

Uso de sistemas silvopastoriles en la zona de amortiguamiento del Parque Nacional Copo, Santiago del Estero. Un análisis económico

The Use of Sylvopastoral Systems in the Copo Nacional Park Buffer Area, Santiago del Estero. An economical Analysis

Coronel de Renolfi, M.¹ y M. M. Brassiolo²

Recibido en marzo de 2007; aceptado en diciembre de 2008

RESUMEN

Las actuales prácticas de producción, de carácter extractivas y desordenadas, que se desarrollan en la zona de amortiguamiento del Parque Nacional Copo, Santiago del Estero, no son compatibles con el fin que debe cumplir dicha área, por lo que es necesario generar un plan de recomposición de la zona. El objetivo del trabajo fue evaluar económicamente dos modelos prediales de uso silvopastoril y determinar un plan óptimo de producción con el cual se pueda motivar a los productores para su adopción. Para la formulación de los modelos y la determinación del plan óptimo se usaron las técnicas de programación lineal bajo un principio maximizador. En función del objetivo y de las restricciones técnicas y económicas, se obtuvieron alternativas de manejo sustentables y eficientes, con niveles de actividad que maximizan el margen bruto anual.

Palabras clave: Uso múltiple; Sustentabilidad; Plan óptimo de producción; Programación lineal.

ABSTRACT

The production practices performed in the buffer area of the Copo National Park, Santiago del Estero, nowadays are extractive and unplanned in nature, and not compatible with its intended aim, either. This is why a plan tending to recompose such area should be made. The objective of this work was to evaluate two sylvopastoral use land models from an economical standpoint, and to design an optimal production plan that could motivate producers to adopt one of them. Both the models and the optimal production plan were formulated using linear programming techniques under a maximizing principle. Depending on the purpose and the technical and economic restrictions, sustainable and efficient alternatives were found, with activity levels that maximize gross margin annually.

Keywords: Multiple use; Sustainability; Optimal production plan; Linear programming.

¹ Cátedra de Economía y Política Forestal. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Nacional de Santiago del Estero. Av. Belgrano (s) 1912. (4200) Santiago del Estero, Argentina.
E-mail: mrenolfi@unse.edu.ar

² Cátedra de Silvicultura. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Nacional de Santiago del Estero. Av. Belgrano (s) 1912. (4200) Santiago del Estero, Argentina. E-mail: mikyb@unse.edu.ar

1. INTRODUCCION

El Parque Nacional Copo se ubica en el extremo noroeste de la Provincia de Santiago del Estero, en el departamento homónimo. El área es una vasta planicie sin cursos de agua, cubierta por bosques secos o semisecos donde se destacan los quebrachales de dos especies: el quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho blanco*) y el quebracho colorado santiagueño (*Schinopsis lorentzii*).

La zona de amortiguamiento del Parque Nacional Copo abarca una faja circundante al mismo de 20 kilómetros de ancho y tiene por función evitar que los impactos ambientales ocasionados por un aprovechamiento inadecuado de los recursos y la expansión agrícola en curso se trasladen directamente al parque.

Entre las principales actividades económicas productivas que se desarrollan en el área de amortiguamiento, se destacan las actividades ganaderas, agrícolas y forestales.

La actividad ganadera, tanto de vacunos como de caprinos, es de tipo extensivo. Se caracterizan por una importante falta de control sanitario y de infraestructura para el manejo. La actividad pastoril extensiva sobre los bosques y pastizales de la zona, llevó a un sobreaprovechamiento de la forrajimasa empobreciendo cada vez más la producción forrajera.

El aprovechamiento forestal se ha intensificado en los últimos años y se está llevando a cabo en forma totalmente desordenada, ya que la mayor parte de la superficie esta siendo aprovechada como un recurso minero sin considerar que se trata de un recurso renovable.

En cuanto a la actividad agrícola, es muy notable el desmonte de extensas superficies. En muchas ocasiones se ha usado el fuego para eliminar la vegetación, lo que ha provocado incendios en el área (Brassiolo, 2001; Brassiolo *et al.*, 2005).

