parque Nacional Nevado de Toluca. Tesis de licenciatura, Programa Interdepartamental de Docencia, Investigación y Servicio en Agroecología. Universidad Autónoma Chapingo; Chapingo, México.

4. CAPTACION Y RETENCION DE AGUA DE LLUVIA

4.1. ANTECEDENTES

Bajo la concepción de que los bosques realizan muchas funciones ecológicas en forma simultánea como ya se expuso al introducir el planteamiento de este estudio, las cuales, se pueden representar o modelar en funciones de producción dada la periodicidad o ciclos con que ocurren en los ecosistemas; el analizar la capacidad de captación y retención de agua de lluvia en áreas cubiertas de vegetación, pretende obtener los elementos para evaluar la capacidad de la plantación bajo estudio para retener agua de los volúmenes precipitados, considerando que la función específica de retención e infiltración de agua es de suma importancia para la humanidad por ser el principal proceso por el cual se recargan los mantos acuíferos que surten de agua potable a gran cantidad de la población.

Conociendo entonces de manera cuantitativa la distribución del agua de lluvia en áreas reforestadas, podría intentarse una valoración económica de la función descrita y con ello proponerla como una función de producción a financiar en el marco de servicio ambiental generado por los bosques, complementario a la captura de carbono, dado que ambas ocurren en forma simultánea; aún cuando no son excluyentes de otras como la estabilización de los suelos, conservación de biodiversidad, sustento de permanencia y enriquecimiento de fauna silvestre, regulación de las condiciones climáticas, mantenimiento de la productividad de los suelos y otras que pudieran ser evaluadas desde el punto de vista económico.

El hacer una evaluación económica de estas funciones, es por demás importante, ya que en la medida que se tenga una apreciación de su costo o valor económico, dará una concepción certera de que quienes son propietarios de las áreas boscosas deben ser retribuidos por mantenerlas y preservarlas; sin menoscabo de que la restauración de los ecosistemas es una tarea urgente a realizar por concepto de resguardar la salud pública.

El pretender la restauración de bosques y áreas perturbadas sin apego a un marco económico, puede ofrecer buenas intenciones que al momento de querer implementarlas, se quedan solamente en buenos deseos, dado que la población que ostenta la propiedad de las grandes áreas donde se integran los ecosistemas en sus distintos componentes deben encontrar formas de producción que les garantice el sustento y supervivencia.

Como referente a la valoración que en términos económicos se ha dado al servicio ambiental de captación e infiltración de agua de lluvia, la Comisión Nacional Forestal, desde 2004, implementó un programa de apoyos económicos, otorgando el pago de \$300.00 por hectárea de bosque de coníferas, que tengan como característica una cobertura de dosel mayor al 80%.

4.1.1. El Ciclo Hidrológico y sus Implicaciones en la Distribución del Agua

A través de la historia de la tierra, periodos de grandes glaciares están en correlación con niveles marítimos bajos, mientras que periodos donde sólo existen pequeñas capas de hielo como hoy en día, están en correlación con niveles marítimos altos; estas correlaciones se deben a que la cantidad de agua en la tierra es constante y está dividida entre reservas en los océanos, en el aire y en la tierra, además de que constantemente está pasando de una reserva a otra en un proceso denominado ciclo hidrológico. Esto evidencia que a mayor cantidad de agua contenida en las capas de hielo, menor cantidad de agua existe en los océanos y que es fundamental entender los procesos y las reservas del ciclo hidrológico para poder enfrentar las diferentes cuestiones incluidas en la discusión del cambio climático global.

Se puede pensar el ciclo hidrológico como una serie de reservas o áreas de almacenamiento y una serie de procesos que causan que el agua se mueva entre estas reservas, la más grande son los océanos que contienen aproximadamente el 97%, el 3% restante es agua dulce de la que el 78% está almacenada en la Antártica y Groenlandia.

Aproximadamente el 21% de agua dulce en la tierra está almacenada en sedimentos y rocas en el subsuelo, el agua en ríos, arroyos, lagos y lluvia constituye menos del 1% del agua dulce y a su vez es menos que el 0.1% del total (http://www.visionlearning.com/library/module_viewer.php?mid=99&l=s&c3=).

El agua es un recurso renovable y sus existencias están disponibles para recargarse ya sea a través del ciclo hidrológico natural o a través de la intervención del hombre, la problemática surge cuando el agua raramente se encuentra disponible en la cantidad adecuada en el lugar adecuado, principalmente debido esto a los patrones de precipitación y la presión continua de una demanda cada vez mayor (Serrano, 1990).

Análisis sistemáticos de los componentes del ciclo hidrológico han sido realizados describiendo ecuaciones para modelar su comportamiento, estas relaciones proveen las bases para simular modelos hidrológicos que son utilizados para predecir los efectos de las acciones del hombre sobre los elementos del mismo. Un modelo típico requiere información que caracterice: 1). la configuración geométrica de la cuenca, incluyendo reservorios y canales de escurrimiento, 2). la superficie de la tierra, incluyendo su potencial para infiltración y evapotranspiración y 3). el sistema de suelos y sus atributos físicos de la zona de acuíferos como lo muestra la Figura 4 (Ortolano, 1997).

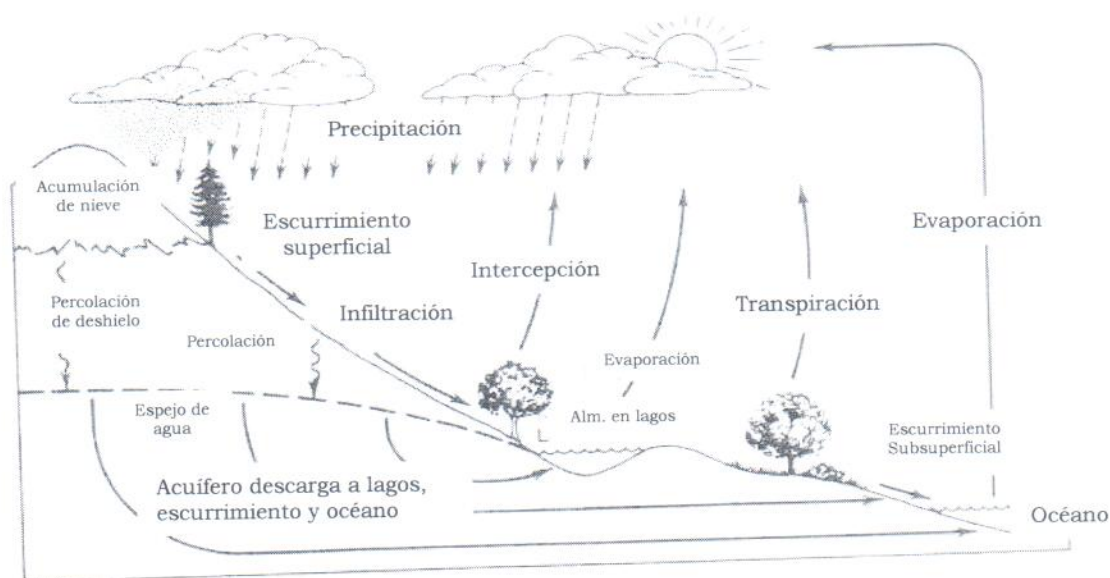


Figura No.4. Descripción esquemática de las fases del ciclo hidrológico.

Por otra parte, la distribución del agua de lluvia sobre áreas con vegetación (bosques) también presenta una distribución particular, la cual puede describirse como el ciclo hidrológico forestal en donde se establecen las relaciones o fases del comportamiento de la caída del agua de lluvia.

Algunos autores describen que una pequeña parte de la lluvia llega hasta el piso forestal en forma de caída directa y por escurrimiento sobre los tallos de la vegetación, señalan que una porción sustancial de la interceptada por el dosel es evaporada de regreso a la atmósfera durante e inmediatamente después de la tormenta y el remanente gotea desde las hojas a la superficie del suelo; sin embargo esta no puede ser determinada en forma separada en el campo de la que cae en forma directa y la que gotea desde el dosel, por lo que se cuantifica comúnmente en forma conjunta.

Cuando la intensidad de la caída de agua sobre el suelo excede la capacidad de infiltración del mismo, ocurre el escurrimiento, generalmente una muy alta proporción de agua es absorbida por la capacidad que tiene el suelo conforme a la riqueza de la materia orgánica y asimismo el escurrimiento sobre los tallos o troncos generalmente se infiltra.

En buena medida, del agua infiltrada en el suelo es tomada por la vegetación y regresa a la atmósfera vía el proceso de evapotranspiración, la humedad remanente del suelo se distribuye en una porción que drena hacia las capas interiores del suelo y otra que se queda adherida a las partículas del suelo, proceso que es descrito en forma esquemática en la Figura 5 (Sadanandan, 1997).

4.1.2. Estimaciones de Infiltración de Agua por Efecto de la Vegetación

El manejo de las cuencas hidrográficas se inició en los Estados Unidos de América con estudios de aprovechamientos hidrológicos que consistían principalmente en la producción de agua con fines agrícolas o pecuarios a partir de la manipulación de la vegetación, en el manejo y concepción de cuenca hidrográfica existen dos fuentes de confusión que se pueden denominar como “problema de balance” y “problema de escala”.

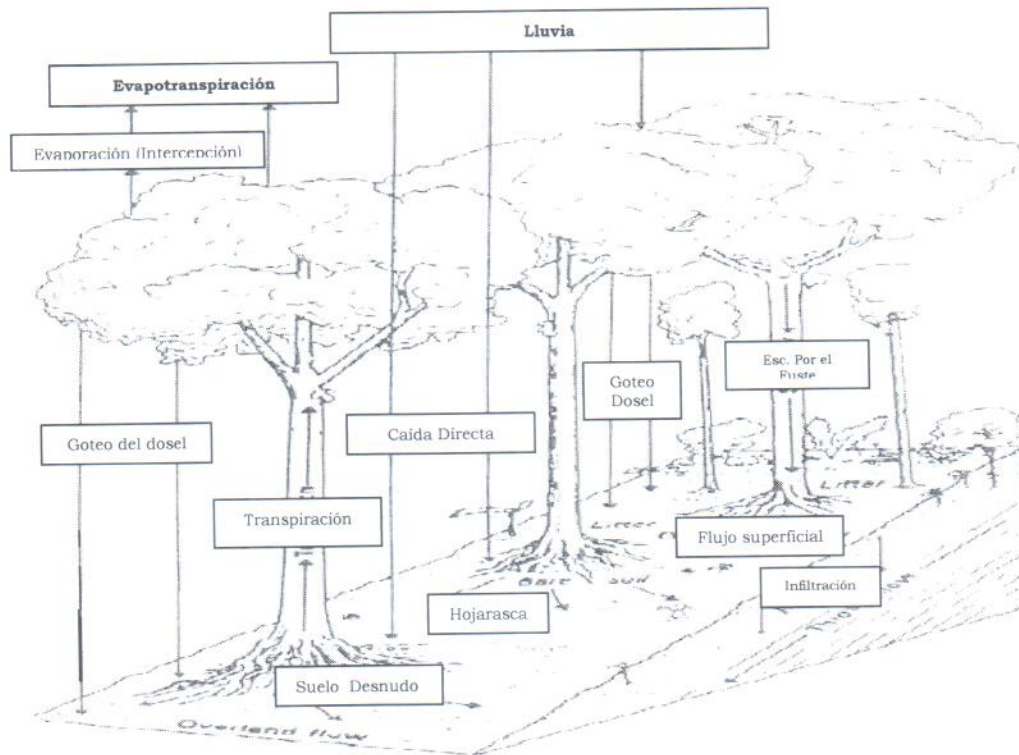


Figura No. 5. El “ciclo hidrológico forestal”

Respecto al problema de “balance”, se considera a la cuenca como unidad hidrológica en la cual se puede hacer un balance cuantificando la precipitación como entradas y las salidas constituidas por el escurrimiento, evaporación, transpiración, percolación y el almacenamiento como acumulación de humedad en el suelo; siendo posible hacer mediciones de cada uno de estos componentes.

Por otra parte el “problema de escala” es concerniente a la apreciación del tamaño de una cuenca, distinguiendo desde el espacio cinco grandes océanos y mientras se incrementa la escala se comienza a observar cuencas que a su vez son subcuencas de otras mayores, por lo que existen propuestas desarrolladas para separar las cuencas en forma arbitraria y delinearlas como áreas de estudio (Arias, 1990).

Algunos autores citados por Arias (1990), definen una cuenca pequeña como aquella en la cual las prácticas de manejo de tierras agrícolas y silvícolas pueden afectar significativamente el régimen hidrológico, mientras que otros la definen como aquella que tiene cierta homogeneidad en suelos, climas y vegetación, aunque no se tenga el mismo uso, éstas son las que mejor se adaptan a los programas de manejo de una

región, sin embargo generalmente el aspecto económico es el que define el tamaño de la cuenca por manejarse.

El concepto o ideología que da lugar al término de manejo de cuencas, fue la necesidad de evaluar los efectos hidrológicos de los cambios de uso del suelo y su impacto económico, dando el sentido de “manejo de cuencas” a la “administración de cuencas”, cuya finalidad de un programa de manejo de cuencas hidrográficas es la optimización de los recursos naturales, como el agua, suelo, flora y fauna y recursos humanos del área.

Lo anterior, tras la posibilidad de tener varios usos del suelo los cuales se pueden ver interactuando conducidos por las actividades antropogénicas, se ha llegado al planteamiento del “manejo integral de cuencas hidrográficas” para armonizar las acciones que conllevan la explotación de los recursos naturales que involucre el mantenimiento y/o conservación de los recursos naturales renovables en forma permanente.

Recurrentemente se han hecho reflexiones sobre la merma o decremento de los recursos naturales y específicamente del aprovechamiento de la vegetación, bajo la creencia de su deterioro, asegurando que se implica con ello la reducción de la cobertura arbórea y asociando efectos colaterales como la pérdida de la infiltrabilidad del suelo e incremento de los volúmenes de agua que escurren en forma superficial, llevando consigo la pérdida de suelo por efecto de la erosión hídrica.

En su estudio de “impacto de la edad de la reforestación zapaliname sobre la infiltración y la erosión” (Gutiérrez *et al.*, 1990), señalan que en gran número de artículos se menciona que la mejor forma de preservar el balance hídrico en cuencas deterioradas, es realizando reforestaciones masivas, pero muy pocas veces el efecto de ellas es justificado en forma cuantitativa sobre los procesos hidrológicos específicos y la erosión, por lo anterior desarrollaron un estudio donde utilizaron como tratamientos las áreas reforestadas de 11, 15, 22 y 27 años, así como un área sin reforestar donde estimaron la infiltración y la producción de sedimentos utilizando un simulador de lluvia; obtuvieron las tasas de infiltración como la diferencia entre la lluvia simulada y el

escurrimiento. En los resultados muestrales se encontró que la infiltración inicial no es diferente, mientras que a partir de 10 minutos de lluvia simulada a 45 minutos de duración, el sitio de 27 años de edad presentó valores mayores que el área sin reforestar.

Por lo anterior concluyeron que la infiltración y la producción de sedimentos en los espacios entre árboles no presentan relación con la edad de plantación en un área reforestada y que dichos procesos son influenciados por la vegetación asociada al arbolado y la hojarasca producida.

