

---

Evaluación de planes de manejo  
forestal en un predio con  
plantaciones de *Eucalyptus grandis*  
del NE de Entre Ríos. Análisis  
económico y ambiental.

---

**Trabajo Final**

**Modalidad**

- a. Una investigación en cualquiera de los campos  
de las Ciencias Agrarias y Forestales.**

**ALUMNO:** GONZÁLEZ MESQUIDA JOSÉ BERNARDO

**LEGAJO:** 27250/2

**DNI:** 36772752

**MAIL:** bernardojgm@hotmail.com

**TELEFONO:** 02317-15487239

**DIRECTOR**

GOYA, JUAN FRANCISCO

**CODIRECTOR**

YAPURA, PABLO FERNANDO

## RESUMEN

Con el objetivo de desarrollar un modelo que maximice los beneficios económicos y ambientales de la Unidad de Manejo Forestal (UMF) bajo estudio, y utilizando en conjunto técnicas de Programación Lineal (PL) y de simulación, se plantearon y evaluaron 3 modelos de optimización (irrestringido, económico y carbono) para *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, bajo 3 calidades de sitio diferentes y a lo largo de un horizonte de planificación de 30 años. Los indicadores principales utilizados fueron el Valor Actual Neto (VAN), Nivel de Carbono Absoluto (NCA) y Volumen Total Cosechado (VTC). Los resultados arrojaron que optar por el modelo económico en lugar del irrestringido, además de aportar estabilidad financiera disminuyó el VAN entre 8,1 y 14,6 %, incrementó los NCA del sistema entre 3,4 y 27,7%, y disminuyó el VTC entre 14,5 y 19,4%, dependiendo del sitio. Por otro lado, optar por el modelo carbono en lugar del económico, además de mantener la estabilidad financiera disminuyó 10% el VAN, incrementó los NCA entre 8,1 y 15,5 % y disminuyó el VTC entre 10 y 11%, dependiendo del sitio. A partir de lo anterior, se concluye que siempre que se quiera incrementar los niveles de carbono de la UMF con los modelos utilizados, desde el punto de vista de la optimización, siempre será sacrificando beneficios económicos. Sin embargo, desde un punto de vista pragmático, la PL puede ayudar a ordenar una UMF para mejorar el desempeño general de todos los indicadores. Finalmente se resalta que, aunque los modelos utilizados son susceptibles de ser mejorados, la PL es una herramienta muy poderosa e indispensable para tomar decisiones a nivel de UMF.

## INTRODUCCIÓN

Los procesos ambientales y productivos vinculados con las plantaciones forestales representan un tema de investigación y gestión de interés internacional dado que la superficie ocupada por plantaciones forestales a nivel mundial se incrementó

notablemente durante las últimas décadas (Kanowski & Murray, 2008; FAO, 2010). Este aumento sustancial en el área destinada a plantaciones forestales representa un proceso de gran impacto y cambio en el uso de la tierra y en la estructura del paisaje, y ha generado controversias que se vienen desarrollando desde hace años, dentro y fuera de la comunidad científica (Bernhard-Reversat, 2001), y que tiene como principales actores a ONG, investigadores, entidades certificadoras y gestores forestales (Šimunović *et al.*, 2018). Como señala Klooster (2010), dichas controversias están asociadas tanto a la órbita social como a la ecológica, y los potenciales impactos negativos argumentados son variados. Mientras que los del primer grupo se encuentran vinculados fundamentalmente a conflictos sobre la tenencia de tierras, pérdida del empleo y medios de vida; los del segundo grupo abarcan la dispersión de especies exóticas, el uso de agroquímicos peligrosos, disturbios en la dinámica hídrica de los ecosistemas, pérdida de la biodiversidad (tanto de bosque primario como de pastizales) y alteración en la funcionalidad de dichos ecosistemas, es decir, su virtual desempeño como enormes “desiertos verdes”. Además ha surgido la discusión sobre la eficiencia de las certificaciones forestales para asegurar la sustentabilidad real de los bosques (Gullison, 2003). Estas disyuntivas, por otra parte, han sido el disparador de numerosos estudios para evaluar, entre otros, los efectos de las plantaciones sobre la dinámica de la biodiversidad (Brockerhoff *et al.*, 2008), y como afectan las mismas a la productividad de los suelos (Wall, 2012; Baral *et al.*, 2016).

El incremento del área de plantaciones en el NE de Argentina, SE de Brasil y Uruguay constituye un fenómeno de importancia regional que afectó a pastizales pampeanos, remanentes degradados de bosques del espinal y porciones de bosque atlántico (Bilenca & Miñarro, 2004). Ese reemplazo produjo cambios muy importantes en los procesos ecológicos a escala local y de paisaje. Numerosos estudios indican que las modificaciones en la estructura de la vegetación natural que resultan del

establecimiento de plantaciones, influyen sobre la dinámica hídrica, los ciclos del carbono y nutrientes y la biodiversidad (Turner & Lambert, 1996; Loumeto & Bernhard-Reversat, 2001).

La adaptación del manejo a escala del rodal y de Unidad de Manejo Forestal (UMF) puede contribuir a aumentar sus efectos positivos y reducir los negativos. Un manejo adecuado de las plantaciones podría compatibilizar la producción de bienes de manera rentable, valorando adicionalmente los servicios como la acumulación de carbono, lo cual contribuye a la reducción de la concentración del dióxido de carbono atmosférico. En este marco, el manejo forestal es un proceso administrativo y de regulación que implementa las políticas y los métodos requeridos para satisfacer los objetivos específicos de la planificación. En última instancia, el objetivo del Manejo Forestal es asegurar la provisión de bienes y servicios del bosque que la sociedad necesita y que se conserven o mejoren los ecosistemas forestales (Davis *et al.*, 2001; Bettinger *et al.*, 2009).

Los Sistemas Silvícolas son el conjunto de prácticas culturales que se prescriben para asegurar y controlar el establecimiento, la conducción y cosecha del rodal (Smith *et al.*, 1997). Un plan de manejo a escala de UMF implica el análisis de diferentes alternativas de sistemas silvícolas, incluyendo las edades de cosecha con un horizonte de planificación predefinido. Algunas de las variables a considerar para estas decisiones son los factores de producción y características del proceso productivo, como por ejemplo la elección de la especie y el material genético a utilizar, la calidad de sitio de los rodales, la superficie disponible, la edad de la rotación, los tratamientos intermedios, las oscilaciones del mercado y otras contingencias económico-financieras. Adicionalmente existen otras variables relacionadas con los posibles servicios ambientales que generarían las plantaciones, dentro de las cuales destaca la capacidad de secuestro o remoción de carbono atmosférico y su equivalente en CO<sub>2</sub>.

La herramienta para implementar planes de manejo a nivel de UMF es un documento que se conoce como plan o programa de cortas o cosechas. Tanto las características de operación (volúmenes anuales de cosecha, flujos de fondos anuales, estructura de edades) como la estructura final de la UMF serán resultados directos de las actividades especificadas en el programa de cosechas (Clutter *et al.*, 1983; Buongiorno & Gilless, 1987, 2003). Los problemas del manejo forestal con objetivos de alguna manera contrapuestos, y la búsqueda de soluciones de compromiso mediante técnicas de optimización, principalmente con programación lineal y con programación por metas, multicriterio o multiobjetivos, ha sido estudiada y abordada en el nivel de rodal, tanto en la silvicultura de rodales templados coetáneos (Raymer *et al.*, 2011) como en la de rodales tropicales disetáneos (Boscolo & Buongiorno, 1997), lo que ejemplifica acabadamente la diversidad de la problemática. Con idéntico enfoque y técnicas de optimización, el problema también ha sido abordado en el nivel de UMF (Keleş & Başkent, 2007; Roise *et al.*, 2016), e incluso también lo ha sido en una escala que se extiende desde la UMF para abarcar los aspectos logísticos del abastecimiento de la madera como materia prima y su transformación industrial, en este caso particular en el país (Broz *et al.*, 2017).

La potencial contribución que los bosques pueden hacer a la reducción de la concentración de dióxido de carbono atmosférico, uno de los principales gases de efecto invernadero, transformándolo en biomasa a través de la fotosíntesis, puede verse expresada en términos de créditos de carbono, es decir, toneladas métricas de dióxido de carbono equivalente ( $\text{CO}_2\text{eq}$ ).

En la actualidad, existen numerosas herramientas y modelos que permiten traducir el carbono de los sistemas forestales en créditos de carbono, como por ejemplo el modelo *CO2 fix*, que permite evaluar la compleja dinámica y almacenamiento del carbono a lo largo del tiempo, comparar escenarios con diferentes intervenciones de

manejo y, finalmente, traducir de manera cuantitativa el almacenaje de carbono en créditos (Gonzalez Mesquida, 2018).

*Eucalyptus grandis* es la principal especie forestal que se cultiva en la provincia de Entre Ríos y se caracteriza por su rápido crecimiento, alta acumulación de biomasa y elevados rendimientos en productos madereros con numerosos destinos industriales. Sin embargo, a pesar de representar una opción de enorme potencial para la generación de créditos de carbono, no existen antecedentes de un abordaje complementario, multipropósito y combinado sobre su manejo. En otras palabras, un enfoque que tenga en cuenta el componente financiero, pero que también contemple el potencial de las plantaciones para mitigar el cambio climático; ya que a pesar de todas las controversias generadas en torno a estos cultivos, existen evidencias que estos sistemas constituyen importantes sumideros de CO<sub>2</sub>.