Todas estas prácticas no son compatibles con el fin que debe cumplir el área de amortiguamiento, por lo que es necesario planificar la recomposición del área, generando planes de producción que contemplen combinaciones de actividades productivas sustentables. El reordenamiento de los sistemas productivos de la zona debe proponer planes de producción que conduzcan a un equilibrio óptimo desde la óptica social, ecológica y económica.

Si se reconoce la importancia de la optimización en la toma de decisiones durante la planificación, se torna necesario seleccionar un mecanismo de determinación de dicho óptimo. La programación lineal (Davis y Johnson, 1987; Schrage, 1998; Frank, 2001; Rehman, 2001) es un método de planificación basado en herramientas analíticas optimizadoras; calcula un plan óptimo a partir del concepto del mejor uso alternativo de los recursos. Es el método de optimización más universalmente empleado en la planificación forestal (Díaz Balteiro *et al.*, 1999). En Díaz (1994), Díaz Balteiro *et al.* (1999), Gargano *et al.* (1999), Rodríguez Sánchez *et al.* (2006), Cursack *et al.* (2008) se pueden encontrar casos de aplicación de este método.

El objetivo del presente trabajo es evaluar modelos prediales silvopastoriles y determinar un plan óptimo de producción que pueda ser implementado por los productores de la zona de amortiguamiento del Parque Nacional Copo de acuerdo a su realidad socio-económica.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. El área de estudio

El área del presente estudio es la zona de amortiguamiento o zona *buffer* del Parque Nacional Copo (Dpto. Copo) y abarca una faja circundante al mismo de 20 kilómetros de ancho. El parque limita al norte y este con la Provincia del Chaco. Su ubicación geográfica es de 25° 55' latitud sur y 61° 55' longitud oeste. Posee una superficie total de 114.250 hectáreas, comprendiendo el 0,8% del territorio de la provincia.

2.2. Los datos de partida

Sistemas productivos. En el área de estudio Brassiolo *et al.*, (2005) distinguen cuatro tipos de sistemas productivos predominantes: ganadero, ganadero-forestal, agrícola-ganadero y agrícola. Para clasificar estos sistemas productivos, los mencionados autores utilizaron las variables propuestas por el Centro Editor de América Latina (CEAL, 1993). El relevamiento de la cantidad de productores discriminados según los sistemas productivos se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Número de productores de la zona de amortiguamiento del Parque Copo según sistemas productivos.

Grupo de productores	Nº casos	Sistemas productivos			
		Ganadero	Ganadero-Forestal	Agrícola-Ganadero	Agrícola
Residen	28	15	12	1	0
Residen parcialmente	11	3	4	4	0
No residen	8	8	0	0	0
TOTAL	47	26	16	5	0

Fuente: Brassiolo *et al.*, 2005

Dado que, de los sistemas productivos actuales, son predominantes en número los dos primeros (ganadero y ganadero-forestal), en el presente trabajo se decidió modelizar estos dos sistemas.

Caracterización de los diferentes tipos de bosques. Se utilizó la clasificación del bosque dada por Brassiolo (1997). La Tabla 2 describe el tipo de bosques existente en el área de estudio y su extensión.

Tabla 2. Tipos de bosques y superficie en la zona de amortiguamiento del Parque Copo.

Tipo de cobertura	Superficie (has)
Bosque Aprovechable	128.268
Bosque en Regeneración	82.093
Bosque Secundario	96.201
Monte abierto arbustal	50.287
Pastizales	63.074
Suelo agrícola con escasa cobertura	15.320

Fuente: Brassiolo *et al.*, 2005

Según el mencionado autor, el bosque aprovechable es aquel que no ha sufrido aprovechamiento forestal, o que ha sufrido leves intervenciones sin modificaciones en su estructura, del cual es posible obtener una buena cantidad de productos. Es un bosque sobremaduro, con problemas de regeneración, denominado Tipo I. El bosque en regeneración es un bosque que ha sido aprovechado, pero que mantiene su estructura y posibilidad de regeneración; se lo denomina Tipo II. El bosque secundario es aquel que ha sufrido un intenso aprovechamiento forestal, presenta una alta regeneración, y una condición muy desfavorable en cuanto a calidad y cantidad de productos a obtener; se lo denomina Tipo III.