Mientras que en el estudio de "efecto de la interacción edad de la reforestación distancia al árbol sobre la infiltrabilidad del suelo", (Gutiérrez *et al.*, 1990), reportan que el impacto benéfico sobre la infiltrabilidad del suelo reforestado se reduce en aquellos espacios que quedan descubiertos del arbolado establecido y que el desarrollo del sistema radicular así como la acumulación de hojarasca tienen un efecto directo sobre la cantidad de agua que se infiltra al modificarse las características físicas del suelo donde se hace la plantación.

Por su parte Chacón *et al.*, (1990), realizaron un estudio cuyo objetivo fue conocer las cantidades de agua escurrida y el arrastre de sedimentos en función de la cobertura del dosel, de materiales leñosos y finos que ocupan el sitio y de la precipitación en sitios cuyas condiciones presentan diferencias en cobertura de copa aérea, estrato herbáceo y pedregosidad, así como materiales pesados (trozos y ramas) y ligeros (ramillas y hojas) esparcidos sobre el piso; ubicaron sitios de 5 x 20 m con 20% de pendiente y se encontró que al correlacionar la existencia de materiales ligeros con escurrimiento de agua, el escurrimiento es menor que cuando existen materiales gruesos, por lo que el comportamiento en producción de agua se asocia al grado de cobertura de copa, a la presencia de materiales gruesos o pesados y la ausencia de materiales ligeros, dado que al existir mayor cantidad de ramillas y hojas el agua precipitada tiene el suficiente soporte de retención y no permite que ésta escurra.

Caballero (1990), destaca que aún cuando frecuentemente se considera al bosque como productor de agua, en el sentido estricto este no es un productor de agua, sin

embargo considera que los ecosistemas forestales le imprimen características particulares que definen el grado y naturaleza de su utilización por el hombre, de tal manera que la producción está definida por tres variables genéricas siendo estas: **a) la cantidad:** expresada en volumen, **b) la calidad:** expresada por el grado de impurezas que contiene en solución o suspensión y **c) el régimen:** determinado por la cantidad de agua que se produce en determinado periodo de tiempo.

El ecosistema influye en la producción de agua mediante algunas formas, encontrando entre ellas que la presencia de arbolado incide en pérdida de agua por evapotranspiración, reduce el escurrimiento superficial y promueve la infiltración; la posibilidad de que se produzcan avenidas extremas depende de la capacidad de la cuenca para absorber e infiltrar agua, determinada ésta capacidad por la profundidad de los suelos, textura, estructura y contenido de humedad del mismo, la densidad del arbolado existente, así como por la duración e intensidad de la precipitación; temperatura, evaporación y humedad relativa, principalmente.

Las acciones del hombre sobre los ecosistemas tienen efecto en el monto y naturaleza del agua producida o captada, tales como el sobrepastoreo que compacta el piso forestal y reduce la protección que ofrece la vegetación disminuyendo en consecuencia la infiltración y se promueve mayor escurrimiento superficial.

Otras actividades que tienen efectos en este proceso son: la deforestación, la construcción de caminos y brechas forestales, así como las operaciones de abastecimiento forestal si se realizan de manera descontrolada y sin dirección técnica.

Mientras que el tipo de especies utilizadas en la reforestación también tienen un impacto directo en el balance de agua, dado que árboles perennifolios aumentan la pérdida por transpiración e intercepción de lluvia asociado de manera directa al tipo de follaje, la presencia de pastos puede aminorar de manera importante la escorrentía, entre muchas funciones e interrelaciones que ocurren en forma intrínseca en el ecosistema.

Es por ello que un plan de manejo de ecosistemas o bien de bosques en forma específica a través de su lógica de decisiones ejecutadas por el responsable, influye de manera decisiva en la producción de agua, dado que cualesquiera que sean las prácticas de manejo forestal que se realicen en los terrenos forestales, afectan la calidad y cantidad de agua proveniente de las cuencas, registrando efectos en sitios muy distantes de donde se lleven a cabo tales prácticas (Serrano, 1990).

Un gran número de experimentos de campo se han realizado para cuantificar el impacto de los cambios de vegetación en el balance de captación de agua y se ha demostrado que esos cambios son importantes, concluyendo en que los cambios del balance de agua es dependiente de un cierto número de factores como el patrón espacial de la vegetación, tipos de suelos, mantos acuíferos y patrón de lluvias; es dificultoso y caro obtener datos sobre captación en un tamaño significativo, pero el conocimiento de esas relaciones es decisiva para el manejo de tierras.

Mediante el desarrollo de 94 experimentos realizados por Hibbert (1967), y Bosch y Hewlett (1982), citados por Zhang *et al.*, (1999), demostraron que la respuesta en retención de agua es altamente significativa como consecuencia de la cobertura vegetal.

De acuerdo a su discusión, mencionan que la circulación natural continua de agua en el suelo-vegetación-atmósfera es un proceso importante y central de la energía, carbono y balance absoluto del sistema; el concepto de balance de agua provee un panorama para estudiar la conducta hidrológica de la cuenca en captación y ésta conducta puede ser usada para evaluar cambios en los componentes del balance hídrico, el cual puede ser descrito como:

$$P = ET + R + D + \Delta S \quad (2)$$

donde: **P** es la precipitación, **ET** es evapotranspiración, **R** es el escurrimiento superficial, **D** es la recarga del acuífero y **ΔS** es el cambio de almacenamiento de agua en el suelo.

El componente determinante de la ecuación de balance hídrico es la precipitación y varía en forma temporal y espacial, en el concepto de aplicación hidrológica se asume que es independiente del tipo de vegetación, pero en algunos estudios que usan modelos de circulación general sugieren que en una escala continental los bosques pueden afectar la precipitación.

La **evapotranspiración** es el segundo gran término en la ecuación el cual está totalmente ligado a las características de la vegetación, ésta es considerada por Santa Regina y Gallardo (1986), en un monto general aproximado del 45% de lo precipitado; mientras que el **escurrimiento superficial** como otro componente importante que puede generarse cuando el suelo es saturado de humedad, o cuando la intensidad de la lluvia excede la capacidad de infiltración en cuyo caso los autores antes señalados, lo cuantifican en un 5% del total de la lluvia, éste es determinado por la presencia de vegetación a través de la **intercepción de lluvia** por el dosel para el cual consignan un valor aproximado al 15%.

La **recarga de acuíferos** es la cantidad de agua infiltrada que llega hasta los almacenes internos del subsuelo, que de acuerdo a Zhang *et al.*, (1999) es la proporción más pequeña en el balance de agua usualmente referido a la medición de precipitación y evapotranspiración.

El último término de la ecuación es el **cambio en el almacenamiento** del suelo, el cual sugieren que a menudo es del 5 al 10%. Para Santa Regina y Gallardo (1986) el almacenamiento de agua en el suelo en la zona de crecimiento radicular y el agua percolada hasta los mantos acuíferos es de un monto del 35%.

Por ello, es de esperar que el cambio de escurrimiento superficial anual esté asociado con el cambio de uso del suelo, asimismo la vegetación podría reflejar un cambio en la evapotranspiración anual.

La intercepción de agua de lluvia por la vegetación es especialmente importante en bosques, dado que el agua puede ser retenida sobre las hojas, la que posteriormente puede ser escurrida sobre ramas y tallos y otra porción evaporada directamente a la

atmósfera desde el dosel, donde la suma de la caída directamente al suelo y el flujo sobre los tallos es considerada lluvia neta y la diferencia entre la lluvia neta y la precipitación registrada se denomina pérdida por intercepción.

Al inicio de un evento de lluvia, gran cantidad de agua es retenida en el dosel a lo que se le llama capacidad de almacenamiento influenciado por el área foliar, la configuración de la hoja y la intensidad de la lluvia, relación que puede ser expresada por la ecuación siguiente:

$$I = S + \alpha t \quad (3)$$

donde **I** es la intercepción total durante la tormenta, **S** la capacidad de almacenamiento del dosel, **α** la tasa de evaporación durante el período de la lluvia y **t** es la duración de la lluvia; en el Cuadro 13, se muestran algunos valores estimados de pérdidas por intercepción.

Cuadro No. 13. Pérdidas por Intercepción (I) estimadas como un porcentaje de la lluvia (P) gruesa anual, para distintas especies de vegetación.

Especies	I/P (%)	Referencia
<i>Acacia aneura</i>	13.0	Pressland (1973)
<i>Acacia harpophylla</i>	15.2	Tunstall (1973)
<i>Bouteloua curtipendula</i>	18.1	Thurrow <i>et al</i> (1987)
<i>Douglas fir</i>	34.1	Aussenac and Boulangeat (1980)
<i>Eucalyptus</i>	8.3	Pook <i>et al</i> (1991)
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	14.3	Heth and Karschon (1963)
<i>Eucalyptus regnans</i>	23.3	Langford and O'Shaughnessy
<i>Eucalyptus rosii</i>	10.6	Smith (1974)
<i>Eucalyptus obliqua</i>	15.0	Feller (1981)
<i>Mezcla de coníferas y maderas duras</i>	22.0	Moul and Buell (1955)
<i>Bosque lluvioso de montaña</i>	18.2	Veneklaas <i>et al.</i> (1990)
<i>Pinus canariensis</i>	28.0	Kittredge <i>et al</i> (1941)
<i>Pinus elliotii Engelm</i>	38.1	Johansen (1964)
<i>Pinus radiata</i>	26.5	Pook <i>et al.</i> (1991)
<i>Pinus rigida</i>	19.1	Kim and Woo (1988)
<i>Pinus roxburghii</i>	33.5	Dabral and Subba Rao (1968)

Cuadro No. 13. Continuación...

Especies	I/P (%)	Referencia
<i>Pinus wallichiana</i>	21.0	Singh and Gupta (1987)
<i>Bosque lluvioso</i>	8.1	Lloyd <i>et al.</i> (1988)
<i>Bosque lluvioso</i>	27.0	Sollins and Drewry (1970)
Ciprés	26.0	Pereira (1952)
Bamboo	20.0	Pereira (1952)

Fuente: Zhang *et al.*, (1999).

Zhang *et al.*, (1999) concluyen que es evidente que la proporción de la lluvia interceptada por la vegetación varía considerablemente entre especies, donde el promedio de intercepción en bosques de pino es de 28 % de la lluvia, comparado con el 14 % para bosques de eucalipto, sin omitir el que los datos obtenidos en la tabla anterior fueron estimados en diferentes condiciones de clima y vegetación.

Asimismo señalan que no obstante la intercepción de la lluvia, evaporación y transpiración, el albedo y radiación neta así como la advección fenómenos que influyen en la evapotranspiración, el déficit de presión de vapor (déficit de presión hídrica) y la resistencia del dosel, la velocidad del viento y transporte de turbulencias, el área foliar, la profundidad de raíces y capacidad de disponibilidad de agua por las plantas son factores que determinan el balance de captación–evapotranspiración de agua en el sitio.

Bajo condiciones de sequía los controles principales sobre la evapotranspiración son la capacidad de agua disponible por las plantas y la resistencia del dosel, la evapotranspiración real es solamente una pequeña fracción del potencial de evapotranspiración; bajo condiciones de humedad, los controles dominantes son la advección, la radiación neta, área foliar y el transporte de turbulencias; y bajo condiciones intermedias, la importancia relativa de esos factores es variable dependiendo del clima, suelo y vegetación.

La evapotranspiración anual es generalmente más grande en áreas boscosas que en áreas sin vegetación, pero la captación en plantaciones de árboles podría incrementar la evapotranspiración comparado con áreas de pasturas o cultivos. Esto tiene

implicaciones para el balance de captación de agua en términos de manejo del suelo en multipropósitos (diferentes usos) y estrategias de rehabilitación; dado que la cantidad de evapotranspiración anual es una medida determinada por la interacción del suministro de agua (régimen de lluvia) y la demanda atmosférica (evapotranspiración potencial), balanceado por las plantas.

Brooks *et al.*, (1991) mencionan que una vez que ha ocurrido la lluvia, el tipo, extensión y condiciones de la vegetación influyen el patrón de depositación y cantidad que es captada sobre la superficie del suelo; los bosques densos de coníferas en latitudes norte y dosel de varios pisos de los trópicos, captan y almacenan grandes cantidades de precipitación, la cual regresa directamente a la atmósfera por la evaporación y es considerada como pérdida de agua en la cuenca.

Dada la importancia de la intercepción de la lluvia por el dosel de la vegetación, la cobertura del dosel, el número de capas o estratos y la intensidad de la lluvia, determinan cuánto de la precipitación total cae al piso forestal; el tamaño, la forma y apertura del dosel afectan la cantidad, intensidad y distribución de la caída directa al suelo.

Roth y Chang (1981) citados por Brooks *et al.* (1991), señalan que la cantidad de agua caída directamente al suelo en bosques de pino de hoja larga, está dada por la siguiente ecuación:

$$T_h = 1.002P - 0.0008P^2 - 1.397 \quad (4)$$

donde: T_h : caída directa; P : precipitación total.

La precipitación es un factor esencial para la supervivencia del bosque dado que un árbol maduro puede transpirar diariamente en verano de 100 a 250 litros de agua, dependiendo del clima, especie forestal, etc., de tal manera que un gasto medio de agua en un bosque puede ser del orden de 40 m³/ha/día, lo que exige (mayormente en bosques templados) un suministro hídrico continuo durante la época de crecimiento,

agua que puede provenir de la lluvia en climas húmedos o de la reserva edáfica en los climas con estación seca (Santa Regina y Gallardo, 1986).

La sequía estival, si es severa significa la muerte del bosque, por lo que las bajas precipitaciones impiden el establecimiento de masas forestales, se estima que por debajo de los 350 mm de precipitación anual, no existen bosques continuos. Por ello la pérdida de agua por transpiración en conjunto con la pérdida por interceptación (favoreciendo la evaporación), significa un incremento en el agua total evaporada, pero también un incremento proporcional de agua infiltrada a través del suelo con disminución neta de la escorrentía superficial, asegurando en consecuencia la recarga y alimentación de las capas freáticas, aunque puede haber una disminución de las aguas superficiales y en todo caso se tiene mayor pureza del agua escurrida (Santa Regina y Gallardo, 1986).

Estudios hidrológicos en bosques templados han demostrado que las pérdidas por interceptación, la evaporación que resulta por la precipitación interceptada por el dosel y que es evaporada antes de que alcance el suelo, es un componente importante de la total, la interceptación se estima indirectamente como la diferencia entre la precipitación incidente (arriba del dosel) y la precipitación neta (debajo del dosel), y la medición y predicción de las pérdidas de agua de lluvia por interceptación del bosque es un requerimiento esencial en el pronóstico de los efectos de la cubierta forestal sobre el rendimiento de agua de una cuenca forestal (Cantú y González, 2002).

El avance del progreso industrial en México, ha generado un dinámico cambio de uso del suelo, lo mismo que la economía marginal del medio rural propiciando el aprovechamiento irracional de los recursos forestales, factores que han modificado notablemente los ciclos hidrológicos, la recarga de los mantos freáticos, los nichos de refugio de la fauna silvestre, contribuyen en consecuencia al cambio climático global y al incremento de la pérdida de suelo por la erosión.

En el Noreste de México (Cantú y González, 2002), encontraron que la interceptación de agua de lluvia fue de 19.2, 13.6 y 23% para bosques de pino, encino y mezcla de pino-encino respectivamente, representando 187, 132 y 224 milímetros de lo precipitado

como lluvia incidente; indicando esto que el dosel más permeable es el de encino y por consiguiente muestra las menores pérdidas por intercepción.