El objetivo de este trabajo fue, entonces, evaluar a través del uso de diferentes herramientas y técnicas de manejo forestal, el potencial de la especie como productora de servicios ambientales, de manera complementaria al análisis financiero convencional centrado en la producción de bienes materiales.

### **Objetivo general**

Evaluar, a través del uso de indicadores financieros (VAN, VPS, estabilidad económica) y ambientales (niveles de carbono del sistema), el desempeño de diferentes escenarios considerando el impacto económico de la producción de madera, así como también la generación de créditos de carbono, en el nivel de UMF.

### **Objetivos particulares**

1. Parametrizar y validar el modelo de simulación *CO2 fix* para estimar la dinámica del carbono almacenado que puede generar una plantación de *E. grandis* y su traducción a créditos de carbono.
2. Modelizar diferentes alternativas de manejo como escenarios, considerando una producción sostenida de productos madereros.
3. Evaluar el desempeño de diferentes planes de manejo a escala de UMF, considerando aspectos económicos y ambientales mediante técnicas de optimización.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

Este Trabajo Final se realizó en el establecimiento Ybyraty (figura 1), cuya estructura de producción forestal se puede representar como una UMF compuesta de plantaciones de *E. grandis*. Este predio se encuentra a unos 50 km al sur de la ciudad de Concordia, provincia de Entre Ríos (31° 23' S, 58° 02' W). De dicha UMF (tabla 1), se contó con la información dasométrica de más de 50 rodales que cubren una superficie forestada total de 2.448 hectáreas (Sandoval *et al.*, 2019).

Clases de edad	Superficie ha
0	11,4
1	225,8
2	103,4
3	240,6
4	68,6
5	315,1
6	120,2
7	168,7
8	275,8
9	81,7
10	60,2
11	95,4
12	199,3
13	115,1
14	97,3
15	141,7
16	70,1
17	12,0
18	7,4
19	33,2
20	5,5

*Tabla 1. Estructura edad (años) y superficie (ha) inicial de la UMF*



Figura 1. Ubicación de la UMF.

### Planes de manejo, escenarios planteados

De acuerdo con el objetivo general del trabajo de obtener una alternativa de manejo forestal que maximice en la medida de lo posible, objetivos múltiples, se desarrollaron 9 escenarios alternativos que fueron aplicados a la UMF con un horizonte de planificación de 30 años, abarcando el período incluido entre los años 2020 y 2050. Estos 9 escenarios, consistieron en 3 planes de manejo de base que se replicaron para 3 calidades de sitio diferentes, asumiendo que la productividad de toda la UMF fue homogénea, es decir, la totalidad de la UMF con Sitio I, UMF con Sitio II, UMF con Sitio III. El objetivo de esta simplificación fue obtener de una manera muy sencilla,



indicadores absolutos para diferentes productividades de la tierra, y para comparar asimismo, sus valores relativos.

Los 3 escenarios base que se replicaron para las diferentes clases de sitio fueron los siguientes:

- Escenario base 1 (ESC1): Maximización de los beneficios actuales de forma irrestricta. Con este escenario se buscó maximizar los beneficios actuales sin considerar otras restricciones que no sea la superficie inicial de cada clase de edad.
- Escenario base 2 (ESC2): Con este escenario se buscó la maximización de los beneficios actuales de forma armonizada. Es decir lograr maximizar los beneficios totales presentes bajo una política de cosechas que asegurase un volumen anual aproximadamente constante.
- Escenario base 3 (ESC3): Con este escenario se buscó la maximización de los Niveles de Carbono Absolutos (NCA), en detrimento de un 10% preestablecido del VAN generado por el ESC2 para el mismo sitio. El NCA, es la sumatoria del carbono total de todos los períodos para un régimen dado. Es decir, es el carbono removido de la atmósfera del período 1+ carbono removido del período 2 +... + carbono removido del período 30. A pesar de que éste indicador contabiliza múltiples veces el mismo valor de carbono, teniendo en cuenta la naturaleza dinámica del elemento se consideró el mejor indicador para evaluar y comparar el desempeño de los diferentes escenarios.

Estos escenarios de base a su vez, se modelaron para tres calidades de sitio diferentes, con índices de: 20, 25 y 30. De esta manera se obtuvieron los 9 escenarios posibles:

- ESC1.1: Escenario base 1 con índice de sitio 20
- ESC1.2: Escenario base 1 con índice de sitio 25

- ESC1.3: Escenario base 1 con índice de sitio 30
  
- ESC2.1: Escenario base 2 con índice de sitio 20
- ESC2.2: Escenario base 2 con índice de sitio 25
- ESC2.3: Escenario base 2 con índice de sitio 30
  
- ESC3.1: Escenario base 3 con índice de sitio 20
- ESC3.2: Escenario base 3 con índice de sitio 25
- ESC3.3: Escenario base 3 con índice de sitio 30

Una vez planteados los diferentes escenarios, los Planes de Manejo y los calendarios de cosecha a nivel de UMF fueron determinados mediante la aplicación de técnicas de optimización (Buongiorno & Gilles, 1987, 2003; Kangas *et al.*, 2008; Bettinger *et al.*, 2009). Los rendimientos en volumen de madera y en CO<sub>2</sub>eq<sup>1</sup> a nivel de rodal y para toda la UMF fueron obtenidos por simulación con la aplicación del modelo del tipo híbrido CO<sub>2</sub> fix (Schelhaas *et al.*, 2004; Maser *et al.*, 2003) y la Plataforma de Gestión Forestal PlaForNea (Keller *et al.*, 2017). En otras palabras, se buscaron las alternativas de sistemas o regímenes silviculturales que maximizaran las variables deseadas para optimizar el manejo de la UMF. Éstas se diferenciaron exclusivamente, con el fin de no complejizar demasiado el trabajo, en la duración de las rotaciones. Es decir, se evaluaron para el horizonte de planificación preestablecido de 30 años, todas

---

<sup>1</sup> Para evitar ahondar en cuestiones metodológicas y de mercado entre Certificados de Reducción de Emisiones (CER, por sus siglas en inglés), y su contrapartida del mercado voluntario, Reducción Verificada de Emisiones (VER, por su siglas en inglés), el carbono arrojado por los diferentes escenarios se expresó de manera genérica en términos de créditos de carbono, es decir, toneladas métricas de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>eq).

las permutaciones posibles de turnos de cosecha. Por ejemplo, un régimen planteó cosechas cada 8 años, el siguiente régimen planteo frecuencia de cosechas cada 8 años, pero el último turno fue de 9 años, el siguiente régimen planteó cosechas cada 8 años, pero el último turno fue de 10 años, y así sucesivamente.

El análisis comparativo entre los escenarios se realizó teniendo en cuenta atributos típicos de la planificación de las cosechas, como duración de las rotaciones (años), valor actual neto (\$), servicio ambiental generado (tCO<sub>2</sub>eq), niveles de cosecha y existencias obtenidos (m<sup>3</sup>/año y m<sup>3</sup>, respectivamente), la dinámica a lo largo del horizonte de planificación, y la productividad general de las tierras (m<sup>3</sup>/ha/año y tCtotal/ha/año).

Adicionalmente, con el objetivo de obtener valores de referencia de la UMF, y fundamentalmente, la posibilidad máxima de cada escenario, ciertos atributos del bosque ordenado (Clutter *et al.*, 1983) fueron calculados para las 3 clases de sitio propuestas. De esta manera, se calculó el IMA máximo, la posibilidad anual, el número de clases y la superficie por clase de edad del bosque ordenado.

### **El modelo CO<sub>2</sub> fix**

El modelo CO<sub>2</sub> fix fue desarrollado por investigadores pertenecientes al grupo Casfor, asociación internacional conformada por instituciones académicas y de investigación (CASFOR II project; Masera *et al.*, 2003), para estudiar el flujo y almacenamiento de carbono en plantaciones forestales.

Este modelo, a través de su módulo biomasa, y para una especie y tratamiento silvícola dado, permite estimar el crecimiento y producción en volumen de biomasa y Carbono por unidad de área (Schelhaas *et al.*, 2004). En su versión 3.2 admite modelizar rodales coetáneos y disetáneos, de un solo estrato o multi-estratificados, el crecimiento del rodal, la competencia, la mortalidad, la dinámica del carbono en el

suelo, y las pérdidas de carbono en los productos madereros. Además, presenta un módulo de bioenergía, permite realizar análisis financieros de los proyectos, y tiene la capacidad de cuantificar el carbono en toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente, lo que permite evaluar su capacidad de reducción o cuantificar CO<sub>2</sub>eq en su forma de expresión como créditos de carbono. Sus resultados son presentados en unidades de masa de C a nivel de ha/año, separando los valores de carbono de la biomasa de los valores de carbono del suelo. La cantidad de créditos de carbono producidos está en relación directa a la cantidad de carbono secuestrado, siendo esta relación de un crédito expedido por tonelada de CO<sub>2</sub> atmosférico reducida o secuestrada como resultado del Plan de Manejo.

### **El modelo PlaForNea**

PlaForNEA es un simulador que permite estimar el crecimiento y producción a nivel rodal de las principales especies forestales implantadas en la Mesopotamia argentina, entre las que se encuentra *E. grandis* (Keller *et al.*, 2017). En dicha plataforma, es posible evaluar el rendimiento de estas especies a través de simulaciones en las que se permite modificar numerosas variables, como por ejemplo la rotación, calidad de sitio, la densidad inicial, la mortalidad estimada, los tratamientos intermedios, entre otras. A través de la misma, se obtuvieron los parámetros de plantaciones de *E. grandis* que fueron utilizados para la calibración del modelo *CO2 fix*.