En el área de amortiguamiento del Parque Nacional Copo se comprueba la existencia de una importante cobertura de bosque aprovechable. Esto es muy importante no solo por la función de amortiguamiento que debe cumplir esta área, sino también porque gran parte de esta superficie es propiedad privada y es necesario motivar a estos productores para que realicen un aprovechamiento del bosque que tienda a la sustentabilidad y no ocurra una transformación hacia otra actividad no sustentable, de rentabilidad a corto plazo.

2.3. El método aplicado

Se plantearon dos modelos productivos (Modelo 1 y Modelo 2) y se determinó el plan óptimo de producción anual para cada uno. El Modelo 1 representa un establecimiento-tipo que caracteriza al pequeño productor de la zona, con sistemas productivos ganadero-forestal y escasos recursos. El Modelo 2 es representativo de un productor mediano que posee una mayor disponibilidad de recursos y normalmente con algún grado de especialización (generalmente hacia la ganadería). Los recursos con que cuenta el productor son la tierra, mano de obra, herramientas y hornos de carbón. Las actividades alternativas a ser evaluadas en cada modelo son la actividad forestal y la ganadería vacuna. En el uso forestal se contemplan la elaboración de rollizos, postes y carbón, respetando los ritmos de crecimiento de las especies aprovechadas. La actividad ganadera está basada en los recursos forrajeros del monte.

La modelización consistió en definir combinaciones viables y compatibles de actividades productivas, integradas en modelos prediales, utilizando aprovechamientos silvopastoriles. Para obtener el plan óptimo se aplicaron las técnicas de programación lineal (Davis y Johnson, 1987; Schrage, 1998; Frank, 2001) bajo un principio de maximización. Se buscó maximizar una función objetivo, el margen bruto total (Frank, 1995; González y Pagliettini, 2004), función sujeta a un conjunto de restricciones. Los parámetros y supuestos usados en cada modelo se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros y supuestos usados en cada modelo.

Parámetros	Modelo 1 (pequeño productor)	Modelo 2 (mediano productor)
Superficie (ha)	500 ha	1.500 ha
Actividades productivas	Ganadería vacuna (cría y recria) Actividad forestal: carbón, postes y rollizos	Ganadería vacuna (cría y recria) Actividad forestal: carbón, postes y rollizos
Mano de obra	2 personas (4.800 horas-hombre/año)	5 personas (12.000 horas-hombre/año)
Herramientas	1 motosierra (2.400 horas-máquina/año)	2 motosierras (4.800 horas-máquina/año)
Hornos de carbón	2 hornos	4 hornos
Comercialización	La venta de productos se efectúa en forma directa a campo; por tanto no se consideran gastos de venta (flete).	La venta de productos se efectúa en Los Pirpintos; por tanto se toman en consideración los gastos de venta (flete).

Fuente: elaboración propia en base a Brassiolo *et al.*, 2005

2.3. Supuestos técnico-económicos de las actividades

Los datos de precios y costos corresponden al primer trimestre del año 2007 (cotización promedio del dólar estadounidense: 3,10 \$/US\$).

Para las actividades forestales, los supuestos y los datos de partida son los siguientes:

- Tramo anual de corta (ha/año): Tierra disponible/Período de corta
- Período de corta (años): 16
- Plan anual de aprovechamiento del bosque: los valores máximos a extraer de cada producto para asegurar un manejo sustentable del bosque son los que se detallan en la Tabla 4.
- Otros datos técnicos y económicos se especifican en la Tabla 5.

Tabla 4. Plan anual de aprovechamiento del bosque.

Existencias/Tipo de bosque	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Total a extraer
	Porcentaje de extracción			
	34%	33%	33%	
Leña aprovechable (m ³ /ha/año)	34,23	18	26,23	26,23
Postes aprovechable (u/ha/año)	18	0	0	6,12
Rollos aprovechables (m ³ /ha/año)	8	0	0	2,72

Fuente: Brassiolo, 1997

Tabla 5. Actividades forestales: datos técnicos y económicos.