4.1.3. Consideraciones de Hidrología Superficial

La hidrología superficial es una consecuencia del ciclo hidrológico, su estudio ayuda a dar una pauta para proponer las bases del manejo integral y sustentable de la cuenca como unidad de planeación (Ibáñez, 2004).

El manejo integral de cuencas, mediante el uso del suelo, puede permitir el aprovechamiento y recarga de las reservas de agua, bajo el entendido de que la cantidad de agua captada puede estar influenciada por la conformación fisiográfica, la conformación edafológica y el uso del suelo; dichas características determinan un coeficiente de escurrimiento y/o un potencial de retención, dando entonces la responsabilidad directa a las actividades del hombre en la administración y regulación de los recursos hídricos que puedan ser captados y retenidos, mediante el manejo de los elementos del ciclo hidrológico.

Aparicio (2001), señala que la diferencia entre el volumen de agua que llueve en una cuenca y el que escurre por su salida, recibe el nombre genérico de pérdidas que en general están constituidas por la intercepción del follaje de las plantas y los techos de las construcciones, la retención en depresiones o charcos (que posteriormente se evapora o se infiltra), la evaporación y transpiración, así como la infiltración.

En la práctica, señala, es difícil separar estos componentes en un evento, pero la porción más considerable de las pérdidas está dada por la infiltración por lo que es costumbre calcularlas bajo ese nombre.

Menciona además que los volúmenes de infiltración son varias veces mayores que los de escurrimiento durante una tormenta, mayormente en cuencas poco urbanizadas, de otra manera el escurrimiento sería un problema considerable.

De acuerdo a lo anterior, se especifican varios factores conocidos que afectan la capacidad de infiltración tales como:

- a) Textura del suelo;
- b) Contenido de humedad inicial;
- c) Contenido de humedad de saturación;
- d) Cobertura vegetal;
- e) Uso del suelo;
- f) Aire atrapado;
- g) Lavado de material fino;
- h) Profundidad del suelo;
- i) Compactación; y
- j) Temperatura, sus cambios y diferencias.

El estudio de las condiciones hidrológicas que prevalecen en un sitio específico, el cual se le ha denominado en términos genéricos “cuenca hidrográfica”; requiere del conocimiento pleno de sus características, los factores que son relevantes en el diseño del comportamiento hidrológico son: el tamaño de la cuenca, la pendiente, el uso del suelo, longitud y temporalidad de los escurrimientos, patrón y área de drenaje; éstos factores son agrupados en tres características que influyen el proceso hidrológico en una cuenca las cuales son:

- a) Patrón d comportamiento climático;
- b) Patrón de condiciones fisiográficas; y
- c) Patrón de la dinámica de uso del suelo.

Estas características en términos concretos, definen el ingreso o entradas y salidas de agua en la cuenca por los distintos componentes de ambas (McCuen, 1989).

Existen distintos criterios para evaluar el proceso de infiltración de agua en los suelos, sin embargo la mayoría de ellos requieren conocer los datos específicos del tirante de precipitación para cada tormenta (o evento); entre ellos, el criterio de la capacidad de

infiltración media, el coeficiente de escurrimiento, el método de Horton, el método de Green–Ampt, entre otros (Aparicio, 2001; McCuen, 1989).

Todos los criterios mencionados requieren que la cuenca de referencia esté aforada, es decir, que se hayan medido gastos de salidas al mismo tiempo que las precipitaciones, sin embargo, la mayoría de ellas en nuestro país no lo están, mucho menos instrumentadas por lo que no se cuenta con un historial de datos. Por ello se necesitan métodos con los que se pueda estimar la lluvia efectiva a partir de la lluvia total y las características de la cuenca.

El Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de los Estados Unidos de Norte América, propuso un método que estableció como resultado de las relaciones hidrológicas en la cuenca de manera empírica, las cuales fueron confirmadas por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos (Aparicio, 2001; McCuen, 1989).

El análisis de entradas y salidas de agua en la cuenca ha sido estudiado bajo el concepto de hidrograma unitario, para McCuen (1989), el hidrograma unitario, es la curva que representa el escurrimiento derivado de una pulgada de lluvia en exceso, ocurrida uniformemente sobre la cuenca con una tasa de duración uniforme y un periodo de tiempo específico; los cuatro aspectos que definen el hidrograma unitario son:

- 1) 1 pulgada de lluvia exceso;
- 2) Distribución espacial uniforme sobre la cuenca;
- 3) Tasa de lluvia exceso constante en el tiempo; y
- 4) Duración específica de lluvia exceso.

Chow, *et al.* (1994), establecen que el hidrograma unitario conocido originalmente como gráfica unitaria de una cuenca, propuesto por primera vez por Sherman (1932), se define como el hidrograma obtenido de la escorrentía directa resultante de una pulgada de lluvia exceso (usualmente en el sistema métrico, tomado como un centímetro de lluvia exceso) generado uniformemente sobre el área de drenaje a una tasa constante a lo largo de una duración efectiva.

Sherman (1932), utilizó la palabra unitario para denotar un tiempo unitario en el que se mide el escurrimiento, pero desde entonces se ha interpretado frecuentemente como una altura o profundidad unitaria de exceso de lluvia y definió el hidrograma unitario para ser usado específicamente con la escorrentía.

Los autores antes mencionados, señalan que el hidrograma unitario es un modelo lineal simple que puede usarse para deducir el hidrograma resultante de cualquier exceso de lluvia, donde las siguientes suposiciones básicas son inherentes a ese modelo:

- a) Tiempo base constante.- para cada cuenca dada, la duración total del escurrimiento directo o tiempo base es la misma para todas las tormentas con la misma duración de lluvia efectiva, independientemente del volumen total escurrido. Todo hidrograma unitario está ligado a una duración de la lluvia exceso.
- b) Linealidad o proporcionalidad.- las ordenadas de todos los hidrogramas de escurrimiento directo con el mismo tiempo base, son directamente proporcionales al volumen total de escurrimiento directo, es decir el volumen total de lluvia efectiva. Como consecuencia, las ordenadas de dichos hidrogramas son proporcionales entre sí.
- c) Superposición de causas y efectos.- el hidrograma que resulta de un período de lluvia dado, puede superponerse a hidrogramas resultantes de periodos lluviosos precedentes.

Aparicio (2001), plantea el siguiente escenario, para entender el concepto de hidrograma unitario; supóngase que se presenta una misma tormenta en dos cuencas con el mismo tipo de suelo y la misma superficie, pero de diferente forma, sucede que aunque el volumen escurrido sea el mismo, el gasto pico y las demás características del hidrograma variarán de una cuenca a otra.

Estas metodologías descritas, ayudan a realizar un análisis específico por evento y directo al sitio de interés, encontrando resultados bastante confiables en cuencas desde muy pequeñas a muy grandes, según lo señalan los autores de ellas.

4.1.4. Balance Hídrico de una Cuenca

A diferencia del concepto de hidrograma unitario que es aplicado a un evento de lluvia, está el concepto de balance hídrico, el cual agrupa valores mensuales y/o anuales de fenómenos que conforman el ciclo hidrológico.

Otra diferencia entre analizar una tormenta y realizar un balance mensual, consiste en las consideraciones tomadas sobre la evapotranspiración; mientras en el “balance hídrico” de una tormenta se desprecia por no representar más del 1% del volumen de agua precipitado en un día nublado y lluvioso (Bedient y Hubber, 2001), en el balance hídrico mensual y/o anual, la evapotranspiración representa un porcentaje importante.

Para los fines de elaborar un balance global de agua en una cuenca y/o subcuenca en México, normalmente se emplea el procedimiento establecido por la siguiente relación:

$$P - Q - EVT - I = 0 \quad (5)$$

Donde:

P : volumen de precipitación

Q : escurrimiento

EVT : evapotranspiración potencial

I : infiltración

La diferencia con respecto a la ecuación número (2), radica en que el concepto de infiltración agrupa tanto la recarga de acuíferos como el almacenamiento en el suelo, dado que cuantificar de manera específica la distribución de volúmenes en esos apartados, requiere de un estudio de mayor detalle.

De esa manera, la infiltración se calcula despejándola de la ecuación (5), una vez conocidos los datos de precipitación, evapotranspiración y escurrimiento; conocida la precipitación de registros meteorológicos, será necesario establecer los métodos que permitan estimar el escurrimiento y la evapotranspiración.

Custodio y Llamas (1975) señalan que es un proceso por el cual el agua cambia de un estado líquido a un estado gaseoso, compuesto por la evaporación y la transpiración y que dada la complejidad para separarlas, se han estudiado en un solo concepto denominado evapotranspiración.

Thornthwaite (1948) introdujo un nuevo concepto optimizando ambos bajo la evapotranspiración potencial o pérdidas por evapotranspiración, bajo el doble supuesto de un desarrollo vegetal óptimo y una capacidad de campo permanente completa, siendo por tanto un límite superior de la cantidad de agua que realmente regresa a la atmósfera por ese proceso.

Éste, es un fenómeno de tipo microclimático y en consecuencia serán más válidos los métodos de estimación, en la medida que consideren esa cuestión.

Custodio y Llamas (1975) sostienen bajo ese fundamento, que la unidad más usual para expresar las pérdidas por evapotranspiración es 1mm de altura de agua, equivalente a 10 m³/ha en cierto intervalo de tiempo, donde las cantidades de agua que por ese concepto vuelven a la atmósfera y la energía necesaria para ello, alcanzan cifras considerables.

Por ejemplo en un día cálido es frecuente una evapotranspiración de 3-4 mm/día lo que equivale a que se liberen a la atmósfera de 30 a 40 m³/ha/día, y la energía necesaria para que se desplace 1mm/día precisa del orden de 585×10^7 cal/ha/día.

Por ello se han hecho intentos por estudiar la evapotranspiración real, los métodos más aplicados se agrupan en:

a). Métodos basados en física teórica del microclima:

- 1.- Balance de energía
- 2.- Perfiles de humedad y velocidad del viento
- 3.- Flujo turbulento de humedad
- 4.- Fórmulas semi-empíricas o combinadas

b). Medidas directas:

- 1.- Evapotranspirómetros
- 2.- Lisímetros
- 3.- Parcelas y cuencas experimentales
- 4.- Perfiles de humedad del suelo

c). Métodos empíricos:

- 1.- Relación evapotranspiración – evaporación media en estanques
- 2.- Fórmula de Thornthwaite
- 3.- Fórmula de Blaney-Criddle
- 4.- Fórmula de Makkink
- 5.- Fórmula de Turc

Para efectos de este estudio y por la disponibilidad de información, se utilizó el método de la fórmula de Thornthwaite, el cual se describe en seguida.

Custodio y Llamas (1975), describen el método de la fórmula de Thornthwaite el que utiliza como variable primaria para el cálculo de evapotranspiración potencial, la media mensual de las temperaturas diarias del aire y con ella obtiene un índice de calor mensual con la expresión: $i = (t/5)^{1.514}$, y se obtiene además el valor del índice de calor anual $I = \sum i$; siendo $\sum i$ la suma de los doce índices mensuales del año, considerado para meses teóricos de 30 días, con 12 horas diarias de sol, mediante lo cual se establece la expresión: $\epsilon = 16 (10 t/I)^a$

donde:

- ϵ : evapotranspiración potencial media en mm/día
 t : temperatura media del mes en °C
 I : índice de calor anual

$$a = 675 \times 10^{-9} \times I^3 - 771 \times 10^{-7} \times I^2 + 1972 \times 10^{-5} \times I + 0.49239$$

Finalmente, tiene en cuenta la duración real del mes y el número máximo de horas de sol, según la latitud del lugar y se llega a: **ETP = K** ϵ

donde:

ETP : evapotranspiración potencial en mm/mes

$$K = (N/12) \times (d/30) \times d$$

N = número máximo de horas de sol, según la latitud (obtenida de tablas)

d = número de días del mes

ϵ = valor de evapotranspiración potencial media en mm/día

Para el cálculo, los valores de **i** existen tabulados, así como los valores de **E** en función de **I** y **t**; también se encuentran tabulados.

Como una apreciación inicial, la evaporación crece al decrecer la presión atmosférica, manteniendo constantes los demás factores; por el contrario, al aumentar la altitud, decrece la evaporación. Esta aparente contradicción se explica por la afluencia de otros factores como la temperatura del aire y del agua en el ritmo de evaporación que la producida por el decrecimiento con la altitud de la presión atmosférica.

Por otra parte, para el conocimiento del coeficiente de escurrimiento, la Comisión Nacional del agua (CNA, 2000), señala en el apéndice normativo "A", de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, que los métodos para determinar el volumen medio anual de escurrimiento natural se dividen en:

A). Método directo

1.- Método de registros hidrométricos.- se puede aplicar si en la cuenca de estudio se cuenta con suficiente información hidrométrica para un período mínimo de 20 años.

B). Métodos Indirectos. Aplicables cuando la cuenca en estudio no cuenta con la suficiente información de registros hidrométricos y/o cuando esta sea escasa, para determinar el volumen medio anual de escurrimiento se aplica el método indirecto denominado: precipitación – escurrimiento.

1.- Método de Precipitación – Escurrimiento.- El volumen medio anual de escurrimiento natural se determina indirectamente, mediante la siguiente expresión:

$$\text{Vol. Anual de Esc. De La Cuenca} = \text{Precip. Anual de la Cuenca} \times \text{Area de la Cuenca} \times \text{Coeficiente de Escurrimiento}$$

El coeficiente de escurrimiento en función del tipo y uso del suelo y del volumen de precipitación anual de la cuenca en estudio, se basa en los estudios del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) y de visitas de campo, se clasifican los suelos de la cuenca en tres diferentes tipos especificados en el Cuadro 14 y al tomar en cuenta el uso actual del suelo como se describe en el cuadro No 15, se obtiene un factor (K), como lo establece el plan nacional de obras de riego para el desarrollo rural.

Cuadro No. 14. Clasificación de tipo de suelos

Tipo de Suelo	Características
A	Suelos permeables, tales como arenas profundas y loess poco compactos
B	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad: loess más compactos que los corresponden a los suelos A; terrenos migajosos.
C	Suelos casi impermeables, tales como arenas o loess muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas

Fuente: CNA (2000)

Cuadro No. 15. Valores del factor K, en función del tipo y uso del suelo

Uso del Suelo	Tipo de Suelo		
	A	B	C
Barbecho, áreas sin cultivar y desnudas	0.26	0.28	0.30
Cultivos			
En hilera	0.24	0.27	0.30
Legumbres o rotación de praderas	0.24	0.27	0.30
Granos pequeños	0.24	0.27	0.30
Pastizal			
% de suelo cubierto o pastoreo			
Más del 75% - Poco -	0.14	0.20	0.28
Del 50% al 75% - Regular -	0.20	0.24	0.30
Menos del 50% - Excesivo -	0.24	0.28	0.30
Bosque			
Cubierto más del 75%	0.07	0.16	0.24
Cubierto del 50 al 75%	0.12	0.22	0.26
Cubierto del 25 al 50%	0.17	0.26	0.28
Cubierto menos del 25%	0.22	0.28	0.30
Zonas urbanas	0.26	0.29	0.32
Caminos	0.27	0.30	0.33
Pradera permanente	0.18	0.24	0.30

Fuente: CNA (2000)

La CNA propone que si en la cuenca de estudio existen diferentes tipos y usos de suelo, el valor de K se calcula como la resultante de subdividir la cuenca en zonas homogéneas y obtener el promedio ponderado de todas ellas y una vez obtenido el valor de K, el coeficiente de escurrimiento anual (Ce), se obtiene mediante las siguientes ecuaciones:

Si, K resulta menor o igual que 0.15; $Ce = K(P-250)/2000$

Si, K es mayor que 0.15; $Ce = K(P-250)/2000 + (K-0.15)/1.5$

Esta misma dependencia, considera que las fórmulas expuestas son válidas para valores de precipitación anual entre 350 y 2,150 mm.