### **Estimación de los de rendimientos**

Los rendimientos de volúmenes y de carbono total (carbono de biomasa más el carbono de suelo) de *E. grandis*, fueron obtenidos para todas las clases de sitio a partir de simulaciones realizadas en *CO2 fix*. La calibración del software fue realizada por Gonzalez Mesquida 2018, con datos estructurales del bosque y productividad tomados de estudios previos (Goya *et al.*, 1997, 2000;), y además con datos provenientes de la plataforma PlaForNea. De esta manera, se obtuvieron los valores

de productividad (en metros cúbicos) y de carbono total del sistema (en toneladas de carbono) para los 3 sitios.

### **Sistema silvícola**

Con el objetivo de no complejizar los modelos sobremanera, se consideró un mismo sistema silvícola para todos los casos y de acuerdo a las siguientes pautas: rotación mínima de 8 años, tala rasa con regeneración instantánea mediante plantación, una densidad inicial de 1.100 individuos por hectárea, una supervivencia del 95%, y cosecha sin quema de residuos.

### **Costos**

#### *Costos de regeneración*

Los costos de regeneración fueron tomados de Jaime (2003), y actualizados vía dolarización por comparación de tipos de cambio. Adicionalmente se consultó también la planilla de precios forestales del noreste de Entre Ríos (INTA EEA Concordia, 2020), y los valores actualizados de costos de plantación para la provincia de Entre Ríos de la Ley N° 25.080 y su prórroga Ley N° 27.487 (MPyT Nacional, 2019).

Con el objetivo de simplificar el análisis financiero, se consideraron como costos de regeneración a la sumatoria de todos los costos comprendidos entre los años 0 y 1, incluyendo la preparación del sitio, el costo de los plantines, la plantación y reposición de fallas (Jaime, 2003).

Para la actualización de dichos valores se realizó una “dolarización”, en la cual se asumió una tasa de interés implícita en la relación peso-dólar. Los valores del dólar en pesos argentinos para junio del 2003, según Jaime 2003, y para junio del 2020 (fecha considerada actual), se extrajeron de <http://www.billetesargentinos.com.ar/articulos/cotizacion.htm>. Asimismo, dicho valor se comparó y validó con los costos estipulados en la Resolución N° 138/2019 de la ley N°

25.080 y prórroga Ley N° 27.487, con fecha al 25 de julio del 2019, para regeneración en cultivos forestales en la provincia de Entre Ríos con densidades de plantación mayores a 950 individuos por hectárea (MPyT Nacional, 2019).

El **costo de regeneración** según el MPyT, se definió en \$37.740. Por otra parte, el costo según Jaime (2003), y actualizado vía dolarización fue de 40.265 \$/ha. En el presente trabajo se utilizó el valor actualizado de **40.265 \$/ha**.

#### *Costos administrativos e impositivos*

Los costos de administración se obtuvieron a partir del decreto N° 661 vinculado a la Ley provincial N° 8.672 de la provincia de Entre Ríos, en la que determinan las valuaciones de las parcelas rurales y la liquidación del impuesto inmobiliario rural para el período fiscal 2020 (MEHF de Entre Ríos, 2020). El **costo administrativo e impositivo** anual obtenido fue **\$2.733,6 \$/ha**.

#### **Precio de venta**

El precio de la madera en pie se extrajo de la planilla de precios forestales del INTA Concordia elaborada para junio del 2020 (INTA Concordia, 2020). Se consideró, para *E. grandis*, el valor de venta del monte en pie de más de 18 centímetros en punta fina. Para realizar la conversión de metros cúbicos a kilogramos, se utilizó la equivalencia sugerida en la misma fuente de  $1\text{m}^3\text{c}/\text{c}=900\text{ kg}$ . El **precio de venta** resultante, fue de **1.008\$/m<sup>3</sup>**.

#### **Tasa de interés y tasa de descuento**

Se entiende por tasa de interés al precio del dinero que se debe pagar o cobrar en el futuro por prestarlo o cederlo en el presente. Mientras que la tasa de descuento establece la relación entre el beneficio a futuro que generaría no consumir un bien en

el presente (Denegri, 2012), y frecuentemente se utiliza para calcular el valor actual del dinero. En otras palabras, ambas relaciones buscan estimar el valor más aproximado del dinero en el tiempo, sea en el futuro (tasa de interés), o sea en el presente (tasa de descuento).

Debido a las distorsiones causadas en todas las economías por la inflación, la deflación y otros fenómenos macroeconómicos, es menester utilizar una tasa de interés real a la hora de realizar las estimaciones económicas, en contraposición al uso de tasas nominales, que no discriminan el efecto producido por los fenómenos previamente mencionados (Denegri, 2012).

Definir la tasa de interés real puede ser una tarea complicada, por lo que resulta útil recurrir a valores de mercado, o bien a valores de referencia. Aunque la elección de una tasa de interés de referencia resulta crítica para la evaluación financiera de proyectos de inversión, el buen juicio y la realización de suposiciones también son necesarios (Buongiorno, 1987).

Para establecer el valor de la tasa de interés real, y la tasa de descuento real (cuyo valor es el mismo), se utilizó entonces el valor de referencia del 4% establecido por el USDA Forest Service, para proyectos e inversiones de largo plazo vinculados a recursos naturales (USDA Forest Service, 1984), más una unidad adicional incluida con el fin de amortiguar posibles diferencias con la economía local. La **tasa de interés** utilizada entonces, fue del **5%**.

### **Modelos de Programación Lineal (PL)**

La PL es una técnica idónea de optimización de uso generalizado, en investigación operativa. En sus orígenes, fue diseñada para resolver problemas administrativos complejos de diferentes campos, como por ejemplo la industria, la agricultura y el

gobierno, y desde la década de 1960 se han propuesto numerosas aplicaciones en el manejo forestal (Buongiorno, 2003). Se podría definir como un método para asignar recursos limitados a diferentes actividades que compiten por ellos, de una manera óptima, es decir, eligiendo la mejor alternativa posible). Todos los problemas de PL quedan definidos por:

- Una función objetivo, que busca maximizarse o minimizarse;
- Un conjunto de variables de decisión, que son el producto resultante de la optimización; y finalmente
- Un conjunto de restricciones, frecuentemente asociadas a limitaciones de los recursos implicados.

#### *Modelo general*

De los dos modelos de PL descritos por Clutter *et al.*, (1983) para resolver problemas a escala de UMF, en este trabajo se optó por el Modelo I, en adelante llamado modelo general o modelo de Clutter. Tres elementos son fundamentales para dicho Modelo. Primero, **los indicadores financieros**: El problema utiliza varios de ellos: Valor Potencial del Suelo (VPS); Valor Terminal de la Tierra (VTT); y Valor Actual Neto (VAN). Segundo, la noción de **régimen de manejo forestal**, es decir, cada arreglo diferente en el tiempo del conjunto de intervenciones silvícolas. Y tercero, el concepto de **unidad de corta**, que alude a la representación y clasificación del bosque. Entre las varias alternativas que repasa Clutter *et al.*, (1983) para representar los rodales en el modelo de optimización, en este trabajo se han conformado las Unidades de Corta (UC) combinando todos los rodales de la misma (clase de) edad, independientemente de su localización espacial. A las UC así conformadas se las suele denominar *estratos forestales* y en adelante las referiremos indistintamente.



El modelo I, entonces, busca maximizar el **VAN**, a partir de la mejor combinación de **regímenes de manejo** para cada **estrato forestal**, y para todo el horizonte de planificación. Su desarrollo general consiste en las siguientes etapas:

- A. Encontrar todos los regímenes de manejo posibles:** De acuerdo a características intrínsecas de la especie forestal dada (fundamentalmente rotación mínima y máxima) y al horizonte de planificación estipulado (cuanto más largo, más intervenciones tendrá el bosque, y por ende, más regímenes de manejo).
- B. Calcular el Valor Potencial del Suelo máximo (VPS), y el Valor Actual Neto (VAN) y el Valor Terminal de la tierra (VT) de cada régimen:** Una vez planteados los  $k$  regímenes, se calcula el VT y el VAN de cada uno.

$$VPS_r = R + (I_r - E_r) / [(1 + i)^r - 1] - \left(\frac{T}{i}\right)$$

$$VT_k = [INT_k + VPS_{max} + (T/i)] / (1 + i)^{a_k}$$

$$VAN_k = \sum_{j=1}^p \frac{IN_{jk} + EN_{jk}}{(1 + i)^{y_j}} + \frac{VT_k}{(1 + i)^n} - \left(\frac{T}{i}\right)$$

Donde:

VPS<sub>r</sub>: Valor potencial del suelo para la rotación  $r$

VT<sub>k</sub>: Valor terminal del régimen  $k$

VAN<sub>k</sub>: Valor actual neto del régimen  $k$

I<sub>r</sub>: Ingresos para la rotación  $r$ .

E<sub>r</sub>: Egresos para la rotación  $r$ .

R: costo de regeneración.

T: Costos anuales impositivos y de administración.

$i$ : Tasa de descuento.

$INT_k$ : Ingreso neto terminal para el régimen  $k$ .

$a$ : años hasta la cosecha terminal del rodal.