Concepto	Valor	Concepto	Valor
Precio venta de postes (\$/unidad)	17	Relación t leña/ m ³ leña	0,9
Precio venta de rollos (\$/unidad)	42	Relación t carbón/t leña	0,2
Precio venta de carbón (\$/t)	120	Capacidad carga del horno (m ³ leña)	36
Costo directo motosierra (\$/h)	7,39	Carga máxima por horno (t leña)	32,4
Relación m ³ madera/rollo	0,6	Duración ciclo carbonización (días)	15
Relación leña/carbón	5 : 1	Máximo ciclos carbonización/año	13,3

Fuente: Brassiolo *et al.*, 2005

Para la actividad ganadera, los supuestos técnicos y económicos son los siguientes:

- La actividad ganadera se desagrega en tres (cría, recría y compra de terneros de destete) para evaluar por separado la conveniencia económica de cada una de éstas³.
- Alimentación del ganado: a campo, sobre pastos naturales.
- Datos técnicos y económicos, se detallan en la Tabla 6 siguiente:

³ La desagregación de actividades, característica particular de la programación lineal, consiste en subdividirla en partes y tratar cada una de ellas como actividad separada que se somete a evaluación económica. De este modo se confiere al modelo gran flexibilidad (Frank, 2001).

Tabla 6. Actividades ganaderas: datos técnicos y económicos.

Concepto	Valor	Concepto	Valor
Parición (%)	75	Peso vaca descarte (kg)	340
Reposición (%)	27,3	Carga ganadera (ha/cab)	8
Peso al destete machos (kg)	150	Amortización toros (años)	6
Peso al destete hembras (kg)	140	Precio venta novillo (\$/kg)	1,5
Engorde anual (kg)	80	Precio venta vaca descarte (\$/kg)	0,97
Mortandad vacas (% anual)	3	Costo directo cría (\$/cab)	16,10
Mortandad terneros (% anual)	4	Costo directo recría machos (\$/cab)	26,88
Peso novillo p/ venta (kg)	350	Costo directo recría hembras (\$/cab)	25,75

Fuente: Brassiolo *et al.*, 2005

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Formulación de los modelos

Para la formulación de cada modelo matemático se utilizó una matriz (llamada matriz de programación lineal) que contiene la ecuación de maximización y las inecuaciones.

En la Tabla 7 se expone la matriz de programación lineal diseñada para el Modelo 1 y en la Tabla 8, la que corresponde al Modelo 2.

Tabla 7. Matriz de programación lineal del Modelo 1

	Extracción forestal (ha)	Motosierra (h)	Mano de obra (h)	Carbón (t)	Postes (unidad)	Rollizos (unidad)	Cría (vaca)	Vta. Terneros machos (cab)	Vta. Terneras hembras (cab)	Recría Machos (cab)	Recría Hembras (cab)	Compra Terneros destete (cab)	Vta. Novillos (cab)	Vta. Vaquillonas (cab)	Vta. Vacas rechazo (cab)	RHS (*)
Z = Margen bruto máximo (\$)		-7.39		120	17	42	-16	225	210	-27	-26	-236	385	385	330	
Monte: tramo anual corta (ha)	1															<= 31.25
Máximo motosierra (h)		1														<= 2400
Uso motosierra (h)		-1		1.67	0.125	0.145										<= 0
Máximo mano de obra (h)			1													<= 4800
Máximo carbonización (t)				1												<= 172.8
Uso mano de obra (h)			-1	77.56	9.21	0.964										<= 0
Leña para carbón (m ³)	-26.23			5.56												<= 0
Postes (unidades)	-6.12				1											<= 0
Madera para rollizos (m ³)	-2.72					0.6042										<= 0
Pastos naturales (ha)							8			17	17					<= 468.75
Terneros machos 150 kg (cab)							-0.38	1		1		-1				<= 0
Terneros hembras 140 kg (cab)							-0.38		1		1					<= 0
Novillos 350 kg (cab)										-0.9			1			<= 0
Vacas de reposición 350 kg (cab)							0.27				-0.9			1		<= 0
Vacas de rechazo (cab)							-0.143								1	<= 0

(*) RHS. Abreviatura de la designación inglesa *right hand side* (restricciones del lado derecho). Sigla muy utilizada en la terminología de la programación lineal para indicar la disponibilidad inicial de los recursos.