4.2. MATERIALES Y MÉTODOS

Con base en los criterios expuestos, la metodología para estimar la captación de agua por la plantación se hizo obteniendo el valor de los volúmenes de evapotranspiración y el volumen medio anual de escurrimiento con la metodología manejada por la CNA,

para el caso de los volúmenes de precipitación, se consideraron los registros de la estación climatológica más cercana al área de estudio, datos con los cuales se alimentará la relación definida por la CNA, para calcular la infiltración.

4.2.1. Régimen de Precipitación

Para alimentar los datos referentes a la precipitación pluvial, se recurrió a la obtención de las normales climatológicas correspondientes a la estación meteorológica ubicada en el “Nevado de Toluca”, misma que se encuentra a una distancia aproximada de 3 kilómetros lineales del sitio de estudio y que en consecuencia sus registros son más adecuados para esa área.

Es necesario aclarar que existen algunos métodos para estimar de manera más precisa los rangos de precipitación, como la construcción de polígonos de Thiessen o bien Isoyetas, no obstante, dada la ubicación de la estación meteorológica y la plantación, se asumió la representatividad de los datos de esa estación.

Cuadro No. 16. Normales climatológicas de la estación 15062 “Nevado de Toluca”.

MES	PRECIPITACION (mm)	TEMPERATURA (°C)
Enero	13.9	2.7
Febrero	25.0	2.3
Marzo	18.0	4.0
Abril	55.6	5.0
Mayo	111.7	5.1
Junio	196.7	4.9
Julio	250.9	4.4
Agosto	229.5	4.1
Septiembre	200.5	4.3
Octubre	79.8	3.9
Noviembre	24.6	3.0
Diciembre	19.7	2.5
Anual	1,226.1	3.8

Fuente: Normales Climatológicas Estándar y provisionales 1961 – 1990, (CNA, 1990).

4.2.2. Evapotranspiración Potencial

Usando el método propuesto por Thornthwaite (1948), basado en la ubicación geográfica tomando de referencia de manera específica la latitud, se estimó la evapotranspiración potencial del área de estudio, tomando en consideración que no

existen datos de mediciones directas de este fenómeno y de acuerdo al procedimiento descrito en el apartado 4.1.3. y 4.1.4 se obtuvieron las estimaciones mostradas en el Cuadro 17.

Cuadro No. 17. Cálculo de la evapotranspiración en el área de estudio.

Datos		En	Fb	Mz	Ab	My	Jn	Jl	Ag	Sep	Oct	Nov	Dic
t	Temperatura diaria media mensual	2.7	2.3	4.0	5.0	5.1	4.9	4.4	4.1	4.3	3.9	3.0	2.5
Variables		Cálculo											
1) i	Obtenido de tablas*	0.46	0.35	0.71	1.0	1.0	1.0	0.85	0.71	0.85	0.71	0.46	0.35
2) I	$\sum i = 8.45 = I$												
3) ϵ	Valores de tablas*	0.6	0.5	0.8	1.0	1.0	1.0	0.9	0.8	0.9	0.8	0.6	0.5
4) N	Obtenido de tablas*	11.1	11.4	12.0	12.6	13.1	13.3	13.2	12.8	12.3	11.7	11.2	10.9
5) ETP		17.7	12.4	25.6	31.5	34.9	33.2	31.7	27.3	27.6	24.9	16.8	14.5

$$ETP = N / 12 \times d / 30 \times d \times \epsilon$$

*Tablas expuestas por Custodio y Llamas (1975).

4.2.3. Coeficiente de Escurrimiento

Tomando el procedimiento establecido por la CNA, cuya metodología establece la forma para determinar el coeficiente de escurrimiento superficial anual de un área, con base en el uso y tipo de suelo se estimó un coeficiente de escurrimiento para el área de la plantación, el cual se muestra en el Cuadro 18.

En la obtención del coeficiente de escurrimiento, el cual depende directamente de la cobertura vegetal que existe sobre el suelo, se asume de manera empírica un aumento gradual de la cobertura del dosel, conforme al crecimiento y edad del arbolado como se muestra en los datos, asimismo, los valores del factor k fueron seleccionados de acuerdo a los cuadros 14 y 15 de éste trabajo.

Cuadro No. 18. Cálculo del coeficiente de escurrimiento superficial.

Edad (años)	Altura (m)	Cobertura de dosel (%)	Tipo de suelo	Valor de factor K	Coeficiente Escurrim. (Ce)
1 - 7	0 - 2	0 - 25	B	0.28	0.224
8 - 11	2 - 5	25 - 50	B	0.26	0.200
12 - 16	5 - 10	50 - 75	B	0.22	0.154
17 - 50	10 - 30	> 75	B	0.16	0.094

$$Ce = K(P-250)/2000 + (K-0.15)/1.5$$

4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Desarrollando la metodología descrita, podemos entonces obtener los volúmenes aproximados de retención de agua, por efecto de la vegetación establecida.

4.3.1. Capacidad de Retención de Agua por la Plantación

Asumiendo que al deducir de la precipitación las cantidades de agua establecidas como pérdidas para los efectos de este estudio (evapotranspiración y escurrimiento), podemos estimar los volúmenes de agua de lluvia que se retienen en el suelo, despejando de la fórmula (5) el concepto de infiltración que se distribuirá en agua absorbida por el suelo y que será utilizada para los procesos fisiológicos de la vegetación y otra porción en agua percolada hacia los mantos freáticos, la que eventualmente puede ser aprovechada para satisfacer las necesidades de consumo humano.

Dados los valores estimados de evapotranspiración, podemos observar que las necesidades de agua para los procesos fisiológicos algunos meses son mayores que la precipitación, deduciendo que la humedad necesaria para ello, es obtenida del almacenamiento que ocurre en el suelo; el Cuadro 19 muestra un balance entre la precipitación y la evapotranspiración, en forma mensual.

Cuadro No. 19. Cálculo del volumen de pérdida de agua por evapotranspiración

Mes	Precipitación (mm)	Volumen Precipitado (m ³ /ha)	Evapotransp Pot/mes (mm)	Volumen evapotrasp. (m ³ /ha)	Balance mensual (m ³)
Enero	13.9	139	17.7	177	- 38
Febrero	25.0	250	12.4	124	126
Marzo	18.0	180	25.6	256	- 76
Abril	55.6	556	31.5	315	241
Mayo	111.7	1,117	34.9	349	768
Junio	196.7	1,967	33.2	332	1,635
Julio	250.9	2,509	31.7	317	2,192
Agosto	229.5	2,295	27.3	273	2,022
Septiembre	200.5	2,005	27.6	276	1,729
Octubre	79.8	798	24.9	249	549
Noviembre	24.6	246	16.8	168	78
Diciembre	19.7	197	14.5	145	52
Anual	1,226.1	12,261		2,981	9,280

Los datos anteriores, sugieren un volumen residual de 9,280 m³/ha/año de agua que se quedan en la cuenca, los cuales se distribuyen en el escurrimiento superficial, almacenamiento en el suelo y percolación a los mantos freáticos.

Aún cuando para el caso del bosque estudiado pareciera una cantidad mínima las pérdidas por evapotranspiración, es necesario reparar en que se trata de un ecosistema de tipo templado - frío donde los procesos fisiológicos y metabólicos de la vegetación son menos dinámicos que en ecosistemas cálidos, al mismo tiempo que la temperatura como factor condicionante para el proceso de evaporación y transpiración como lo manifiestan los registros, es baja en general durante todo el año, hace que el proceso conjunto sea muy conservador.

Por otra parte, también es de notar que los coeficientes de escurrimiento calculados corresponden a distintas cobertura de dosel, dado que cobertura de más del 75% no está dada desde que se estableció la plantación, por lo que los volúmenes de pérdidas por escurrimiento superficial serán mayores en los primeros años, en tanto que el crecimiento del dosel alcanza ese grado de cobertura.

También es posible pensar que los volúmenes de agua evapotranspirados en las primeras etapas de la plantación son menores dado que los procesos fisiológicos de la vegetación se desarrollan en menor proporción, no obstante, el suelo se encuentra más expuesto al proceso de evaporación, para esto, es preciso recordar que el cálculo

realizado toma en consideración la evapotranspiración potencial del sitio, como un indicador genérico de las cantidades de agua que se demandan por éste fenómeno.

Por ello, se requiere de estudios que permitan determinar el comportamiento del crecimiento en la cobertura de dosel conforme a la edad del arbolado y tomando en cuenta los datos arrojados por el modelo de crecimiento expuestos en el Cuadro 6, podemos asumir algunos supuestos respecto a que las pérdidas por evapotranspiración sean de la misma magnitud a las calculadas y que en ese caso, los volúmenes que tienen una variación son los de escurrimiento generando distintas cantidades de infiltración a diferente edad del arbolado, de tal manera que podemos obtener estos volúmenes de infiltración despejando la ecuación (5) $I = P - EVT - Q$, ese procedimiento arroja los datos expuestos en el Cuadro No. 20.

Cuadro No. 20. Volumen precipitado, evapotranspirado, escurrido e infiltrado los tres últimos en función de la edad del arbolado.

Edad de arbolado (Años)	Precipitación (m³/ha)	Evapotransp (m³/ha)	Escurrecimiento (m³/ha)	Infiltración (m³/ha)
1 – 7	12,261.00	2,981.00	2,746.464	6,533.536
8 - 11	12,261.00	2,981.00	2,452.200	6,827.800
12 - 16	12,261.00	2,981.00	1,888.194	7,391.806
17 - 50	12,261.00	2,981.00	1,152.534	8,127.466

Aunque sabemos que el volumen de escurrimiento dado, no es proporcional al volumen de lluvia ocurrida en el transcurso del tiempo debido a que esto se genera en función de varios factores como: la velocidad de infiltración, dependiente de la conductividad hidráulica, temperatura, porosidad, intensidad de la lluvia, así como de la humedad antecedente contenida; nos hace suponer que los volúmenes escurridos serán distintos en el tiempo y espacio durante el transcurso del año debido al efecto estacional.

No obstante, se realizó una distribución de volumen escurrido mensualmente, de manera proporcional a la distribución de la lluvia, lo que permite observar a grosso modo el comportamiento de los volúmenes de agua que escurren.

En el Cuadro No. 21, se muestra los volúmenes de escurrimiento mensual obtenidos, los cuales fueron calculados distribuyendo el volumen anual para el periodo de edad de la plantación de 1 a 16 y de 17 a 50 años, tomando en consideración el efecto de la cobertura del dosel.

Cuadro No. 21. Cálculo de volúmenes escurrido mensualmente, en función de la proporción de lluvia mensual.

Mes	Precipitación (m ³ /ha)	% Precip. (m ³ /ha)	Vol. de Esc. 1 -16 años (m ³ /ha)	Vol. de Esc. 17 -50 años (m ³ /ha)
Enero	139	1.1	26.8	13.1
Febrero	250	2.0	48.2	23.5
Marzo	180	1.5	34.7	16.9
Abril	556	4.5	107.1	52.3
Mayo	1,117	9.1	215.2	105.0
Junio	1,967	16.	379.0	184.9
Julio	2,509	20.5	483.4	235.8
Agosto	2,295	18.7	442.2	215.7
Septiembre	2,005	16.4	386.3	188.5
Octubre	798	6.5	153.7	75.0
Noviembre	246	2.0	47.4	23.1
Diciembre	197	1.6	38.3	18.7
Total	12,261	100.0	2,362.3	1,152.5

Una vez conocidos los conceptos de pérdidas por evapotranspiración y escurrimiento, se obtuvo el balance hídrico en forma mensual, el cual arrojó los datos mostrados en el Cuadro 22.

Cuadro No. 22. Balance hídrico mensual y anual.

Mes	Precip. (m ³ /ha)	Vol. de Esc. 1 -16 años (m ³ /ha)	Vol. de Esc. 17 -50 años (m ³ /ha)	Evapot. Potencial (m3/ha)	Balance Edad 1-16	Balance Edad 17-50
Enero	139	26.8	13.1	177	-64.8	-51.1
Febrero	250	48.2	23.5	124	77.8	102.5
Marzo	180	34.7	16.9	256	-110.7	-92.9
Abril	556	107.1	52.3	315	133.9	188.7
Mayo	1,117	215.2	105.0	349	552.8	663.0
Junio	1,967	379.0	184.9	332	1256.0	1450.1
Julio	2,509	483.4	235.8	317	1708.6	1956.2
Agosto	2,295	442.2	215.7	273	1579.8	1806.3
Sept.	2,005	386.3	188.5	276	1342.7	1540.5
Oct.	798	153.7	75.0	249	395.3	474.0
Nov.	246	47.4	23.1	168	30.6	54.9
Dic.	197	38.3	18.7	145	15.7	35.3
Total	12,261	2,362.3	1,152.5	2,981	6,917.7	8,127.5

De este modo, existe evidencia de que las salidas de agua en algunas épocas del año son mayores que las entradas y el cálculo de los volúmenes de beneficio representados en los de infiltración por efecto de la cobertura del dosel son en promedio de 6,917.7 m³ en los primeros 16 años y de 8,127.5 del año 17 al 50, será el monto que significará el beneficio económico del servicio ambiental que se estaría generando por concepto de establecer y mantener la plantación con esos propósitos.

4.3.2. Rentabilidad Económica por Retención de Agua

El pago del servicio ambiental por captación de agua en México, es un tema muy somero y con pocas bases de valoración económica, tal es el caso del programa que opera la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), en la categoría de pago de servicios ambientales hidrológicos (PSAH) mediante el cual se ofrece un monto de \$300.00 por hectárea a dueños de bosques con cobertura del dosel mayor al 80%, valor que para efectos de evaluar la rentabilidad económica será utilizado en este estudio a partir de que la plantación alcanza una edad de 17 años.

Lo anterior bajo la observación de que a esa edad, la densidad de la plantación comienza disminuir por efecto de la competencia entre individuos y como consecuencia la cobertura del dosel ha alcanzado más del 80%.

Por otra parte, según datos proporcionados en forma verbal por Ibáñez (2005) en los cuales precisa que con base en proyectos externos del Departamento de Irrigación, de la Universidad Autónoma Chapingo y recabados en la Comisión Nacional del Agua (CNA), se reporta que en el Distrito de Riego No. 33 (DDR-33) en el Estado de México, se paga alrededor de \$20.00 por millar de m³ de agua utilizada para riego.

El valor de \$20.00 es utilizado desde el año uno de establecimiento de la plantación al año 16, según los volúmenes infiltrados y que es el periodo en que la cobertura del dosel se encuentra menor al 80% que pone como requisito la CONAFOR para el pago de este servicio.