$IN_{jk}$ : Ingresos netos en el período  $j$  cuando el régimen  $k$  es usado.

$EN_j$ : Egresos netos en el período  $j$  cuando el régimen  $k$  es usado.

$Y_j$ : Número de años entre el comienzo del horizonte de planificación y la mitad del período  $j$ .

**C. Asignar la cantidad de superficie (en hectáreas) de cada estrato forestal a cada régimen de manejo, maximizando el VAN:** Finalmente, y a partir del algoritmo simplex, se encuentra la solución óptima al problema (asumiendo que existe), es decir, el número de hectáreas asignadas a cada uno de los  $k$  regímenes de manejo que en conjunto, maximizan las ganancias a obtener (en valores presentes), pero a su vez, considerando todas las restricciones dadas.

#### *Modelos específicos*

Con la intención de cumplir con los objetivos planteados en este estudio, al Modelo General se le realizaron modificaciones. De esta manera, se obtuvieron tres submodelos correspondientes a los diferentes escenarios planteados, que se muestran a continuación:

**Modelo específico 1. Irrestricto** (modelo específico correspondiente al ESC1): Consiste básicamente en el modelo general con una única restricción superficial (además de la no negatividad), por lo que se prioriza el beneficio económico. Este plan de manejo es el que arroja el valor máximo posible de VAN.

- **Función objetivo:** Maximizar la sumatoria de los valores actuales netos totales, obtenidos a partir del producto resultante entre el número de hectáreas asignadas a cada régimen  $X_{ik}$  y el VAN de cada régimen  $D_{ik}$ .

$$Q = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M D_{ik} X_{ik}$$

- **Variables de decisión:**  $X_{ik}$  es el número de hectáreas del estrato  $i$ , asignadas al régimen  $k$ .
- **Coefficientes de decisión:**  $D_{ik}$  es el VAN del estrato  $i$ , cuando el régimen  $k$  es usado.
- **Restricciones:** Existen 2 conjuntos de restricciones.
- **No negatividad:** Todas las variables de decisión deben ser mayor o igual que cero.

$$X_{ik} \geq 0$$

- **Superficie máxima:** La sumatoria de hectáreas asignadas a todos los regímenes de cada estrato forestal, debe ser igual que la superficie total de cada estrato.

Para cada estrato forestal  $i$ :

$$\sum_{k=1}^M X_{ik} = A_i$$

**Donde:**

$A_i$ : Número de hectáreas contenidas en el estrato  $i$ .

Para los subíndices utilizados arriba:

$$i = 1, 2, \dots, N$$

$$k = 1, 2, \dots, M$$

Donde N es el número de estratos forestales, y M es el número de regímenes definidos.

**Modelo específico 2. Económico** (modelo específico correspondiente al ESC2): Este modelo al igual que el modelo irrestricto busca maximizar los beneficios presentes totales, pero agregando estabilidad en las cosechas del plan de manejo. Entre otras cosas, asegura un volumen a cosechar contante a lo largo de todos los períodos y logra que el bosque alcance un estado ordenado. En términos matemáticos es igual al modelo irrestricto, pero se le agregan los siguientes conjuntos de restricciones:

- **Estructura final:** La estructura final del bosque debe ser igual a la del bosque completamente ordenado. Es decir, en el último período del horizonte de planificación la superficie de cada una de las clases de edad teóricas debe tener el mismo número de hectáreas. Esta restricción asegura que se liquide el superávit del bosque sin agotar las existencias al final del pan de manejo.

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M X_{ik} Y_{ijk} = \left( \sum_{i=1}^N A_i \right) / S$$

**Donde:**

S: representa el número de clases totales que posee el bosque ordenado teórico, que se calcula con la edad en que se maximiza el IMA (incremento medio anual).

$Y_{ijk}$ : coeficiente binario que debe ser igual a 1 si el régimen  $k$  aplicado al estrato forestal  $i$  en el período  $j$  indica regeneración; de lo contrario el coeficiente debe ser igual a 0.

$$j = p - S + 1, \dots, p - 1, p$$

El número de ecuaciones necesarias de este conjunto está indicado por  $S$  y para el subíndice  $j$  señalado,  $p$  es el último período del horizonte de planificación.

- **Armonización de volúmenes de cosecha:** Los volúmenes anuales cosechados deben ser relativamente constantes. Cada año se debe cosechar un volumen igual o menor que el año siguiente.

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M V_{ij-1k} X_{ik} \leq \sum_{i=2}^N \sum_{k=2}^M V_{ijk} X_{ik}$$

Donde:

$V_{ijk}$ : Volumen por hectárea cosechado de la unidad de corta  $i$  para el período  $j$ , cuando el régimen  $k$  es usado.

En este caso el subíndice para los períodos sería:

$$j = 2, 3, \dots, p$$

**Modelo específico 3. Carbono** (modelo específico correspondiente al ESC3): Es una alternativa al modelo económico que busca incrementar los niveles de carbono del sistema en detrimento de los beneficios presentes totales, manteniendo de igual manera los niveles de cosecha estables, y si bien no se condicionó la estructura final, la constancia en los volúmenes de cosecha tiende a normalizar los bosques a largo plazo y el estado final del bosque parcialmente ordenado.

- **Función objetivo:** Maximizar la sumatoria de los valores de carbono total, obtenidos a partir del producto resultante entre el número de hectáreas asignadas a cada régimen  $X_{ik}$  y el carbono total de cada régimen  $C_{ik}$ . El valor obtenido es el NCA del escenario.

$$Q = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M C_{ik} X_{ik}$$

- **Variables de decisión:** Quedan definidas de la misma forma que el modelo anterior.
- **Coefficientes de decisión:**  $C_{ik}$  es el valor de carbono total (NCA) del estrato  $i$ , para el régimen de manejo  $k$ .
- **Restricciones:** Existen 5 conjuntos de restricciones.
- **No negatividad:** Todas las variables de decisión deben ser mayor o igual que cero.

$$X_{ik} \geq 0$$

- **Superficie máxima:** La sumatoria de hectáreas asignadas a todos los regímenes de cada estrato forestal, debe ser igual que la superficie total de cada estrato.

$$\sum_{k=1}^M X_{ik} = A_i$$

- **Restricción económica:** Para que este plan de manejo sea completo, y considerando que ahora la función objetivo no buscará maximizar los beneficios económicos actuales, sino que tratará de encontrar la maximización del carbono del sistema, es necesario someterlo a una restricción económica. Existen varias alternativas directas e indirectas para pensar esta restricción. En este caso se optó por requerir que la solución represente un desempeño económico igual al 90% del VAN obtenido en el modelo económico armonizado, considerando de manera arbitraria que el administrador forestal decidió sacrificar 10% de las ganancias actuales en pos de incrementar los niveles de carbono del sistema, o bien como inversión frente a una posible venta de créditos de carbono.

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M D_{ik} X_{ik} = 0,9 \left( \sum_{i'=1}^{N'} \sum_{k'=1}^{M'} D'_{i'k'} X'_{i'k'} \right)$$

Donde el lado derecho de la ecuación representa el valor de la función objetivo del modelo económico.

- **Armonización de volúmenes de cosecha:** Restricción definida igual que el modelo anterior.
- **Volumen de cosecha anual:** Los volúmenes cosechados anualmente además, no deben exceder la posibilidad teórica máxima para asegurar el recurso y no agotar el bosque.

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M V_{ijk} X_{ik} = P$$

Una vez desarrollados los diferentes modelos del problema que representan todos los escenarios descritos, estos fueron resueltos con el software libre Open Solver, un complemento para Microsoft Excel capaz de resolver problemas de programación lineal, entera y no lineal con un elevado número de variables (Mason, 2012).

### Indicadores de desempeño

Para comparar los diferentes modelos se utilizaron 5 indicadores de desempeño general, 3 de ellos cuantitativos y 2 cualitativos. A saber:

#### *Cuantitativos*

- **VAN (en millones de pesos argentinos):** Para realizar las comparaciones de las diferentes alternativas se utilizó el Valor Actual Neto (VAN) como indicador financiero. El VAN constituye el valor presente de los flujos de fondos futuros originados por el proyecto, descontados a una tasa de interés de referencia (Rosbaco, 1988).
- **VTC durante el transcurso del plan (en millones de metros cúbicos):** Este valor expresa todo el volumen cosechado por cada modelo, en el transcurso de los 30 años que dura el horizonte de planificación.
- **NCA (en millones de toneladas de carbono elemental):** Este valor se obtuvo sumando el carbono removido y almacenado por la UMF en cada uno de los períodos, con el objetivo de comparar el NCA de los diferentes escenarios. Como se mencionó

anteriormente, este indicador cuantifica numerosas veces los mismos valores de carbono, por lo que no debe ser utilizado como base para el cálculo de créditos de carbono, sino únicamente para evaluar qué escenario fue el más productivo en términos de remoción de dióxido de carbono. Para ver los créditos de carbono generados por cada escenario por período, ver “créditos generados por el bosque para todos los períodos”, en el apartado siguiente.

#### *Cualitativos*

- **Estructura final del bosque:** Expresa si el bosque al final del plan de manejo
  - Se agota;
  - Se ordena parcialmente; o bien
  - Se ordena completamente.
- **Estabilidad económica del plan:** Debido a numerosas razones, expuestas entre otros por Davis & Johnson (1987), es deseable que el bosque siga un patrón estable de cosechas en el tiempo. En este estudio, se consideró un escenario económicamente estable cuando el volumen entregado por el mismo resultó constante en el tiempo.