Tabla 8. Matriz de programación lineal del Modelo 2

	Extracción forestal (ha)	Motosierra (h)	Mano de obra (h)	Carbón (t)	Postes (unidad)	Rollizos (unidad)	Cría (vaca)	Vta. Terneras hembras (cab)	Vta. Terneros machos (cab)	Compra Ternero destete (cab)	Recría Hembras (cab)	Recría Machos (cab)	Vta. Novillos (cab)	Vta. Vaquillonas (cab)	Vta. Vacas rechazo (cab)	RHS (*)
Z = Margen bruto máximo (\$)		-7.39		133	16.15	39.9	-16	200	214	-248	-26	-27	499	499	313	
Monte: tramo anual corta (ha)	1															<= 93.75
Máximo motosierra (h)		1														<= 4800
Uso motosierra (h)		-1		1.67	0.125	0.145										<= 0
Máximo mano de obra (h)			1													<= 12000
Uso mano de obra (h)			-1	77.56	9.21	0.964										<= 0
Máximo carbonización (t)				1												<= 259.2
Leña para carbón (m ³)		-26.23		5.56												<= 0
Postes (unidades)		-6.12			1											<= 0
Madera para rollizos (m ³)		-2.72				0.6042										<= 0
Pastos naturales (ha)							8				17	17				<= 1406.25
Terneros machos 150 kg (cab)							-0.38	1	-1			1				<= 0
Terneros hembras 140 kg (cab)							-0.38	1			1					<= 0
Novillos 350 kg (cab)												-0.9	1			<= 0
Vacas de reposición 350 kg (cab)							0.27				-0.9			1		<= 0
Vacas de rechazo (cab)							-0.143								1	<= 0

3.2. Plan óptimo del Modelo 1

Los resultados (plan óptimo y análisis de sensibilidad) del Modelo 1 se exponen a continuación. La Tabla 9 muestra la salida informática de la solución óptima.

Tabla 9. Plan anual óptimo de producción del Modelo 1.

Función objetivo (Z máximo):	Valor óptimo
Margen bruto total (\$/año)	17247.25
Actividades:	
Actividad Forestal (ha/año)	31.25
Motosierra (h/año)	106.70
Mano de obra (h/año)	4800.00
Carbón (t/año)	37.43
Postes (unidad/año)	191.25
Rollizos (unidad/año)	140.67
Cría (vacas/año)	35.74
Venta Terneros machos (cab/año)	13.40
Venta Terneras hembras (cab/año)	2.67
Recría Machos (cab/año)	0.00
Recría Hembras (cab/año)	10.84
Compra Terneros destete (cab/año)	0.00
Venta Vacas rechazo (cab/año)	5.10

Para este modelo, la solución óptima propone la actividad forestal y ganadera de cría-recría, con un margen bruto total (función objetivo Z) de 17.247,25 \$/año. El plan óptimo indica utilizar en su totalidad las 500 ha disponibles del recurso tierra, de las cuales 31,25 ha (es el tramo anual de corta) se dedican al aprovechamiento forestal y las restantes 468,75 ha como forraje natural para la actividad ganadera. El plan agota la disponibilidad de mano de obra y utiliza solo 107 horas de motosierra del total disponible. Según la Tabla 9 los niveles óptimos de las actividades forestales son 37 toneladas de carbón, 191 postes y 141 rollizos por año. Los niveles anuales de las actividades ganaderas son 36 cabezas en cría, venta de terneros de destete (13 machos y 3 hembras); las 11 terneras restantes se recrían y venden después de 2,5 años junto con 5 vacas de descarte. Los valores tan bajos para la ganadería se explican por la baja capacidad de carga (8 ha/cab), lo cual se convierte en una restricción que limita la solución.

El respectivo análisis de sensibilidad informa sobre el costo de sustitución de las actividades y el costo de oportunidad de los recursos. En la Tabla 10 se presentan los resultados del costo de sustitución de las actividades para el Modelo 1.

Tabla 10. Costo de sustitución de las actividades del Modelo 1.