Es necesario señalar que en los Distritos de Riego del norte del país, el agua proveniente del Río Bravo y el Río Conchos se paga actualmente entre \$5.00 y \$30.00 por millar de metros cúbicos; en realidad dichos precios no reflejan el costo real del agua usada en la agricultura, sino que reflejan la existencia de subsidios para agua de riego.

Mientras la que se utiliza por la industria, proveniente también de las presas del norte del País, se cobra hasta \$210.00 por millar de m³ precio que se acerca al costo real del agua; ambos casos expuestos como referencia por Ibáñez (2005).

Con esta información, se realizó una estimación de la rentabilidad del servicio ambiental por retención e infiltración de agua en la plantación, en la que aplicando una tasa de descuento de 9.62%, valor correspondiente al de CETES a 28 días de fecha 22 de junio de 2005 y obteniendo un factor de actualización por la expresión $FA=(1+0.0962)^{-n}$, se obtuvieron los resultados mostrados en el Cuadro No. 23.

Cuadro No. 23. Estimación de rentabilidad de producción de servicios ambientales por captación de agua.

AÑO	COSTOS (\$) JUNIO DE 2005	VOLUMENES INFILTRADOS (Millares m ³ /ha)	BENEFICIOS (\$) JUNIO DE 2005	FACTOR DE ACTUALIZ.	COSTOS ACTUALIZ.	BENEFICIOS ACTUALIZ.
1	9,647.50	6.5	130	0.91	8800.86	118.59
2	365.72	6.5	130	0.83	304.35	108.18
3	365.72	6.5	130	0.76	277.64	98.69
4	365.72	6.5	130	0.69	253.27	90.03
5	365.72	6.5	130	0.63	231.05	82.13
6	365.72	6.5	130	0.58	210.77	74.92
7	365.72	6.5	130	0.53	192.27	68.35
8	365.72	6.8	136	0.48	175.40	65.23
9	365.72	6.8	136	0.44	160.01	59.50
10	365.72	6.8	136	0.40	145.97	54.28
11	365.72	6.8	136	0.36	133.16	49.52
12	365.72	7.3	146	0.33	121.47	48.49
13	365.72	7.3	146	0.30	110.81	44.24
14	365.72	7.3	146	0.28	101.09	40.35
15	365.72	7.3	146	0.25	92.22	36.81
16	365.72	7.3	146	0.23	84.12	33.58
17	365.72	8.1	300	0.21	76.74	62.95
18	365.72	8.1	300	0.19	70.01	57.43
19	365.72	8.1	300	0.17	63.86	52.39
20	365.72	8.1	300	0.16	58.26	47.79
21	365.72	8.1	300	0.15	53.15	43.59
22	365.72	8.1	300	0.13	48.48	39.77
23	365.72	8.1	300	0.12	44.23	36.28

Cuadro No. 23. Continuación...

AÑO	COSTOS (\$) JUNIO DE 2005	VOLUMENES INFILTRADOS (Millares m ³ /ha)	BENEFICIOS (\$) JUNIO DE 2005	FACTOR DE ACTUALIZ.	COSTOS ACTUALIZ.	BENEFICIOS ACTUALIZ.
24	365.72	8.1	300	0.11	40.35	33.10
25	365.72	8.1	300	0.10	36.80	30.19
26	365.72	8.1	300	0.09	33.57	27.54
27	365.72	8.1	300	0.08	30.63	25.12
28	365.72	8.1	300	0.08	27.94	22.92
29	365.72	8.1	300	0.07	25.49	20.91
30	365.72	8.1	300	0.06	23.25	19.07
31	365.72	8.1	300	0.06	21.21	17.40
32	365.72	8.1	300	0.05	19.35	15.87
33	365.72	8.1	300	0.05	17.65	14.48
34	365.72	8.1	300	0.04	16.10	13.21
35	365.72	8.1	300	0.04	14.69	12.05
36	365.72	8.1	300	0.04	13.40	10.99
37	365.72	8.1	300	0.03	12.22	10.03
38	365.72	8.1	300	0.03	11.15	9.15
39	365.72	8.1	300	0.03	10.17	8.34
40	365.72	8.1	300	0.03	9.28	7.61
41	365.72	8.1	300	0.02	8.47	6.94
42	365.72	8.1	300	0.02	7.72	6.34
43	365.72	8.1	300	0.02	7.05	5.78
44	365.72	8.1	300	0.02	6.43	5.27
45	365.72	8.1	300	0.02	5.86	4.81
46	365.72	8.1	300	0.01	5.35	4.39
47	365.72	8.1	300	0.01	4.88	4.00
48	365.72	8.1	300	0.01	4.45	3.65
49	365.72	8.1	300	0.01	4.06	3.33
50	365.72	8.1	300	0.01	3.70	3.04
TOTAL					12,230.39	1,758.63

Bajo esa estructura de costos e ingresos generados por el establecimiento de la plantación y el pago del servicio ambiental respectivamente, el valor actual neto del servicio es de **VAN = \$-10,471.77** por hectárea, representando una relación beneficio-costo (**B/C= 0.14**), lo que significa que no existen las posibilidades de recuperación y amortización de la inversión necesaria para esta actividad.

Por supuesto, es necesario reparar en que esto sucedería si se mantiene el pago del servicio ambiental a los precios actuales de \$300.00/ha que opera la CONAFOR y \$20.00 por millar de m³ para riego.

Con la intención de conocer el precio mediante el cual el servicio ambiental es rentable, mediante el cual se pudiera buscar esquemas de financiamiento para su producción y que al mismo tiempo daría la oportunidad de recuperar y atender las áreas forestales

del área natural protegida, se realizó una evaluación financiera tomando en cuenta el valor económico del millar de m^3 de agua utilizada para la industria de \$210.00 como fuente de referencia.

Con esos datos, se obtuvieron los indicadores financieros que evidencian la rentabilidad de la producción del servicio ambiental, obteniendo un **VAN = \$2,923.11** y una relación beneficio – costo de **B/C= 1.24**; tal como se muestra en el anexo.

4.4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.4.1. Conclusiones

1.- En las condiciones actuales de la plantación, el potencial de la capacidad de retención de agua de lluvia es del orden de $8,127.50 m^3/ha/año$, volumen que es distribuido en almacenamiento en el suelo y recarga a los acuíferos, agrupados en el concepto de infiltración.

2.- La pérdida de agua por escurrimiento superficial en la plantación antes de tener una cobertura de dosel del 80%, es de alrededor de $1,210 m^3/ha$ (obtenido por la diferencia entre el volumen escurrido antes de cobertura del 80% y el volumen escurrido después); esto en términos concretos no parece una cifra muy alta, sin embargo ante la falta de vegetación este volumen al escurrir sin ningún control y de manera torrencial, provocaría la pérdida de suelo dejando al descubierto otras capas menos permeables, involucrando en el tiempo que los volúmenes de escurrimiento superficial sean incrementados drásticamente con los consecuentes daños e inundaciones en la parte baja de la cuenca.

Sin embargo, se puede apreciar que una cobertura menor al 25% genera un escurrimiento de $2,746.46 m^3/ha/año$ y la cobertura mayor o igual al 80% genera un escurrimiento de $1,152.53 m^3/ha/año$, significando un volumen de $1,594 m^3/ha/año$ que se están perdiendo por falta de cobertura vegetal.

- 3.- El servicio ambiental de retención de agua por la vegetación, debe ser considerado el de volumen infiltrado en el suelo, dado que esas cantidades se utilizan para el desarrollo de los procesos biológicos y la recarga de acuíferos, siendo ambos conceptos importantes para el mantenimiento de las funciones biológicas del ecosistema y la alimentación de las necesidades de agua dulce para consumo humano.
- 4.- La cubierta vegetal sobre el suelo, en funciones de captación de agua, juega un papel importante en protección, retención, infiltración y control de los procesos involucrados en el ciclo hidrológico estableciendo la administración de flujos de volúmenes de agua de manera regulada
- 5.- El pago por servicios ambientales hidrológicos operado oficialmente desde los programas gubernamentales, no cubre en lo más mínimo los costos en que se incurre para el establecimiento de plantaciones forestales con esos fines en la zona de estudio.
- 6.- No existe una cultura de apreciación por el valor de los servicios ambientales que generan los bosques y en consecuencia se menosprecia su funcionalidad en términos de lograr la pretensión de recarga de acuíferos mediante el establecimiento de plantaciones para esos propósitos.
- 7.- En la medida que no se quiera entender que la conservación y restauración de los bosques y recursos asociados es una función de rentabilidad económica que apoye la economía familiar de los propietarios, seguirá una lucha entre intereses hasta ahora antagonistas, reflejados en la necesidad del aprovechamiento intensivo de los recursos naturales a costa de los riesgos de su deterioro cuando éste sea sin una planeación adecuada y la pugna por la protección de las zonas boscosas en aras de conservar las condiciones ecológicas que garanticen mejor calidad de vida.
- 8.- La demanda de servicios ambientales será también una función de crecimiento exponencial proporcional al incremento de la población y su concentración en las grandes urbes, eso deriva en la necesidad de generar la conciencia en la ciudadanía respecto a la existencia de un grupo considerable de la población que vive y tiene derechos asignados sobre los recursos forestales, no obstante que estos recursos sean

declarados de interés público y que por derecho legítimo deben ser una alternativa de producción complementaria para los propietarios de los bosques.

4.4.2. Recomendaciones

- 1.- La administración gubernamental, desde las facultades y atribuciones que le confiere la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, debe promover e incorporar nuevas formas de ordenación de los recursos forestales, definiendo su potencial productivo mediante la zonificación, por la cual se pueda priorizar el uso y usufructo de los bienes y servicios que de ellos se pueden obtener y generando la inversión que para ello sea necesaria.
- 2.- Es particularmente importante promover en el orden internacional la inversión, aplicación y aterrizaje de recursos económicos que para estos propósitos se están conjuntando, con el afán de hacer rentable la conservación de los bosques para la producción de servicios ambientales.
- 3.- En relación a lo expuesto, deben hacerse estudios que permitan delimitar con fundamento en los criterios de la economía de mercado, el beneficio social y el beneficio privado que los recursos forestales deben representar, en la concepción de optimizar ambos beneficios y que puedan ser la plataforma del desarrollo sustentable.
- 4.- Se debe asumir de manera urgente distintos programas que garanticen el pago adecuado por la conservación y manejo de los bosques para aprovechar su potencial de captación de recursos hídricos, garantizando su rentabilidad económica, que retribuya los beneficios que por derecho legítimo corresponde a los dueños de los bosques.
- 5.- El compromiso actual de conservar y preservar los bosques debe ser ahora un concepto de interés público, que debe ser reflejado en la participación de todos los grupos de la sociedad con el pago de derechos por usufructo de los servicios ambientales que de ellos se generan, no sólo el reclamo por conservarlos para poder disfrutar de una mejor calidad de vida.

6.- La planificación adecuada, el reconocimiento y respeto de los derechos asignados, la eficiencia en la asignación de recursos y la inclusión de los recursos forestales en la economía de mercado, permitirán mejorarlos en su calidad y reducir las externalidades que se ven reflejadas como disminución y deterioro de los bosques.

4.5. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- APARICIO M., F. J. 2001. Fundamentos de hidrología de superficie. Ed. LIMUSA – NORIEGA EDITORES. México, D. F. 303 p.
- ARIAS R., H. M. 1990. Conceptos del manejo de cuencas hidrográficas. En resúmenes del primer simposio nacional sobre el agua en el manejo forestal. División de Ciencias Forestales. UACH. pp. 12.
- BEDIENT B., P. AND HUBER C., W. 2002. Hydrology and floodplain analysis. 3rd edition. Prentice Hall. 763 p.
- BROOKS K., N.; FFOLLIOTT, P. F.; GREGERSEN, H. M. AND THAMES, J. L. 1991. Hydrology and the management of watersheds. Iowa State University Press/Ames, First Edition. USA. Pp 29 – 36.
- CABALLERO D., M. 1990. El bosque como sistema de producción de agua. En resúmenes del primer simposio nacional del agua en el manejo forestal. División de Ciencias Forestales. UACH. pp. 19.
- CANTU S., I. Y GONZALEZ R., H. 2002. Propiedades hidrológicas del dosel de los bosques de pino – encino en el noreste de México. Ciencia UANL/Vol. V, No. 1, enero – marzo 2002. pp 72 – 77.
- CHACON S., J. M.; IRIGOYEN S., M. Y CANO R., M. 1990. Influencia de los aprovechamientos en el escurrimiento y arrastre de sedimentos. En resúmenes del primer simposio nacional sobre el agua en el manejo forestal. División de Ciencias Forestales. UACH. pp. 6.
- CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R. AND MAYS, L. W. 1994. Hidrología aplicada. Traducción de la primera edición en inglés. McGraw Hill Interamericana, S. A. 584 p.
- COMISION NACIONAL DEL AGUA. 2002. Norma oficial mexicana NOM-011-CNA-2000, conservación del recurso agua – que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. Diario Oficial de la Federación, 17 de abril de 2002.
- COMISION NACIONAL DEL AGUA. 1990. Normales climatológicas estándar y provisionales 1961 – 1990. Archivo Digital del Servicio Meteorológico Nacional.
- CUSTODIO G., E. Y LLAMAS M., M. R. 1975. Hidrología subterránea. Tomo I. Ediciones Omega, S.A. – Casanova, 220-Barcelona-11; Barcelona España. pp 285 - 341
- GUTIERREZ C., J.; DE LUNA R., M. y MARTÍNEZ F., G. 1990. Impacto de la edad de la reforestación Zapaliname sobre la infiltración y la erosión. En resúmenes

del primer simposio nacional del agua en el manejo forestal. División de Ciencias Forestales, UACH. pp. 20.

GUTIERREZ C., J.; DUEÑEZ A., J. y FLORES Z., R. 1990. Efecto de la interacción edad de la reforestación distancia al árbol sobre la infiltrabilidad del suelo. En resúmenes del primer simposio nacional del agua en el manejo forestal. División de Ciencias Forestales, UACH. pp. 26.

http://www.visionlearning.com/library/module_viewer.php?mid=99&l=s&c3=, consultada el 16 de febrero de 2005.

IBAÑEZ, C. L. 2004. Apuntes del curso de hidrología superficial. Impartido al postgrado de ingeniería y manejo del agua, Dpto. de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo. Inédito.

IBAÑEZ, C. L. 2005. Comunicación personal sobre el manejo de precios de agua en distintos Distritos de Riego en México.

McCUEN, R. H. 1989. Hydrologyc análisis and design. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey; USA. 867 p.

ORTOLANO., L. 1997. Environmental regulation and impact assessment. Stanford University; Stanford California; John Wiley. 604 p.

SANTA REGINA, R. I. Y GALLARDO, L. J. 1986. El bosque: Su importancia como recurso natural. Centro de Edafología y Biología aplicada (C.S.I.C.). Excema. Diputación Provincial, Salamanca, España. Pp 11 – 33.

SERRANO G., E. 1990. La producción y valoración del agua; un marco conceptual y metodológico. En resúmenes del primer simposio nacional sobre el agua en el manejo forestal. División de Ciencias Forestales, UACH. pp. 22.

SADANANDAN N., E. K. 1997. Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forest. CSIRO Canberra Australia. 571 p.

ZHANG, L.; DAWES, W. R. Y WALKER, G. R. 1999. Predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance. Technical report 99/12, Cooperative Research for Catchment Hydrology, CSIRO Land and Water. Australia. 35 p.