#### *Otros productos de la optimización*

Además de los indicadores generales expuestos, los resultados de la optimización incluyeron indicadores adicionales que permitieron hacer una lectura más acabada de los diferentes escenarios. Los mismos fueron adjuntados en el anexo I, y son los siguientes:

- **Volumen Cosechado por Período (VCP, en metros cúbicos):** Expresa el volumen de madera generada por período por escenario.
- **Superficie Cosechada por Período (SCP, en hectáreas):** Representa las hectáreas totales cosechadas por período por escenario.



- **Créditos generados por el bosque para todos los períodos (en tCO<sub>2</sub>eq):** Es la cantidad de créditos de carbono generados por período para todos los escenarios. Como las metodologías de evaluación de los niveles de carbono difieren para cada estándar y/o mecanismo, se optó por expresar los créditos generados para todos los años del horizonte de planificación. Es importante mencionar en este punto que en aquellos planes en los que el bosque se ordena parcial o completamente, el nivel de carbono (al igual que el volumen a cosechar anualmente) tenderá a alcanzar un valor anual estable.
- **Calendario de cosechas:** Es una tabla que indica, para cada escenario y para todo el horizonte de planificación, cuantas hectáreas de cada estrato forestal inicial hay que cosechar por período. Básicamente consiste en una hoja de ruta que tiene el fin de servirle al administrador forestal como guía de planificación. A lo largo de todo el plan, la superficie perteneciente a cada uno de los estratos será sometida a diferentes turnos de corta (proceso supeditado a la solución óptima), por lo que la superficie vinculada a cada uno de los estratos iniciales, casi con seguridad al finalizar el horizonte de planificación (y también durante la conversión parcial o total del bosque en la mayoría de los casos) contendrá más de una clase de edad. Es por esto que la lectura del calendario de cosechas debe hacerse en conjunto con la tabla de estructura del bosque.
- **Estructura del bosque a lo largo del horizonte de planificación:** La dinámica de la estructura del bosque fue representada a lo largo del horizonte de planificación en superficies por clases de edad, y en existencias volumétricas por clases de edad.

## RESULTADOS

### La UMF como bosque ordenado

Los valores del bosque ordenado teórico, proyectado para las 3 clases de sitio propuestas, se pueden ver en la Tabla 2. Para los IS 25 y 30, el IMA máximo se encontró a los 9 años, y para el IS 20, a los 11 años. Asimismo, el ICA igualó al IMA, y el VPS presentó su valor máximo en estas edades, respectivamente. La rotación elegida entonces para desarrollar los parámetros del bosque ordenado, fue de 9 años para los índices de sitio 25 y 30; y de 11 años para el índice de sitio 20.

		IS20	IS25	IS30
Superficie total	hectáreas	2448	2448	2448
Posibilidad anual	m <sup>3</sup> /año	26650	41142	60593
Superficie por clase bosque ordenado	hectáreas	223	272	272
Clases de edad de bosque ordenado	n°	11	9	9
IMA <sub>máx</sub>	m <sup>3</sup> /ha/año	10,9	16,8	24,7
R	años	11	9	9

Tabla 2. Bosque ordenado objetivo para todos los índices de sitio

### Optimización de los escenarios

Los valores de los indicadores obtenidos como resultado de la optimización de los escenarios se pueden ver en la Tabla 3. En la misma se puede observar que independientemente de la calidad de sitio, los valores máximos de VAN y de VTC siempre se correspondieron con el submodelo irrestricto, después le siguió el submodelo económico, y finalmente, el submodelo carbono. Por otro lado, con los NCA ocurrió exactamente lo contrario. De todas maneras, aunque esta tendencia se mantuvo para todas las calidades de sitio, los valores no resultaron proporcionales.

Calidad de sitio	Indicador		Escenario		
			Irrestringido	Económico	Carbono
			ESC1.1	ESC2.1	ESC3.1
IS 20	VTC	m <sup>3</sup> x10 <sup>6</sup>	0,99	0,84	0,75
	VAN total	ARS x10 <sup>6</sup>	345,7	317,8	286,0
	NCA	tC x10 <sup>6</sup>	0,54	0,56	0,61
	Estructura final		Se agota	Se ordena	Se ordena parcialmente
	Plan económicamente armónico		no	si	si
			ESC1.2	ESC2.2	ESC3.2
IS 25	VTC	m <sup>3</sup> x10 <sup>6</sup>	1,53	1,23	1,11
	VAN total	ARS x10 <sup>6</sup>	612,1	522,8	470,6
	NCA	tC x10 <sup>6</sup>	2,34	2,99	3,45
	Estructura final		Se agota	Se ordena	Se ordena parcialmente
	Plan económicamente armónico		no	si	si
			ESC1.3	ESC2.3	ESC3.3
IS 30	VTC	m <sup>3</sup> x10 <sup>6</sup>	2,24	1,90	1,70
	VAN total	ARS x10 <sup>6</sup>	975,7	845,1	760,6
	NCA	tC x10 <sup>6</sup>	3,19	3,74	4,21
	Estructura final		Se agota	Se ordena	Se ordena parcialmente
	Plan económicamente armónico		no	si	si

*Tabla 3. Resultados de la optimización de los escenarios*

Con respecto a la estructura final de la UMF, y para los tres índices de sitio, los escenarios del submodelo irrestringido se agotaron y carecieron de una dinámica financiera estable; los escenarios del submodelo económico se ordenaron completamente al fin del horizonte de planificación y entregaron volúmenes constantes de madera en todos los períodos (siempre la misma cantidad); y los escenarios del submodelo carbono se ordenaron parcialmente y entregaron volúmenes constantes de manera en todos los períodos (aunque no siempre la misma cantidad).

### **Variación entre escenarios**

En la Tabla 4 podemos ver en términos porcentuales, y en sentido unidireccional, las fluctuaciones de los indicadores cuantitativos para los diferentes escenarios. Es decir, cuáles fueron las ganancias y las pérdidas de optar por el escenario económico en lugar del irrestringido, y por optar entre el escenario carbono en lugar del económico. Entre otras cosas, quedó en evidencia el “costo” de estabilizar económicamente el plan de manejo, es decir, pasar del escenario irrestringido al económico. Este sacrificio, representó un 14,5; 19,4 y 15% del VAN total generado por el modelo irrestringido, para los índices de sitio 20, 25 y 30, respectivamente. Por otro lado, se puede ver que este

cambio a un escenario más estable desde el punto de vista financiero, también trajo aparejado incrementos sustanciales en el carbono total removido por el sistema, presentando la ganancia máxima de 27,7% en el IS25 (es decir, optando por el ESC2.2 en lugar del ESC2.1). La misma tendencia se evidenció al pasar del escenario económico al escenario carbono, aunque recordemos que, en este caso, la disminución del 10% del VAN fue forzada como restricción, con el objetivo de maximizar los NCA. Los incrementos en los niveles de carbono fueron del 8,1, 15,5 y 12,5%, para los índices 20, 25 y 30 respectivamente, lo que se puede interpretar como la contraprestación ambiental de sacrificar el 10% de las ganancias potenciales. Esto visto desde otra óptica, se puede interpretar como el costo de generación del servicio ecosistémico para cada índice de sitio.

Calidad de sitio	Indicador		Escenario	
			Irrestringido-Económico	Económico-Carbono
			ESC1.1 a ESC2.1	ESC2.1 a ESC3.1
IS 20	VTC	%	-14,5	-11,0
	VAN total	%	-8,1	-10,0
	NCA	%	3,4	8,1
			ESC1.2 a ESC2.2	ESC2.2 a ESC3.2
IS 25	VTC	%	-19,4	-10,1
	VAN total	%	-14,6	-10,0
	NCA	%	27,7	15,5
			ESC1.3 a ESC2.3	ESC2.3 a ESC3.3
IS 30	VTC	%	-15,0	-10,7
	VAN total	%	-13,4	-10,0
	NCA	%	17,3	12,5

*Tabla 4. Diferencias porcentuales de los indicadores entre escenarios*

Por otra parte, la evolución de los indicadores para todos los períodos, y para los tres escenarios de base, mostró un patrón semejante en los 3 IS estudiados. En la Tabla 5, se puede ver dicha evolución para el IS25, mientras que para los otros IS, se optó no colocar la evolución de los indicadores debido a que solo agregarían información específica.