Actividades	Costo de sustitución	Coefficiente de función objetivo	Aumento permisible	Disminución permisible
Actividad Forestal (ha)	0.00	0.00	1E+30	198.34
Motosierra (h)	0.00	-7.39	7.39	64.61
Mano de obra (h)	0.00	0.00	1E+30	1.39
Carbón (t)	0.00	120.00	27.69	107.68
Postes (unidad)	0.00	17.00	1E+30	3.29
Rollizos (unidad)	0.00	42.00	1E+30	39.59
Cría (vaca)	0.00	-16.10	1E+30	36.58
Venta Terneros (cab.)	0.00	225.00	11.25	42.62
Venta Terneras (cab.)	0.00	210.00	1E+30	43.07
Recría Machos (cab.)	0.00	-26.88	63.18	1E+30
Recría Hembras (cab.)	0.00	-25.75	77.14	162.00
Compra Terneros destete (cab.)	11.25	-236.25	11.25	1E+30
Venta Vacas rechazo (cab.)	0.00	329.80	1E+30	256.05

De acuerdo con la Tabla 10, la actividad “compra de terneros de destete” tiene posibilidades de ingresar a la solución; solo es necesario que su costo se reduzca en \$11,25 y pase de 236,25 \$/cab a 225 \$/cab (-236,25 + 11,25). En términos económicos, esto significa que si el precio de compra fuese de 225 \$/cab, conviene comprar terneros en lugar de dedicarse a la cría o recría.

Por otra parte, el análisis de los rangos de validez de los coeficientes en la función objetivo (Tabla 10) indica que el precio de la actividad “carbón” (120 \$/t) tiene un rango de variación de + 27,7 y - 108. Si el precio del carbón supera esos límites admisibles, cambiará la dimensión de la actividad en el plan óptimo. Para el precio de la actividad “postes” no hay límite superior, pero el límite inferior es una reducción de hasta \$3,29. En el caso de la actividad “rollizos”, su precio no tiene límite superior y el inferior es de \$39,59.

La información que genera el análisis del rango de validez permite orientar sobre la estabilidad de la solución (Frank, 2001). Las actividades forestales incluidas en la solución (carbón, postes, rollos) tienen amplios límites de variación y son, por tanto, soluciones estables. Entre las actividades ganaderas, la actividad de recría se muestra con soluciones estables, mientras que la venta de terneros de destete presenta poca estabilidad en la solución.

La Tabla 11 exhibe el costo de oportunidad de los recursos para dicho modelo.

Tabla 11. Costo de oportunidad de los recursos del Modelo 1.

Restricciones	Uso del recurso	Costo oportunidad	Disponibilidad inicial
Monte: tramo anual corta (ha)	31.25	198.34	31.25
Máximo motosierra (h)	106.69	0	2400
Uso motosierra (h)	1.08E-11	7.39	0
Máximo mano de obra (h)	4800	1.39	4800
Máximo carbonización (t)	37.43	0	172.8
Uso mano de obra (h)	7.07E-10	1.39	0
Leña para carbón (m ³)	-611.73	0	0
Postes (unidades)	1.19E-12	3.29	0
Rollizos (m ³)	-3.08E-11	65.52	0
Pastos naturales (ha)	468.75	9.35	468.75

Según la Tabla 11, la superficie disponible y la mano de obra son los únicos recursos totalmente agotados en el plan, pues el uso del recurso en el óptimo es igual a la restricción impuesta. Las horas de motosierra y la cantidad de hornos de carbonización son recursos en exceso, dado que la disponibilidad inicial supera su uso en la solución. El costo de oportunidad de la mano de obra es de 1,39 \$/hora, lo cual significa que el margen bruto total aumentaría en ese monto por cada hora que pueda agregarse a la disponibilidad inicial de 4.800 horas. La tierra de monte dedicada al aprovechamiento forestal tiene un alto costo de oportunidad de 198 \$/ha, mientras que la destinada a las actividades de ganadería es de sólo 9,35 \$/ha.

De los límites impuestos en la extracción forestal (según el plan anual de aprovechamiento de la Tabla 4), el costo de oportunidad de la leña para carbón es nulo, de los postes es de 3,29 \$/unidad y de los rollizos es de 65,52 \$/m³.

3.3. Plan óptimo del Modelo 2

La Tabla 12 presenta la solución óptima para este modelo productivo.

Tabla 12. Plan anual óptimo de producción del Modelo 2.