5. PRODUCCION MADERABLE

5.1. ANTECEDENTES DE EVALUACION ECONOMICA DE PLANTACIONES

Patiño (1994) consideró que hasta ese año, el establecimiento de plantaciones forestales se había limitado principalmente a la protección de áreas degradadas, además de que muy pocos habían sido los ejemplos de plantaciones establecidas con fines comerciales y las que se establecieron para producción comercial, se destinaban a la producción de celulosa y elaboración de tableros aglomerados.

De esta manera, al realizar plantaciones con fines de protección, de alguna manera llevaban intrínseco el objetivo de generar servicios ambientales mediante la recuperación y reestablecimiento de la cubierta vegetal en el ecosistema.

La evaluación de tipo financiero de plantaciones forestales en México, ha iniciado en forma reciente ya que el interés y la inversión en este tipo de proyectos se ha desarrollado en los últimos 10 años, aplicando evaluaciones desde distintos puntos de vista e integrando desde simples observaciones del comportamiento de la plantación, hasta donde se considera la información dasométrica asociada a variables financieras (CONAFOR, 2005).

Escárpita (1978), exponía que las plantaciones forestales en el futuro debieran orientarse exclusivamente a la producción de celulosa, ya que su rentabilidad es más alta y tienen mejores perspectivas que para madera aserrada.

Mientras que Borja (1984), preveía que a partir de 1987 la celulosa y el papel empezarían a escasear en los mercados internacionales hasta llegar a una situación crítica en el año 2000, para lo cual, los principales países exportadores de celulosa y papel habían manifestado que no podrían atender las demandas globales de esos productos, resaltando la necesidad y alternativa que ofrecen las plantaciones forestales para ello.

No obstante, evaluando los conceptos de costos incurridos en el establecimiento de plantaciones mediante el valor presente neto, se mide la capacidad de recuperación de la inversión comparado con el rendimiento obtenido en la cosecha, lo que refleja la necesidad de que todo proyecto de plantaciones sea una parte de un proyecto integral, con ello se asegura la rentabilidad de las mismas y se considera otros beneficios que generan como la creación de empleos permanentes y productivos, garantía en el abastecimiento forestal así como el mejoramiento ecológico.

Enríquez y Baca (1984), en un ensayo de rentabilidad de plantaciones forestales de *Pinus oocarpa* en el Estado de Chiapas, determinaron que dividiendo la utilidad bruta entre el costo de producción, se obtenía una rentabilidad anual del capital invertido de 13%, tasa que estaba por debajo de las tasas de interés bancario, por lo que desde el punto de vista económico, argumentaron que en esas circunstancias las plantaciones no eran rentables.

Sin embargo, concluyeron que tenían beneficios considerables de impacto social por la generación de empleos y beneficios ecológicos al evitar la erosión y regular los escurrimientos hidrológicos.

Ante la situación crítica que ha enfrentado el sector forestal, las perspectivas de nuestro país en el rubro de plantaciones forestales son alentadoras, ya que se tienen ventajas comparativas para la producción forestal, donde se presentan condiciones naturales que permiten altas tasas de crecimiento de muchas especies con valor comercial (diversos tipos de pinos, eucalipto, gmelina, teca, cedro, caoba, etc.) (González, 1994).

González (1994) señala que de las 49.6 millones de hectáreas arboladas en el territorio nacional, 20 tienen capacidad para aprovecharse comercialmente, donde la productividad potencial de los bosques puede mejorarse de manera sustancial mediante el manejo; por ejemplo los bosques de Chihuahua y Durango registran una productividad en estado natural de entre 1 y 2 m³/ha/año similares a muchos bosques del sur y sureste de los EEUU, que en condiciones de manejo ideales podrían producir hasta 6 m³/ha/año.

Los bosques de *Pinus patula* en el Estado de Veracruz, han registrado productividad de entre 8 y 13 m³/ha/año cuya producción podría elevarse hasta llegar a 20 m³/ha/año, comparable a las plantaciones de Chile y Nueva Zelanda.

5.2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para determinar en forma comparativa la rentabilidad que en producción maderable pudiera tener la plantación estudiada, se realizó una estimación de productos maderables posibles de extraer, aplicando una distribución aproximada del volumen maderable en pie, en las siguientes proporciones:

60% productos primarios

25% productos secundarios

15% desperdicios o material no comercial

Esta distribución ocurre cuando el arbolado ha alcanzado un diámetro normal de 25 cm, diámetros de los que se considera se pueden obtener productos primarios, mientras tanto, se ha estimado de manera empírica que el volumen que puede tener un valor comercial como materiales secundarios o leñas para celulosa y aglomerados es el 40 % del volumen maderable acumulado por hectárea, dado que en etapas jóvenes de los árboles, mas del 50% de las estructuras vegetativas aún no son leñosas.

Del mismo modo se han tomado de referencia los precios actuales del valor de los productos maderables, los cuales rigen en el mercado para junio de 2005, siendo éstos de \$1000.00 por metro cúbico de primarios y \$450.00 por metro cúbico de secundarios o leñas puestos libre a bordo en patio industrial o centro de almacenamiento; mientras que el precio de productos de arbolado en pie es \$800.00 por m³ de primarios y de \$350.00/m³ de secundarios (PROBOSQUE, 2005).

La tasa de actualización del valor económico de los productos maderables que se utilizó para el análisis de rentabilidad, fue considerada de manera análoga la que rige en el mercado del valor de CETES a 28 días para junio de 2005 (9.62%).

5.3. RESULTADOS Y DISCUSION

Bajo esos supuestos, la acumulación de volúmenes maderables de tipo comercial y su valor económico, se comporta según se muestra en el Cuadro No. 24.

Cuadro No. 24. Volumen maderable acumulado en la plantación y valor comercial en el mercado

EDAD	DIAMETRO NORMAL	VOLUMEN m ³ /Ha	VOLUMEN DE PRIMARIOS (m ³)	VOLUMEN DE SECUNDARIOS (m ³)	VALOR DE LA PRODUCCION (\$)
1	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.26	0.06	0.00	0.02	8.40
3	0.56	0.31	0.00	0.12	43.40
4	0.94	0.92	0.00	0.37	128.80
5	1.40	2.09	0.00	0.84	292.60
6	1.93	3.98	0.00	1.59	557.20
7	2.50	6.71	0.00	2.68	939.40
8	3.13	10.39	0.00	4.16	1,454.60
9	3.78	15.07	0.00	6.03	2,109.80
10	4.47	20.75	0.00	8.30	2,905.00
11	5.18	27.42	0.00	10.97	3,838.80
12	5.92	35.02	0.00	14.01	4,902.80
13	6.66	43.49	0.00	17.40	6,088.60
14	7.41	52.75	0.00	21.10	7,385.00
15	8.17	62.69	0.00	25.08	8,776.60
16	8.93	73.23	0.00	29.29	10,252.20
17	9.69	84.26	0.00	33.70	11,796.40
18	10.44	95.67	0.00	38.27	13,393.80
19	11.19	107.39	0.00	42.96	15,034.60
20	11.94	119.32	0.00	47.73	16,704.80
21	12.67	131.36	0.00	52.54	18,390.40
22	13.39	143.46	0.00	57.38	20,084.40
23	14.10	155.54	0.00	62.22	21,775.60
24	14.80	167.53	0.00	67.01	23,454.20
25	15.48	179.40	0.00	71.76	25,116.00
26	16.15	191.08	0.00	76.43	26,751.20
27	16.80	202.54	0.00	81.02	28,355.60
28	17.43	213.76	0.00	85.50	29,926.40
29	18.06	224.69	0.00	89.88	31,456.60
30	18.66	235.33	0.00	94.13	32,946.20
31	19.25	245.65	0.00	98.26	34,391.00
32	19.82	255.64	0.00	102.26	35,789.60
33	20.38	265.30	0.00	106.12	37,142.00
34	20.91	274.62	0.00	109.85	38,446.80
35	21.44	283.59	0.00	113.44	39,702.60
36	21.94	292.22	0.00	116.89	40,910.80
37	22.43	300.50	0.00	120.20	42,070.00
38	22.91	308.46	0.00	123.38	43,184.40
39	23.37	316.08	0.00	126.43	44,251.20
40	23.81	323.37	0.00	129.35	45,271.80
41	24.24	330.35	0.00	132.14	46,249.00
42	24.66	337.02	0.00	134.81	47,182.80
43	25.06	343.40	206.04	137.36	212,908.00
44	25.44	349.48	209.69	139.79	216,677.60
45	25.82	355.29	213.17	142.12	220,279.80
46	26.18	360.82	216.49	144.33	223,708.40
47	26.52	366.10	219.66	146.44	226,982.00
48	26.86	371.13	222.68	148.45	230,100.60
49	27.18	375.93	225.56	150.37	233,076.60
50	27.49	380.49	228.29	152.20	235,903.80

Para evaluar la rentabilidad de la producción maderable, de igual forma, se calculó el valor actual neto (VAN), comparando los beneficios actualizados con los costos actualizados obteniendo el valor económico de la producción.

Aplicando el factor de actualización mencionado, obtenemos los resultados que se muestran en el Cuadro 25.

Cuadro No. 25. Estimación de rentabilidad por producción maderable

EDAD	COSTOS (\$) JUNIO DE 2005	BENEFICIOS (\$) JUNIO DE 2005	FACTOR DE ACTUALIZACION	COSTOS ACTUALIZADOS	BENEFICIOS ACTUALIZADOS
1	9,647.50	0.00	0.91	8800.86	0.00
2	365.72	8.40	0.83	304.35	6.99
3	365.72	43.40	0.76	277.64	32.95
4	365.72	128.80	0.69	253.27	89.20
5	365.72	292.60	0.63	231.05	184.85
6	365.72	557.20	0.58	210.77	321.12
7	365.72	939.40	0.53	192.27	493.88
8	365.72	1454.60	0.48	175.40	697.63
9	365.72	2109.80	0.44	160.01	923.07
10	365.72	2905.00	0.40	145.97	1159.44
11	365.72	3838.80	0.36	133.16	1397.68
12	365.72	4902.80	0.33	121.47	1628.42
13	365.72	6088.60	0.30	110.81	1844.80
14	365.72	7385.00	0.28	101.09	2041.24
15	365.72	8776.60	0.25	92.22	2212.99
16	365.72	10252.20	0.23	84.12	2358.20
17	365.72	11796.40	0.21	76.74	2475.27
18	365.72	13393.80	0.19	70.01	2563.82
19	365.72	15034.60	0.17	63.86	2625.34
20	365.72	16704.80	0.16	58.26	2661.00
21	365.72	18390.40	0.15	53.15	2672.42
22	365.72	20084.40	0.13	48.48	2662.46
23	365.72	21775.60	0.12	44.23	2633.33
24	365.72	23454.20	0.11	40.35	2587.41
25	365.72	25116.00	0.10	36.80	2527.58
26	365.72	26751.20	0.09	33.57	2455.89
27	365.72	28355.60	0.08	30.63	2374.73
28	365.72	29926.40	0.08	27.94	2286.34
29	365.72	31456.60	0.07	25.49	2192.34
30	365.72	32946.20	0.06	23.25	2094.65
31	365.72	34391.00	0.06	21.21	1994.62
32	365.72	35789.60	0.05	19.35	1893.58
33	365.72	37142.00	0.05	17.65	1792.68
34	365.72	38446.80	0.04	16.10	1692.81
35	365.72	39702.60	0.04	14.69	1594.69
36	365.72	40910.80	0.04	13.40	1499.01
37	365.72	42070.00	0.03	12.22	1406.21
38	365.72	43184.40	0.03	11.15	1316.78
39	365.72	44251.20	0.03	10.17	1230.90
40	365.72	45271.80	0.03	9.28	1148.78
41	365.72	46249.00	0.02	8.47	1070.58
42	365.72	47182.80	0.02	7.72	996.35
43	365.72	212908.00	0.02	7.05	4101.39
44	365.72	216677.60	0.02	6.43	3807.70
45	365.72	220279.80	0.02	5.86	3531.29

Cuadro No. 25. Continuación...

EDAD	COSTOS (\$) JUNIO DE 2005	BENEFICIOS (\$) JUNIO DE 2005	FACTOR DE ACTUALIZACION	COSTOS ACTUALIZADOS	BENEFICIOS ACTUALIZADOS
46	365.72	223708.40	0.01	5.35	3271.54
47	365.72	226982.00	0.01	4.88	3028.10
48	365.72	230100.60	0.01	4.45	2800.32
49	365.72	233076.60	0.01	4.06	2587.61
50	365.72	235903.80	0.01	3.70	2389.16
TOTAL				12,230.39	2,389.16

El valor de beneficios actualizados en el caso de la producción maderable, corresponde en este caso al obtenido en el último año de cosecha, dado que en ese caso, solamente se puede extraer productos de manera circunstancial, bajo el supuesto de una cosecha total en la hectárea de referencia y no la suma de los beneficios anuales, porque de ser cosechada la plantación en algún año intermedio, significaría iniciar el proceso de producción mediante el establecimiento de una plantación nueva; ésa situación no sucede en el caso de el valor de los servicios ambientales, mismos que si tienen un valor específico anual y acumulativo durante el tiempo.

Con la información generada en la actualización de costos y beneficios, encontramos que al año 50, el valor actual neto de la producción maderable y la relación beneficio costo son: **VAN = \$-9,841.23 y B/C=0.20**, indicadores que nos señalan que la producción de madera mediante plantaciones forestales en el sitio estudiado no son rentables económicamente, condicionado por el bajo rendimiento o crecimiento del arbolado que a su vez está limitado por las características climáticas del sitio.

5.4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.4.1. Conclusiones

1.- El establecimiento de plantaciones forestales con fines de producción maderable en el área natural protegida "Nevado de Toluca", no garantiza rentabilidad económica para proyectos de inversión con esos propósitos.

2.- Paradójicamente, es necesario que los bosques retribuyan una alternativa de sustento económico para los pobladores del medio rural de influencia de la zona, de lo

contrario, seguirán realizándose actividades marginales que van sustituyendo paulatinamente la vegetación natural y deteriorando el ecosistema.

3.- La rentabilidad de los bosques en la zona de estudio, debe ser observada en función de un conjunto integral de beneficios que se generan por el mantenimiento y preservación del ecosistema.

4.- Lo anterior implica la necesidad de búsqueda de formas de apalancamiento de tipo económico a los propietarios de los recursos forestales del Parque, que permitan ordenar el uso del suelo, para evitar su deterioro.

5.- Los costos implicados en el establecimiento de plantaciones forestales en el área de estudio, debiera ser un concepto de inversión de tipo gubernamental tal como lo expone el decreto de creación del área natural protegida, de otra manera, no existirán inversionistas privados interesados en esa actividad ante la imposibilidad de recuperar y amortizar la inversión necesaria.

5.4.2. Recomendaciones

1.- Las partes altas del Parque Nacional, deben mantener una cubierta vegetal adecuada, con fines de evitar el arrastre desmesurado del suelo por efecto de escorrentías torrenciales y las implicaciones que conlleva en la pérdida de la productividad del suelo y los efectos nocivos que se causan en las partes bajas de la cuenca.

2.- Ante la necesidad de los propietarios de los bosques y de terrenos forestales de esa zona por desarrollar actividades productivas que les ofrezcan los medios de sustento económico para sus familias, deben promoverse proyectos integrales asociados a la zonificación y ordenamiento del uso potencial del suelo.