Periodo	Año calendario	Irrestringido (ESC 1.2)			Económico (ESC 2.2)			Carbono (ESC 3.2)		
		SCP	VCP	Créditos de carbono	SCP	VCP	Créditos de carbono	SCP	VCP	Créditos de carbono
		ha	(m3 x10 <sup>3</sup> )	tC <sub>eq</sub> x10 <sup>3</sup>	ha	(m3 x10 <sup>3</sup> )	tC <sub>eq</sub> x10 <sup>3</sup>	ha	(m3 x10 <sup>3</sup> )	tC <sub>eq</sub> x10 <sup>3</sup>
PER1	2021	919,0	198,2	414,1	166,4	41,1	414,1	143,6	35,7	414,1
PER2	2022	275,8	46,3	261,7	169,3	41,1	417,0	145,8	35,7	422,3
PER3	2023	288,9	46,5	224,4	172,8	41,1	413,8	147,5	35,7	425,3
PER4	2024	315,1	47,7	208,8	172,9	41,1	408,1	148,6	35,7	425,9
PER5	2025	0,0	0,0	202,6	176,9	41,1	402,6	146,8	35,7	426,3
PER6	2026	0,0	0,0	242,3	185,1	41,1	397,3	150,3	35,7	426,6
PER7	2027	309,2	52,9	297,4	181,0	41,1	392,5	154,6	35,7	427,1
PER8	2028	103,4	17,4	303,3	181,6	41,1	387,3	150,2	35,7	427,0
PER9	2029	225,8	37,9	326,2	184,3	41,1	382,8	149,9	35,7	426,9
PER10	2030	11,4	1,9	332,7	179,7	41,1	378,2	149,4	35,7	426,6
PER11	2031	919,0	154,3	369,5	182,3	41,1	373,9	150,2	35,7	426,3
PER12	2032	564,7	90,0	268,8	180,8	41,1	370,1	145,1	35,7	425,7
PER13	2033	315,1	47,7	189,8	184,3	41,1	366,5	146,9	35,7	425,2
PER14	2034	0,0	0,0	159,9	185,1	41,1	363,2	145,1	35,7	425,0
PER15	2035	0,0	0,0	195,0	191,8	41,1	360,3	144,8	35,7	424,7
PER16	2036	0,0	0,0	251,5	193,0	41,1	357,6	145,1	35,7	425,0
PER17	2037	0,0	0,0	312,2	194,0	41,1	354,8	146,0	35,7	424,7
PER18	2038	309,2	56,5	369,2	195,1	41,1	352,0	147,3	35,7	425,5
PER19	2039	329,2	56,8	366,8	196,1	41,1	349,4	147,4	35,7	425,7
PER20	2040	11,4	1,9	346,1	196,6	41,1	346,9	147,4	35,7	425,8
PER21	2041	1483,6	239,7	372,7	198,2	41,1	344,5	147,3	35,7	425,9
PER22	2042	315,1	47,7	188,6	199,3	41,1	342,3	147,3	35,7	425,9
PER23	2043	0,0	0,0	123,4	200,5	41,1	340,2	147,2	35,7	425,9
PER24	2044	0,0	0,0	146,4	201,6	41,1	338,2	169,8	41,1	425,9
PER25	2045	0,0	0,0	203,5	202,8	41,1	336,3	170,4	41,1	420,6
PER26	2046	0,0	0,0	267,0	204,0	41,1	334,5	171,1	41,1	414,3
PER27	2047	0,0	0,0	328,0	205,1	41,1	332,7	171,9	41,1	408,2
PER28	2048	0,0	0,0	383,3	206,0	41,1	331,0	173,4	41,1	402,3
PER29	2049	0,0	0,0	433,8	206,7	41,1	329,4	174,7	41,1	396,9
PER30	2050	2448,4	388,9	480,1	207,5	41,1	327,9	175,9	41,1	391,9

Tabla 5. Dinámica de los indicadores a lo largo de los períodos, para el IS25

Las dinámicas generadas por los diferentes escenarios, se pueden ver de manera más gráfica en las figuras 2, 3 y 4. Donde los indicadores ponen en evidencia la estabilidad de los escenarios 2 y 3, ausente en el escenario 1.

Las superficies y los volúmenes cosechados por período (figura 4 y 5, respectivamente), de los escenarios 2 y 3, resultaron similares. La diferencia entre estos, radicó en que el escenario carbono redujo el volumen a cosechar en 5.400 m<sup>3</sup> de madera por período, hasta el período 24, cuando retomó los 41.100 m<sup>3</sup> cosechados por el modelo económico para todos los períodos. Esta merma en las cosechas fue la que hizo posible los incrementos en los niveles de carbono del escenario 3, mostrados en este caso para el IS25, pero evidenciado por igual en todos los IS.

La evolución del carbono en el tiempo (figura 2), en cambio, mostró diferencias bien marcadas entre los diferentes escenarios. En todos los casos, los primeros períodos generaron más carbono que los últimos, debido a un superávit del volumen de madera existente en la estructura inicial de la UMF. Y a medida que nos acercamos al final del horizonte de planificación, la cantidad de créditos generados se fue haciendo cada vez más estable, debido a que el bosque tendió a alcanzar el estado ordenado, exceptuando el escenario irrestricto. Algo similar ocurrió con la superficie cosechada por período, que resultó menos intensa los primeros años debido a la sobrerrepresentación de las clases de edad maduras con existencias elevadas.

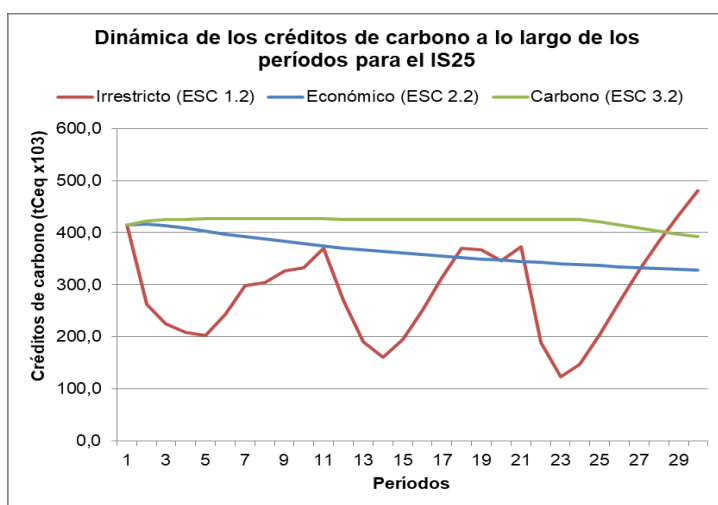


Figura 2. Créditos de carbono por período y por escenario, para el IS25.

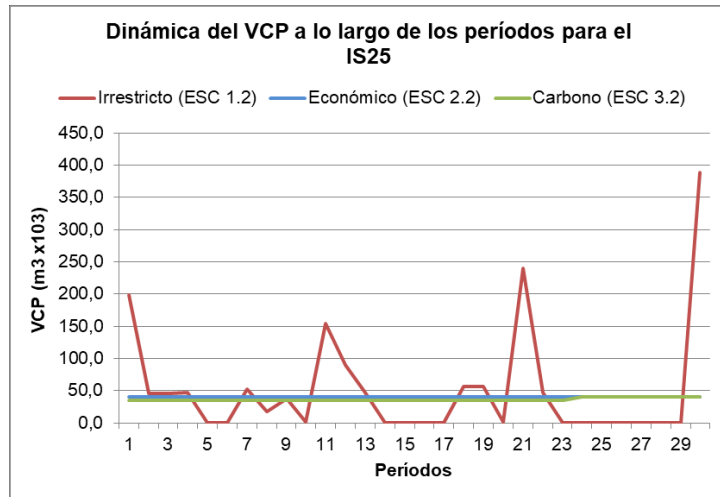


Figura 3. Volumen total cosechado por período y por escenario, para el IS25.

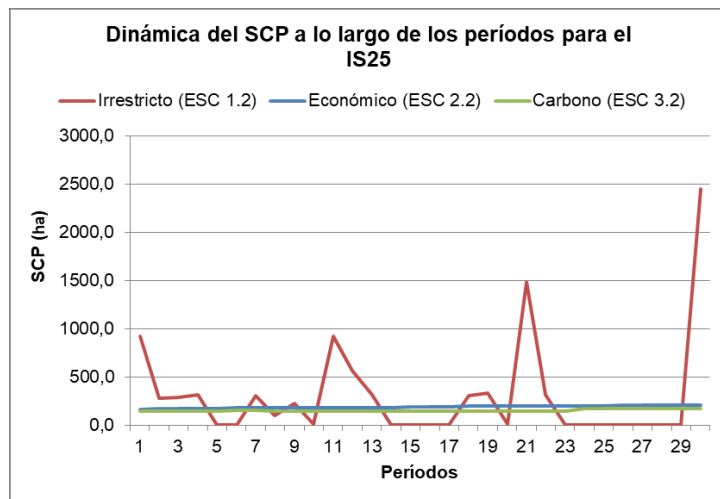


Figura 4. Superficie cosechada por período y por escenario, para el IS25.

Finalmente, las siguientes figuras muestran la estructura de la UMF, representada en existencias volumétricas (figura 5) y superficie (figura 6) por clases de edad. Al igual que la tabla 5, solo se muestra la información del IS25, y para dos períodos diferentes del horizonte de planificación, el punto medio y el final del mismo.

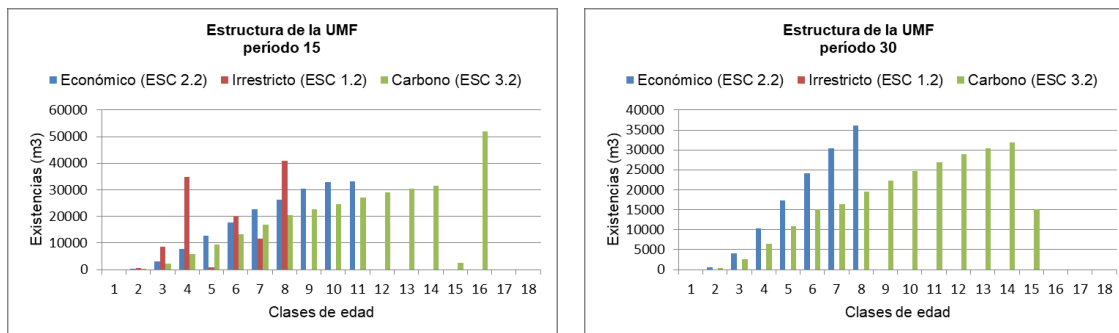


Figura 5. Estructura de la UMF: existencias volumétricas por clases de edad para dos períodos diferentes del horizonte de planificación y para los escenarios del IS25.

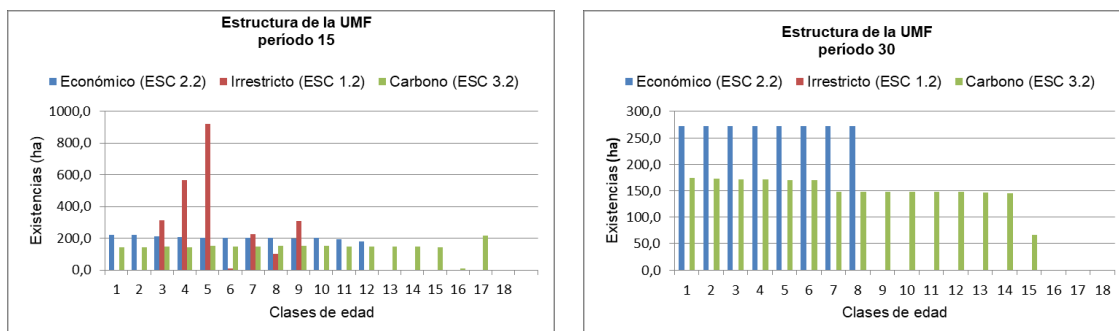


Figura 6. Estructura de la UMF: superficies por clases de edad para dos períodos diferentes del horizonte de planificación y para los escenarios del IS25.

Los escenarios económico y carbono, a lo largo del plan, evidenciaron estructuras en proceso de cambio hacia el estado ordenado, así como una estructura ordenada o parcialmente ordenada al fin del mismo, tendencia que se repitió en todos los IS. Por otro lado, el modelo irrestricto mostró una estructura irregular en todos los períodos, y al finalizar el horizonte de planificación, siempre liquidó todas las existencias.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES FINALES

### Sobre los escenarios...

A pesar de que optar por el escenario económico en lugar del irrestricto implicó un incremento del NCA removido, es cierto también que en la realidad, los propietarios forestales ya tienden a pagar el costo de la estabilidad en mayor o menor medida. Entonces, se sugiere que el escenario económico debería ser la línea de base del estudio, y no el modelo irrestricto. En cambio, una alternativa interesante sería evaluar



los incrementos de carbono generados por un escenario económico ordenado vía PL, *versus* el carbono generado por un escenario económico no optimizado.

Con respecto al escenario carbono, si bien es cierto que evidenció incrementos sustanciales en los NCA removido, también es cierto que, al estar acotado el ordenamiento a los 30 años del horizonte de planificación, y con el objetivo de cumplir todas las restricciones dadas, el algoritmo puede llegar a dejar una estructura final de la UMF indeseable. En otras palabras, al modelo no le importará lo que suceda después del horizonte de planificación. Esto vuelve sumamente importante el criterio del gestor a la hora de elegir un escenario determinado, y el análisis de la estructura y dinámica del bosque a lo largo del horizonte de planificación. En virtud de lo comentado, se recomienda enfocar también el desarrollo de los modelos hacia la estructura final deseada, y no solo tener en cuenta el resultado de la optimización en el intervalo de tiempo preestablecido.

Es probable, además, que el modelo general de Clutter, que fue la base de todos los submodelos utilizados en este trabajo, no sea la mejor alternativa para incrementar los niveles de carbono del sistema. Su vinculación tan estrecha al VAN, hace que sea idóneo para evaluar modelos de corte productivista y para analizar alternativas de inversión forestales, pero lo vuelven poco versátil a la hora de salir de este terreno. Recordemos que el submodelo carbono, adaptado de este modelo general, buscó maximizar los niveles absolutos de carbono, pero bajo la condición de sostener el 90% del VAN generado por el modelo económico. Sería interesante entonces, pensar y desarrollar otro modelo de PL desde la raíz, sin contemplar el indicador financiero VAN, sino que esté basado únicamente en las existencias y en la estructura de la UMF. Es decir, un modelo que maximice la corta de un volumen periódico de madera (indicador económico indirecto), que lo mantenga constante en el tiempo (estabilidad financiera), y que lo haga teniendo en cuenta la estructura deseada, presente y futura del bosque (con elevados niveles de biomasa y carbono). De esta manera además, se

evitarían todas las especulaciones financieras en torno a los parámetros de esta índole, como por ejemplo la correcta selección de una tasa de interés adecuada, y los efectos del proceso inflacionario.

Finalmente, no se puede evitar mencionar que todos los modelos se mantuvieron sencillos. En un estudio posterior, sería sumamente interesante incorporar regímenes silvícolas alternativos, considerar raleos, agregar una edad máxima de rotación (de acuerdo a necesidades dimensionales de mercado fundamentalmente), discriminar a la UMF de acuerdo a diferentes calidades de sitio, y finalmente, incluir un método que integre de manera más dinámica el carbono del suelo.

### **Sobre el carbono como servicio ambiental...**

Ya mencionamos que los escenarios económico y carbono incrementaron los NCA de la UMF, y que la dinámica de este elemento se vio representada por los créditos de carbono generados por período (Tabla 5 y Figura 2). Las preguntas que surgen inmediatamente al ver los resultados son: ¿este incremento fue el esperado y/o resultó satisfactorio? ¿Qué nivel de referencia deberíamos utilizar? Los niveles de carbono no aumentaron de manera lineal (en virtud del VAN sacrificado) sino que superaron la proporcionalidad. *A priori*, esto parecería sumamente interesante, pero habría que analizarlo con mayor detalle. Además, haría falta contemplar cuánto estaría dispuesto a pagar el tenedor de la tierra en pos de aumentar el servicio ambiental generado por la UMF, y considerar si estaría dispuesto a sacrificar ganancias en virtud de un servicio del que se beneficiaría la humanidad toda. Por otro lado, y sin entrar en el debate sobre la eficacia de los créditos de carbono forestales como herramienta para mitigar el cambio climático, y evaluando los mismos desde un análisis estrictamente financiero, ¿le será conveniente aplicar a una certificación para vender créditos en el mercado voluntario? ¿Esto le permitirá recuperar el 10% del VAN sacrificado, o inclusive generar ganancias por encima de ese nivel? Sí así fuera, ¿Podría invertir

más del 10% del VAN para generar más carbono? Todas estas preguntas ameritan un estudio posterior que analice el comportamiento de los propietarios forestales, y las posibilidades del mercado voluntario de carbono, como por ejemplo el precio de venta de la tonelada de CO<sub>2</sub> y su comparación con el precio de venta de la madera, demanda nacional e internacional de créditos, costos de certificación, entre otras.

### **Sobre la PL...**

La manera en que el algoritmo asigna las existencias volumétricas para incrementar los niveles de carbono es sumamente compleja e imposible de realizar manualmente. Lo que convierte a la PL en una poderosa herramienta a la hora de diagramar soluciones para horizontes de planificación largos en la UMF. Esta técnica, además, ha demostrado ser de utilidad para resolver problemas forestales complejos vinculados a la industria, la planificación de caminos forestales, manejo del fuego, la conservación de la biodiversidad y mucho más.

### **En conclusión**

Dos conceptos generales se desprenden de este trabajo:

El primero sugiere que, si bien el modelo es susceptible de ser mejorado y complejizado desde varias aristas, la PL resultó una herramienta realmente poderosa a la hora de definir un horizonte de planificación acotado a los objetivos preestablecidos por los diferentes escenarios, siendo incluso capaz de ordenar un bosque con una estructura inicial compleja. Estas cualidades, convierten dicha herramienta en un insumo valioso en la toma de decisiones a escala UMF.

El segundo es que, a partir de los modelos evaluados, siempre que se quiera maximizar la remoción de carbono por parte del ecosistema sin considerar su posible valor de mercado, será necesariamente en detrimento de un porcentaje de los

beneficios económicos obtenibles por la producción de madera. Un escenario de análisis diferente podría establecerse valorando financieramente los certificados de reducción de emisiones de dióxido de carbono, cuya venta permitiría compensar esta merma económica.

## BIBLIOGRAFÍA

**Baral H., Guariguata M.R. & R. Keenan.** 2016. A proposed framework for assessing ecosystem goods and services from planted forests. *Ecosystem Services* 22: 260-268.

**Bernhard-Reversat F.** 2001. Effect of exotic tree plantations on plant diversity and biological soil fertility in the Congo savanna: with special reference to eucalypts. Center for International Forestry Research, Bogor, Indonesia, 71 pp.

**Bettinger P., Boston K., Siry J.P. & Grebner D.L.** 2009. *Forest Management and Planning*. Academic Press, San Diego, EUA: 331 pp.

**Bilenca D. & F. Miñarro.** 2004. Identificación de Áreas Valiosas de Pastizal (AVPs) en las Pampas y Campos de Argentina, Uruguay y sur de Brasil. Fundación Vida Silvestre Argentina, Buenos Aires: 323 p.

**Black-Arbeláez, T., Acosta Aguilar, Y., Caycedo J.C.,** 2005. Instrumentos Económicos y Medio Ambiente. Volumen 5, nº1. Centro Andino para la Economía en el Medio Ambiente, pp. 8, URL <http://www.andeancenter.com>.