3.- El mantenimiento de los bosques y el establecimiento de plantaciones y/o reforestaciones para restaurar la cubierta forestal del Parque, debe ser una actividad

que genere empleos e ingresos a la población, de otra manera se seguirán teniendo pocas posibilidades de que estas prosperen.

4.- Según el Decreto de creación del área natural protegida, es urgente se apliquen los programas gubernamentales que se mencionan como obligación de la administración federal, encaminados al mantenimiento, conservación, manejo y preservación de los recursos naturales asociados e integrados en el Parque.

5.5. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- BORJA L., G. 1984. Consideraciones para la elaboración de proyectos silvícolas industriales con el uso de plantaciones forestales. En Memoria de la III Reunión de Plantaciones Forestales. INIF., México, D. F. pp 858 - 865.
- COMISION NACIONAL FORESTAL (CONAFOR). 2005. http://www.conafor.gob.mx/programas_nacionales_forestales/PRODEPLAN. Consultada el 22 de junio de 2005.
- ENRIQUEZ Q., M. y BACA, C. J. C. 1984. Rentabilidad de plantaciones forestales con especies de rápido crecimiento. En Memoria de la III Reunión Nacional Sobre Plantaciones Forestales. INIF., México, D. F. pp 899 – 905.
- ESCARPITA, H. J. 1978. Cálculo de rentabilidad de las plantaciones. En Memoria de la Primera Reunión Nacional Sobre Plantaciones Forestales. SARH, México, D. F.
- ESCARPITA H., J. 1984. Administración de recursos para el establecimiento de plantaciones. Rentabilidad. En Memoria de la III Reunión Nacional Sobre Plantaciones Forestales. INIF., México, D. F. pp 886 – 878.
- GONZALEZ G., C. 1994. La Legislación Forestal Mexicana y el establecimiento de plantaciones forestales comerciales. En Memoria de Plantaciones Forestales, IV Reunión Nacional. Subsecretaría Forestal y de la Fauna Silvestre; México, D. F. pp 1 – 13.
- PATIÑO V., F. 1994. Algunas experiencias de investigación y desarrollo de tecnologías para plantaciones forestales. En Memoria de Plantaciones Forestales, IV Reunión Nacional. Subsecretaría Forestal y de la Fauna Silvestre; México, D. F. pp 233 – 269.
- PROTECTORA DE BOSQUES DEL GOBIERNO DEL ESTADO DE MEXICO (PROBOSQUE). 2005. Comunicación personal con técnicos encargados del área de aprovechamientos forestales.

6. CONCLUSIONES GENERALES

Con base en los objetivos planteados en este estudio, se puede argumentar las siguientes conclusiones:

1.- En términos concretos, bajo la estructura de mercado actual para la valoración de los servicios ambientales de captura de carbono y retención e infiltración de agua por la vegetación, así como la producción maderable, el establecimiento de plantaciones forestales no ofrecen la rentabilidad económica que atraiga capital de inversión según lo muestran los indicadores financieros de cada actividad:

OBJETIVO DE LA PLANTACIÓN	RELACIÓN B/C	VAN (\$)
Captura de carbono	0.16	-10,263.22
Captación y retención de agua	0.14	-10,471.77
Producción maderable	0.20	-9,841.23

Incluso la magnitud de los indicadores obtenidos, sugieren que ni aún cuando se sumen los beneficios de los servicios ambientales se lograría la rentabilidad económica del establecimiento de plantaciones forestales en el sitio.

2.- Ante los resultados obtenidos, se puede aseverar que la generación de servicio ambientales por efecto del establecimiento de plantaciones forestales, son independientes de la producción maderable dado que el mercado de cada actividad establece supuestos y reglas distintas, por tanto, no existe un parámetro de comparación de rentabilidad entre la generación de los servicios ambientales y la producción maderable. Sin embargo, ninguna de esas actividades productivas por si misma ofrece beneficios económicos para la operación de ese tipo de proyectos, en el área de estudio.

3.- En todo caso, el valor económico de los servicios ambientales generados por plantaciones y/o reforestaciones deben ser actividades complementarias de un proyecto

integral, sobre todo cuando se trata de restaurar áreas que por distintas causas han perdido la cubierta vegetal y se pretenda su recuperación.

4.- Existe una disyuntiva respecto a la urgencia por recuperar y preservar los recursos forestales, sobre todo cuando se consideran áreas prioritarias para el amortiguamiento de los efectos de la contaminación ambiental y la recarga de los acuíferos, como lo es el caso del área de estudio; sin embargo, las necesidades económicas para lograr esos objetivos han quedado en propuestas y esfuerzos minimizados por los grandes montos de inversión requeridas para ello.

5.- Es comprensible que la administración gubernamental no cuente con los recursos económicos suficientes que den sustento a las necesidades para financiar este tipo de proyectos, sin embargo, es necesario emprender la búsqueda de esquemas que permitan recaudar recursos para ese propósito como se ha hecho en otros Países en donde los estudios de "Disponibilidad a Pagar" (DAP) han reflejado el interés de la ciudadanía por participar en la conservación, restauración y manejo de la vegetación en las partes altas de las cuencas.

6.- El tratamiento del área natural protegida, considerando las condiciones implícitas del ecosistema que resguarda y sus características biológicas limitadas, requieren de tratamiento especial diferenciado de aquellas que no tienen restricciones para su manejo, pero no debe eliminarse de manera definitiva la posibilidad de integrarlas a un esquema de producción, de otra manera, las necesidades que enfrentan los propietarios de esos bosques provocarán que se haga uso inadecuado de ellas a costa de su deterioro.

7.- Existen ecosistemas que tienen preferentemente un valor de tipo ecológico que el valor de tipo económico generado por la productividad, por ello, con base en la biodiversidad ecológica que sustentan esos ecosistemas, debieran ser sujetos de inversión de recursos canalizados a través de los programas internacionales que se han abierto para la conservación, con el propósito de resguardar la biodiversidad como fuente de germoplasma de los recursos biológicos.

8- Es imprescindible reconocer que la conservación y manejo de los ecosistemas requiere ser tratada desde el punto de vista de la rentabilidad económica, en función de la creciente demanda y presión social que sobre ellos se genera.

9- Finalmente, según los análisis financieros realizados para determinar la rentabilidad del establecimiento de plantaciones forestales con fines de generación de servicios ambientales en el Parque Nacional Nevado de Toluca, para el caso de captura de carbono el cual está en función del crecimiento en biomasa en la vegetación, refleja la necesidad de establecer el valor económico adecuado al ecosistema manejado con esos fines ya que existen diferencias sustantivas en el comportamiento del crecimiento de la vegetación como indicador de la productividad; se encontró que el precio de la tonelada de carbono capturada en el sitio debería ser del orden de \$900.00, para que ésta actividad logre financiar el establecimiento de plantaciones para restauración.

En el caso de retención de agua como efecto de la cobertura vegetal sobre el suelo, el análisis refleja la necesidad de establecer un valor más adecuado al valor del agua como lo señala Ibáñez (2005), quien considera que un precio de \$210.00 por millar de metros cúbicos de agua infiltrado sería más apegado a la realidad. Una vez evaluada la rentabilidad de la captación y retención de agua en el sitio, considerando ese precio, el establecimiento de plantaciones forestales con especies nativas sería rentable.

7. ANEXOS

7.1. DATOS DE CAMPO OBTENIDOS EN LA PLANTACIÓN DE ESTUDIO

Número de árboles por categoría diamétrica y alturas en el sitio de muestreo 1.

Número de árboles por categoría diamétrica y alturas en el sitio de muestreo 1.														Vol m3 (vta)	Vol m3 Comerc
Diámetro (cm)	Alturas (m)														
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
5														11.202	9.246
10	1	2	7	2											
15	1	1	7	4	1										
20			14	12	6	4									
25			2	4	4										
30						4		6							
35															
40								1							
No. Arb.	2	3	30	22	11	8	0	7	0	0	0	0	0	83	

Número de árboles por categoría diamétrica y alturas en el sitio de muestreo 2.

Número de árboles por categoría diamétrica y alturas en el sitio de muestreo 2:															Vol m3 (vta)	Vol m3 Comerc
Diámetro (cm)	Alturas (m)															
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			
5														10.324	3.209	
10		3	5	1	2											
15		3	8	10	4	1										
20		1	5	6	6	2		4								
25				5	8	5										
30							1	1								
35								2								
40																
No. Arb.	0	7	18	22	20	8	1	7	0	0	0	0	0	83		

Número de árboles por categoría diamétrica y alturas en el sitio de muestreo 3.

Número de árboles por categoría diamétrica y alturas en el sitio de muestreo 3.															Vol m3 (vta)	Vol m3 Comerc
Diámetro (cm)	Alturas (m)															
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			
5	4	1												8.048	2.644	
10		9	12													
15		4	14	7	6											
20		1	13	5	5	1										
25			1	6	5			2								
30				1												
35																
40																
No. Arb.	4	15	40	19	16	1	0	2	0	0	0	0	0	97		

Número de árboles por categoría diamétrica y alturas en el sitio de muestreo 4.

Número de árboles por categoría diamétrica y alturas en el sitio de muestreo 4.														Vol m3 (vta)	Vol m3 Comerc
Diámetro (cm)	Alturas (m)														
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
5		9		1										9.695	3.704
10		9	5	1	1										
15		1	9	12	11										
20			2	4	11	7		1							
25				2	4	7		3							
30								1							
35															
40															
No. Arb.	0	19	16	20	27	14	0	5	0	0	0	0	0	101	

Número de árboles por categoría diamétrica y alturas en el sitio de muestreo 5.

Número de árboles por categoría diamétrica y alturas en el sitio de muestreo 3.														Vol m3 (vta)	Vol m3 Comerc
Diámetro (cm)	Alturas (m)														
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
5	1	1			1									17.48	8.36
10		2	9	4	8	4		1							
15	1			6	12	13	8	10	1						
20				1	1	4	3	12	7	3					
25				2	2	1	4	4	5	2	2				
30									2	1					
35															
40															
No. Arb.	2	3	9	13	24	22	15	27	15	6	2	0	0	138	

Número de árboles por categoría diamétrica y alturas en el sitio de muestreo 6.

Número de árboles por categoría diamétrica y alturas en el sitio de muestreo C.															Vol m3 (vta)	Vol m3 Comerc
Diámetro (cm)	Alturas (m)															
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			
5		5	10	2										20.214	9.607	
10		4	6	26	17	11	1									
15		1		2	28	16	14	17	8	2	1					
20					1	3	7	9	12	7	3	1				
25									3	3	2					
30													1			
35																
40																
No. Arb.	0	10	16	30	46	30	22	26	23	12	6	1	1	223		

Número de árboles por categoría diamétrica y alturas en el sitio de muestreo 7.

Número de árboles por categoría diamétrica y alturas en el sitio de muestreo 7.															Vol m3 (vta)	Vol m3 Comerc
Diámetro (cm)	Alturas (m)															
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			
5			5	1					1					15.4	6.914	
10			4	14	16	7	1	1		1						
15			1	4	21	12	11	10	4	1						
20				1	6	3	4	8	9	2						
25					2		1	1	2	2	1					
30								1				1				
35																
40																
No. Arb.	0	0	10	20	45	22	17	21	16	6	1	1	0	159		

Número de árboles por categoría diamétrica y alturas en el sitio de muestreo 8.

Número de árboles por categoría diamétrica y alturas en el sitio de muestreo 6.															Vol m3 (vta)	Vol m3 Comerc
Diámetro (cm)	Alturas (m)															
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			
5		1	3	1										13.507	5.017	
10	2	1	12	22	27	7										
15			2	4	19	21	2	6	2							
20				2		4	4	7	5	1		1	1			
25						1			1	1	2	1				
30										1			1			
35																
40																
No. Arb.	2	2	17	29	46	33	6	13	8	3	2	2	2	165		

Número de árboles por categoría diamétrica y alturas en el sitio de muestreo 9.

Diámetro (cm)	Alturas (m)													Vol m3 (vta)	Vol m3 Comerc
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
5														12.903	5.596
10		1	10	8		1									
15			2	11	7	9	5								
20			1		7	8	4	5	2						
25					4	2		2	3		1				
30					1			3		2	1				
35															
40															
No. Arb.	0	1	13	19	19	20	9	10	5	2	2	0	0	100	

Número de árboles por categoría diamétrica y alturas en el sitio de muestreo 10.

Diámetro (cm)	Alturas (m)													Vol m3 (vta)	Vol m3 Comerc
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
5	2	8	14	2										11.065	3.586
10			16	33	5	1	3								
15			3	11	22	8	3	2							
20				2	7	8	2	2		1					
25					1	3		2							
30															
35															
40															
No. Arb.	2	8	33	48	35	20	8	6	0	1	0	0	0	161	

Número de árboles por categoría diamétrica y alturas en el sitio de muestreo 11.

Diámetro (cm)	Alturas (m)													Vol m3 (vta)	Vol m3 Comerc
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
5	1	1												12.059	4.929
10		1	3	6		1									
15			1	11	20	2	1	3							
20					4	11	9	4	1	4					
25						3	2	2							
30						1	1								
35															
40															
No. Arb.	1	2	4	17	24	18	13	9	1	4	0	0	0	93	

Número de árboles por categoría diamétrica y alturas en el sitio de muestreo 12.

Diámetro (cm)	Alturas (m)													Vol m3 (vta)	Vol m3 Comerc
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
5	2	2	6											15.225	3.699
10			5	27	8	2									
15			1	16	25	17	3	1							
20				2	5	8	10	7	2						
25					1	4	4	3	3						
30										1					
35															
40															
No. Arb.	2	2	12	45	39	31	17	11	5	1	0	0	0	165	

Número de árboles por categoría diamétrica y alturas en el sitio de muestreo 13.

Número de árboles por categoría diamétrica y alturas en el sitio de muestreo 10.															Vol m3 (vta)	Vol m3 Comerc
Diámetro (cm)	Alturas (m)															
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			
5														10.487	3.951	
10		3		10	2											
15		6	6	14	4	3										
20		1	1	4	5	7	5	1								
25				3	4	7	2		1							
30					1			1	1							
35																
40																
No. Arb.	0	10	7	31	16	17	7	2	2	0	0	0	0	92		

Número de árboles por categoría diamétrica y alturas en el sitio de muestreo 14.

Número de árboles por categoría diamétrica y alturas en el sitio de muestreo 14.															Vol m3 (vta)	Vol m3 Comerc
Diámetro (cm)	Alturas (m)															
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			
5		5												9.358	4.12	
10		3	7	6	1											
15			3	4	4	2	2	4								
20		1	1	3	3	4	2	2		1						
25					2	2	2	4		1		1				
30				1				3								
35									1							
40																
No. Arb.	0	9	11	14	10	8	6	13	1	2	0	1	0	75		

Número de árboles por categoría diamétrica y alturas en el sitio de muestreo 15.

Número de árboles por categoría diamétrica y alturas en el sitio de muestreo 15.															
Diámetro (cm)	Alturas (m)													Vol m3 (vta)	Vol m3 Comerc
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
5	5	15	5	1										13.054	3.002
10		9	39	32	3										
15		1	8	37	28	3	2								
20			1	3	9	8	5	2							
25				1	3	1	2	1							
30															
35															
40															
No. Arb.	5	25	53	74	43	12	9	3	0	0	0	0	0	224	

Número de árboles por categoría diamétrica y alturas en el sitio de muestreo 16.