**Boscolo M. & J. Buongiorno.** 1997. Managing a tropical rainforest for timber, carbon storage and tree diversity. *Commonwealth Forestry Review* 76 (4): 246-254.

**Brockhoff E.G., Jactel H., Parrotta J.A., Quine C.P., Sayer J.** 2008. Plantation forests and biodiversity: oxímoron or opportunity? *Springer Science*. 17:925–951.

**Brown, S., Sathaye, J., Cannell, M., Kauppi, P., Burschel, P., Grainger, A., Heuvelink, J., Leemans, R., Moura Costa P., Pinard, M., Nilsson, S., Schopfhauser, W., Sedjo, R., Singh, N., Trexler, M., van Minnen, J., Meyers, S.,** 1996. Management of forests for mitigation of greenhouse gas emissions. In: Watson, R.T., Zonyowera, M.C., Moss, R.H. (Eds.), *Climate Change 1995 Impacts, Adaptations, and Mitigation of Climate Change: Scientific–Technical Analyses*. IPCC/Cambridge University Press, IPCC, USA: 775–794.

**Broz D., Durand G., Rossit D., Tohmé F. & M. Frutos.** 2016. Strategic planning in a forest supply chain: a multigoal and multiproduct approach. *Canadian Journal of Forest Research* 47(3): 297-307.

**Buongiorno J. & K. Gilles.** 2003. *Decision methods for forest resource management*. Academic Press, San Diego, EUA: 439 pp.

**Buongiorno J. & K. Gilles** 1987. *Forest management and economics: a primer in quantitative methods*. Mac Millan, NY 285 pp.

**Calniquer, Marcelo.** 2021. Billetes argentinos. URL <http://billetesargentinos.com.ar>  
Último acceso: mayo de 2021.

**Clutter, J.L., Fortson, J.C., Pienaar, L., Brister, G.H. & R.L Bailey.** 1983. *Timber Management: A Quantitative Approach*. J. Wiley and Sons ed.: 333 pp.

**Davis, L., Johnson, N. Bettinger P. & T. Howard.** 2001. *Forest Management. To Sustain Ecological, Economic and Social Values*. Waveland Press. INC, Long Grove, Illinois: 802 pp.

**Davis & Johnson.** 1986. *Forest Management. (Third Edition)* (New York, US: McGraw-Hill Book Company).

**Decreto 661 de 2020 [Ministerio de Economía, Hacienda y Finanzas de Entre Ríos].** 2020. Las disposiciones de la ley N° 8672 en lo atinante a la determinación de las valuaciones de las parcelas rurales y la liquidación del Impuesto Inmobiliario Rural para el período fiscal 2020. 11 de mayo de 2020.

**Denegri, G.** 2012. Matemática financiera: descuento, capitalización e interés. Documento de cátedra. FCAyF UNLP. 3 pp.

**González Mesquida, JB.** 2018. Parametrización del modelo de simulación *CO2Fix* para la evaluación de la dinámica del Carbono en plantaciones *Eucalyptus grandis* del NE de Entre Ríos. Informe inédito. FCAyF UNLP. 22 pp.

**Goya J.F., Frangi J.L., Denegri G., Larocca F.** 2009. Simulación del impacto de diferentes regímenes de cosecha sobre el capital de nutrientes e indicadores económicos en plantaciones de *Eucalyptus grandis* del NE de Entre Ríos, Argentina. *AUGMDOMUS* 1:1-17.

**Goya J., Frangi J., Dalla Tea F., Marco M. A. y Larocca F.,** 1997. Biomasa, productividad y contenido de nutrientes en plantaciones de *Eucalyptus grandis* en el NE de la provincia de Entre Ríos. XII Jornadas Forestales de Entre Ríos: III\_1-III\_19.

**Gullison R.E.** **Does forest certification conserve biodiversity?** 2003. *Oryx* 37(2):153–165.

**INTA Concordia.** 2020. Planilla de precios forestales – Zona NE de Entre Ríos (15 de junio de 2020). Año XXI N°553.

**Jaime, S.** 2003. Costos de producción y análisis financiero para eucaliptus en el nordeste de Entre Ríos. EEA INTA Concordia Area Forestales; Dirección de silvicultura y Montes Nativos de la Secretaría de la Producción de la Provincia de Entre Ríos.

**Johnson, K.N.; Scheurman, H.L.** 1977. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives- discussion and synthesis. For. Sci. Monograph 18.

**Kangas A., Kangas J. & M. Kurttila.** 2008. Decision support for forest management. Springer Science + Business Media BV: 222 pp.

**Kanowski P, Murray H.** 2008. Intensively Managed Planted Forests Toward best practice. TFD Review. *The Forests Dialogue*. 64 pp.

**Keleş S. & E.Z. Başkent.** 2007. Modelling and analyzing timber production and carbon sequestration values of forest ecosystems: a case study. *Polish Journal of Environmental Studies* 16 (3):473-479.

**Keller, A.E; Crechi, E.H; Fassola, H.E; Colcombet, L; Barth, S.R; Winck, R.A; Di Rienzo, J.** 2017. PlaForNEA, Plataforma de Gestión Forestal. INTA EEA Montecarlo. URL <http://www.plafornea.com.ar> Último acceso: marzo de 2021.

**Klooster, D.** 2010. Standardizing sustainable development? The Forest Stewardship Council's plantation policy review process as neoliberal environmental governance *Geoforum* 41(1):117–129.

**Masera, O., Garza-Caligaris, J.F., Kanninen, M., Karjalainen, T., Liski, J., Nabuurs, G.J., Pussinen, A. & de Jong, B.J.** 2003. Modeling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: the CO2FIX V.2 approach. *Ecological Modelling* 164: 177-199.

**Mason, A.J.** 2012. "OpenSolver – An Open Source Add-in to Solve Linear and Integer Programmes in Excel", *Operations Research Proceedings 2011*, eds. Klatte, Diethard, Lüthi, Hans-Jakob, Schmedders, Karl, Springer Berlin Heidelberg

pp 401-406, 2012, [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-29210-1\\_64](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-29210-1_64), URL <http://opensolver.org> Último acceso: mayo de 2021.

**Michaelowa A. & Stronzik M.** 2002. Transaction costs of the Kyoto Mechanisms. Hamburg Institute of International Economics, HWWA discussion paper 175.

**Ministerio de Asuntos Agrarios de la Provincia de Buenos Aires.** 2011. Inventario de macizos forestales de *Eucalyptus globulus* Labill. En el Sudeste de la Provincia de Buenos Aires. 30 pp.

**Raymer A.K., Gobakken T. & B. Solberg.** 2011. Optimal forest management with carbon benefits included. *Silva Fennica* 45(3): 395–414.

**Resolución 138 de 2019 [Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca del Ministerio de Producción y Trabajo].** 2019. Apruébanse a los fines exclusivos de la aplicación de la Ley N° 25.080 de Inversiones para Bosques Cultivados modificada por su similar N° 27.487 y sus normas complementarias, los costos de implantación y tratamientos silviculturales, según se detallan en el Anexo que, registrado con el N° IF-2019-57640915-APN-DNDFI#MPYT, forma parte integrante de la presente resolución. 25 de julio de 2019.

**Roise J.P., Harnish K., Mohan M., Scolforo H., Chung J., Kanieski B., Catts G.P., McCarter J.B., Posse J. & T. Shen.** 2016. Valuation and production possibilities on a working forest using multi-objective programming, woodstock, timber NPV, and carbon storage and sequestration. *Scandinavian Journal of Forest Research*, DOI: 10.1080/02827581.2016.1220617.

**Rosbaco, J. A.** 1988. Evaluación de Proyectos. Ed. Universitaria de Buenos Aires: 237.



**Sandoval D.M., Escoda M.E., Serra C.** 2019. Actualización de cartografía temática y determinación de volumen de plantaciones de *Eucalyptus grandis* próximas al turno en el establecimiento YBURATY S.A., Entre Ríos. Informe inédito xx pp

**Schelhaas M.J., van Esch P.W., Groen T.A., de Jong B.H.J., Kanninen M., Liski J., Masera O., Mohren G.M.J., Nabuurs G.J., Palosuo T., Pedroni L., Vallejo A., Vilén T.** 2004. CO2FIX V 3.1 - description of a model for quantifying carbon sequestration in forest ecosystems and wood products. ALTERNIA Report 1068. Wageningen, The Netherlands.

**Šimunović N., Hesser F., Stern T.** 2018. Frame Analysis of ENGO Conceptualization of Sustainable Forest Management: Environmental Justice and Neoliberalism at the Core of Sustainability. *Sustainability*.

**Smith D.M., Larson B.C., Kelty M.J. & P. Ashton.** 1997. The Practice of Silviculture: Applied Ecology, Ninth Edition. John Wiley & Sons, Inc. 537 pp.

**Turner J. & M. Lambert.** 1996. Nutrient Cycling and Forest Management. En: Attiwill PM, Adams MA (Eds). *Nutrition of Eucalyptus*. CSIRO, Australia. Pp. 229-248.

**UNFCCC.** 2004. Cuidar el clima: Guía de la Convención Marco sobre el Cambio Climático y el Protocolo de Kioto, pp. 33.

**USDA Forest Service.** 1984 draft. Economic and social analysis handbook. FSH 1909.17.

**Wall A.** 2012. Risk analysis of effects of whole-tree harvesting on site productivity. *Forest Ecology and Management* 282: 175-184.