Número de árboles por categoría diamétrica y alturas en el sitio de muestreo 10.															
Diámetro (cm)	Alturas (m)													Vol m3 (vta)	Vol m3 Comerc
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
5	3	11	6	1										14.004	4.46
10		2	17	28	7	1									
15				25	25	7	1								
20				5	11	6	12	5	2						
25						1	1		3	1					
30							1		1						
35															
40															
No. Arb.	3	13	23	59	43	15	15	5	6	1	0	0	0	183	

Número de árboles por categoría diamétrica y alturas en el sitio de muestreo 17.

Número de árboles por categoría diamétrica y alturas en el sitio de muestreo 17.															Vol m3 (vta)	Vol m3 Comerc
Diámetro (cm)	Alturas (m)															
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			
5		2	1											10.386	4.069	
10	1	2	6	13	3											
15			1	21	11											
20			2	7	7	6	2	4	1	1						
25					1	4	3			1						
30						1				2						
35																
40																
No. Arb.	1	4	10	41	22	11	5	4	1	4	0	0	0	103		

Número de árboles por categoría diamétrica y alturas en el sitio de muestreo 18.

Número de árboles por categoría diamétrica y alturas en el sitio de muestreo 10.																Vol m3 (vta)	Vol m3 Comerc
Diámetro (cm)	Alturas (m)																
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15				
5		10	7											10.608	3.242		
10	2	8	30	28	4	1											
15		4	6	23	13	2		2									
20			1	6	9	3	3	4									
25					1				1	1							
30					1			1	1								
35																	
40																	
No. Arb.	2	22	44	57	28	6	3	7	2	1	0	0	0	172			

Número de árboles por categoría diamétrica y alturas en el sitio de muestreo 19.

Número de árboles por categoría diamétrica y alturas en el sitio de muestreo 19.																
Diámetro (cm)	Alturas (m)														Vol m3 (vta)	Vol m3 Comerc
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			
5	1	2	1											8.681	4.406	
10		3	5	7												
15			3	5	4	4										
20				1	6	1	3	1								
25						1	2	3	4	3						
30										3	1					
35																
40																
No. Arb.	1	5	9	13	10	6	5	4	4	6	1	0	0	64		

Total de árboles por categoría en los 19 sitios de muestreo.

Total de árboles por categoría en los 19 sitios de muestreo.															Vol m3 (vta)	Vol m3 Comerc
Diámetro (cm)	Alturas (m)															
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			
5	19	73	58		1				1					233.7	93.761	
10	6	62	198	9	104	36	2	2		1				Promedio/sitio		
15	2	21	75	268	265	120	52	50	15	3	1			12.3	4.935	
20		4	41	227	109	98	76	77	40	15	3	2	1	Promedio/ha		
25			3	64	42	42	25	29	27	20	8	2		123.0	49.348	
30				23	3	6	3	21	5	10	2	1	2	No. de árboles		
35				2				2	1					sitio	Por ha	
40								1						130.58	1305.79	
No. Arb.	27	160	375	593	524	302	158	182	89	49	14	5	3	2481		

Pinus montezumae

19

Número de sitios:

118

7.3. ESTIMACION DE BIOMASA EN EL MANTILLO

PESO FRESCO								
No. Sitio	P. REC. VACIO (grs)	P. REC. C/MUESTRA (grs)	Peso/1/4m ² (grs)	Peso/m ² (grs)	Desviaciones	Promedio gr/m ²	Promedio Kg/sitio	Promedio Kg/ha
SITIO 1	182,85	415,40	232,55	930,20	-206,54	1136,74	1136,74	11367,43
SITIO 2	180,58	635,03	454,45	1817,80	681,06			
SITIO 3	184,19	439,88	255,69	1022,76	-113,98			
SITIO 4	183,35	491,10	307,75	1231,00	94,26			
SITIO 5	18,02	321,35	303,33	1213,32	76,58			
SITIO 6	17,85	451,45	433,60	1734,40	597,66			
SITIO 7	17,86	291,74	273,88	1095,52	-41,22			
SITIO 8	17,84	192,14	174,30	697,20	-439,54			
SITIO 9	18,11	280,14	262,03	1048,12	-88,62			
SITIO 10	17,54	302,48	284,94	1139,76	3,02			
SITIO 11	17,87	388,35	370,48	1481,92	345,18			
SITIO 12	18,05	225,47	207,42	829,68	-307,06			
SITIO 13	17,77	444,00	426,23	1704,92	568,18			
SITIO 14	17,62	155,92	138,30	553,20	-583,54			
SITIO 15	17,99	368,75	350,76	1403,04	266,30			
SITIO 16	18,20	181,35	163,15	652,60	-484,14			
SITIO 17	17,88	213,82	195,94	783,76	-352,98			
SITIO 18	18,01	258,03	240,02	960,08	-176,66			
SITIO 19	16,98	341,69	324,71	1298,84	162,10			
Totales			5399,53	21598,12				

PESO SECO								
No. Sitio	Peso Rec. Vacio (grs)	Peso Rec. C/MUESTRA (grs)	Peso/1/4m ² (grs)	Peso/m ² (grs)	Desviaciones	Promedio gr/m ²	Promedio Kg/sitio	Promedio Kg/ha
SITIO 1	172,79	379,93	207,14	828,56	-195,62	1024,18	1024,18	10241,83
SITIO 2	170,66	567,62	396,96	1587,84	563,66			
SITIO 3	173,67	382,63	208,96	835,84	-188,34			
SITIO 4	173,34	438,40	265,06	1060,24	36,06			
SITIO 5	17,70	277,10	259,40	1037,60	13,42			
SITIO 6	17,35	381,85	364,50	1458,00	433,82			
SITIO 7	17,10	261,80	244,70	978,80	-45,38			
SITIO 8	17,63	173,45	155,82	623,28	-400,90			
SITIO 9	17,62	262,75	245,13	980,52	-43,66			
SITIO 10	17,39	282,12	264,73	1058,92	34,74			
SITIO 11	17,53	360,44	342,91	1371,64	347,46			
SITIO 12	17,71	213,80	196,09	784,36	-239,82			
SITIO 13	17,40	417,75	400,35	1601,40	577,22			
SITIO 14	17,68	148,50	130,82	523,28	-500,90			
SITIO 15	17,64	342,98	325,34	1301,36	277,18			
SITIO 16	17,89	172,72	154,83	619,32	-404,86			
SITIO 17	17,50	199,89	182,39	729,56	-294,62			
SITIO 18	17,56	240,95	223,39	893,56	-130,62			
SITIO 19	17,65	314,00	296,35	1185,40	161,22			
Totales			4864,87	19459,48				

7.4. PROMEDIO DE VARIABLES OBSERVADAS EN CAMPO DE ÁRBOLES DOMINANTES.

SITIO	ALTURA (m)	DIAMETRO NORMAL (cm)	TIEMPO DE PASO (años)	DIAMETRO DE COPA (m)
1	10.00	35.00	6.00	4.00
2	10.00	35.00	6.00	4.20
3	8.00	25.00	7.00	3.70
4	10.00	25.00	7.00	4.30
5	15.00	35.00	5.00	5.40
6	15.00	30.00	7.00	5.20
7	10.00	30.00	6.00	4.20
8	15.00	30.00	6.00	5.80
9	13.00	30.00	6.00	5.30
10	12.00	25.00	6.00	6.00
11	11.00	30.00	7.00	5.00
12	11.00	25.00	7.00	4.50
13	12.00	30.00	7.00	6.50
14	11.00	35.00	6.00	6.00
15	11.00	25.00	7.00	4.00
16	10.00	25.00	5.00	4.00
17	12.00	30.00	7.00	5.00
18	12.00	30.00	5.00	4.50
19	12.00	30.00	6.00	4.50
Promedio	11.57	29.47	6.26	4.80

7.5. OBTENCIÓN DE INDICADORES FINANCIEROS DE CAPTURA DE CARBONO, UTILIZANDO UN PRECIO DE \$900.00/TON DE CARBONO CAPTURADA.

Carbono ton/ha	Captura anual	Valor del C capturado	Costos de Estab. Y Mantto.	Factor de Actualizac.	Costos Actualizados	Beneficios Actualizados
0.00	0.00	0.97	9647.50	0.91	8800.86	0.89
0.02	0.02	15.46	365.72	0.83	304.35	12.86
0.09	0.07	64.56	365.72	0.76	277.64	49.01
0.27	0.18	160.25	365.72	0.69	253.27	110.98
0.61	0.34	304.48	365.72	0.63	231.05	192.36
1.15	0.55	492.29	365.72	0.58	210.77	283.71
1.95	0.79	714.73	365.72	0.53	192.27	375.76
3.02	1.07	961.15	365.72	0.48	175.40	460.97
4.37	1.36	1220.74	365.72	0.44	160.01	534.09
6.02	1.65	1483.47	365.72	0.40	145.97	592.08
7.95	1.93	1740.69	365.72	0.36	133.16	633.77
10.16	2.21	1985.32	365.72	0.33	121.47	659.41
12.62	2.46	2211.92	365.72	0.30	110.81	670.20
15.30	2.69	2416.59	365.72	0.28	101.09	667.95
18.19	2.89	2596.80	365.72	0.25	92.22	654.77
21.25	3.06	2751.19	365.72	0.23	84.12	632.83
24.44	3.20	2879.39	365.72	0.21	76.74	604.19
27.76	3.31	2981.78	365.72	0.19	70.01	570.77
31.16	3.40	3059.34	365.72	0.17	63.86	534.22
34.62	3.46	3113.49	365.72	0.16	58.26	495.97
38.11	3.50	3145.93	365.72	0.15	53.15	457.16
41.62	3.51	3158.56	365.72	0.13	48.48	418.71
45.12	3.50	3153.35	365.72	0.12	44.23	381.34
48.61	3.48	3132.31	365.72	0.11	40.35	345.55
52.05	3.44	3097.42	365.72	0.10	36.80	311.71
55.44	3.39	3050.55	365.72	0.09	33.57	280.06
58.76	3.33	2993.51	365.72	0.08	30.63	250.70
62.02	3.25	2927.97	365.72	0.08	27.94	223.69
65.19	3.17	2855.45	365.72	0.07	25.49	199.01
68.27	3.09	2777.36	365.72	0.06	23.25	176.58
71.27	2.99	2694.95	365.72	0.06	21.21	156.30
74.17	2.90	2609.35	365.72	0.05	19.35	138.06
76.97	2.80	2521.54	365.72	0.05	17.65	121.70
79.67	2.70	2432.41	365.72	0.04	16.10	107.10
82.28	2.60	2342.70	365.72	0.04	14.69	94.10
84.78	2.50	2253.06	365.72	0.04	13.40	82.55
87.18	2.40	2164.04	365.72	0.03	12.22	72.33
89.49	2.31	2076.12	365.72	0.03	11.15	63.31
91.70	2.21	1989.68	365.72	0.03	10.17	55.35
93.82	2.12	1905.03	365.72	0.03	9.28	48.34
95.84	2.02	1822.44	365.72	0.02	8.47	42.19
97.78	1.94	1742.10	365.72	0.02	7.72	36.79
99.63	1.85	1664.17	365.72	0.02	7.05	32.06
101.39	1.77	1588.77	365.72	0.02	6.43	27.92
103.08	1.68	1515.97	365.72	0.02	5.86	24.30
104.68	1.61	1445.81	365.72	0.01	5.35	21.14
106.21	1.53	1378.32	365.72	0.01	4.88	18.39
107.67	1.46	1313.51	365.72	0.01	4.45	15.99
109.06	1.39	1251.33	365.72	0.01	4.06	13.89
110.39	1.32	1191.78	365.72	0.01	3.70	12.07

VAN = 734.76
Rel B/C = 1.06

12,230.39 12,965.15

7.6. OBTENCIÓN DE INDICADORES FINANCIEROS DE CAPTACIÓN Y RETENCIÓN DE AGUA, UTILIZANDO UN PRECIO DE \$210.00/MILLAR DE m³ INFILTRADOS

Edad	Costos a junio de 2005 (\$)	Vol. Infil. Millares de m ³	Beneficios (\$) jun 05	Factor de Actualización	Costos Actualizados	Beneficios Actualizados
1	9,647.50	6.50	1365	0.91	8800.86	1245.21
2	365.72	6.50	1365	0.83	304.35	1135.93
3	365.72	6.50	1365	0.76	277.64	1036.25
4	365.72	6.50	1365	0.69	253.27	945.31
5	365.72	6.50	1365	0.63	231.05	862.35
6	365.72	6.50	1365	0.58	210.77	786.67
7	365.72	6.50	1365	0.53	192.27	717.64
8	365.72	6.80	1428	0.48	175.40	684.87
9	365.72	6.80	1428	0.44	160.01	624.77
10	365.72	6.80	1428	0.40	145.97	569.94
11	365.72	6.80	1428	0.36	133.16	519.92
12	365.72	7.30	1533	0.33	121.47	509.17
13	365.72	7.30	1533	0.30	110.81	464.49
14	365.72	7.30	1533	0.28	101.09	423.73
15	365.72	7.30	1533	0.25	92.22	386.54
16	365.72	7.30	1533	0.23	84.12	352.62
17	365.72	8.10	1701	0.21	76.74	356.93
18	365.72	8.10	1701	0.19	70.01	325.60
19	365.72	8.10	1701	0.17	63.86	297.03
20	365.72	8.10	1701	0.16	58.26	270.96
21	365.72	8.10	1701	0.15	53.15	247.18
22	365.72	8.10	1701	0.13	48.48	225.49
23	365.72	8.10	1701	0.12	44.23	205.70
24	365.72	8.10	1701	0.11	40.35	187.65
25	365.72	8.10	1701	0.10	36.80	171.18
26	365.72	8.10	1701	0.09	33.57	156.16
27	365.72	8.10	1701	0.08	30.63	142.46
28	365.72	8.10	1701	0.08	27.94	129.95
29	365.72	8.10	1701	0.07	25.49	118.55
30	365.72	8.10	1701	0.06	23.25	108.15
31	365.72	8.10	1701	0.06	21.21	98.66
32	365.72	8.10	1701	0.05	19.35	90.00
33	365.72	8.10	1701	0.05	17.65	82.10
34	365.72	8.10	1701	0.04	16.10	74.89
35	365.72	8.10	1701	0.04	14.69	68.32
36	365.72	8.10	1701	0.04	13.40	62.33
37	365.72	8.10	1701	0.03	12.22	56.86
38	365.72	8.10	1701	0.03	11.15	51.87
39	365.72	8.10	1701	0.03	10.17	47.32
40	365.72	8.10	1701	0.03	9.28	43.16
41	365.72	8.10	1701	0.02	8.47	39.38
42	365.72	8.10	1701	0.02	7.72	35.92
43	365.72	8.10	1701	0.02	7.05	32.77
44	365.72	8.10	1701	0.02	6.43	29.89
45	365.72	8.10	1701	0.02	5.86	27.27
46	365.72	8.10	1701	0.01	5.35	24.88
47	365.72	8.10	1701	0.01	4.88	22.69
48	365.72	8.10	1701	0.01	4.45	20.70
49	365.72	8.10	1701	0.01	4.06	18.88
50	365.72	8.10	1701	0.01	3.70	17.23

VAN = 2,923.11
Rel B/C = 1.24

12,230.39 15,153.51