Función objetivo (Z Máximo):	Valor óptimo
Margen bruto total (\$/año)	50513.78
Actividades:	
Actividad Forestal (ha/año)	93.75
Motosierra (h/año)	268.50
Mano de obra (h/año)	12000.00
Carbón (t/año)	81.35
Postes (unidad/año)	579.80
Rollizos (unidad/año)	422.00
Cría (vacas/año)	0.00
Venta Terneros machos (cab/año)	0.00
Venta Terneras hembras (cab/año)	0.00
Recría Machos (cab/año)	83.35
Recría Hembras (cab/año)	0.00
Compra Terneros destete (cab/año)	83.35
Venta Novillos (cab/año)	77.10
Venta Vacas rechazo (cab/año)	0.00

Según la Tabla 12 la solución óptima del Modelo 2 incluye las actividades ganadera y forestal (carbón, postes y rollos). La ganadería consiste en la compra de terneros de destete, recría y posterior venta de machos, con un margen bruto total de \$50.514 anuales. El plan óptimo sugiere utilizar las 1.500 ha al manejo silvopastoril, de las cuales 94 ha se dedican al aprovechamiento forestal (es el tramo anual de corta) y las restantes 1.406 ha como forraje natural de la ganadería. El plan utiliza la totalidad de la disponibilidad de mano de obra; utiliza solo 268 horas de motosierra del total disponible y quedan remanente 9.332 horas sin utilizar. Los niveles anuales óptimos de las actividades forestales son 81,35 toneladas de carbón, 580 postes y 422 rollizos. Para la actividad ganadera el plan anual aconseja la compra de terneros de destete (83 cabezas), su recría durante 2,5 años y la venta de los terneros terminados.

Los resultados del costo de sustitución de las actividades se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Costo de sustitución de las actividades del Modelo 2.

Actividades	Costo de sustitución	Coefficiente de función objetivo	Aumento permisible	Disminución permisible
Actividad Forestal (ha)	0	0	1E+30	173.51
Motosierra (h)	0	-7.39	7.39	72.41
Mano de obra (h)	0	0	3.78134E+13	1.556
Carbón (t)	0	133	7.53	120.68
Postes (unidad)	0	16.15	1E+30	0.89
Rollizos (unidad)	0	39.9	1E+30	37.32
Cría (vaca)	10.85	-16.09	10.85	1E+30
Venta Terneras (cab.)	36.53	199.49	36.53	1E+30
Venta Terneros (cab.)	33.75	213.75	33.75	1E+30
Compra Terneros destete (cab)	0	-247.5	33.75	8.79
Recría Hembras (cab.)	0	-26.00	28.56	36.53
Recría Machos (cab.)	0	-27	36.53	12.70
Venta Novillos (cab.)	0	498.75	39.49	13.73
Venta Vaquillonas (cab.)	0	498.74	150.76	40.59

Como se observa en la Tabla 13, el costo de sustitución de las actividades “cría” y “venta de terneros” (que no figuran en la solución) es distinto de cero, lo que indica que, por ejemplo, el margen bruto se reducirá en \$10,85 por cada cabeza que se intente criar. Para la actividad ganadera de cría, su costo directo debería ser de tan solo \$5,20 por animal [-16,09 – (-10,85)] para que ingrese en la solución; por lo tanto, no tiene posibilidad de ingresar en el plan óptimo.

En lo que respecta a la estabilidad de la solución se puede señalar que las actividades ganaderas “compra de terneros” y “venta de novillos”, pertenecientes al plan óptimo, son soluciones inestables, con rangos de variación muy estrecho. El costo directo de la actividad “compra de terneros” es de 247,5 \$/cab y se puede mover entre \$213,75 y \$256,30. Lo mismo sucede en la actividad “venta de novillos” cuyo margen de variación del ingreso bruto es +8% y -2,7%.

Las actividades forestales, todas incluidas en la solución, presentan mayor o menor sensibilidad según del producto que se trate. El carbón es sensible al aumento del precio y estable a la baja. La actividad “postes” es muy estable a un aumento en su precio y muy inestable a la baja. Finalmente, en el caso de los rollizos, se puede señalar que es la actividad más estable, por cuanto presenta un amplio rango de variación.

La Tabla 14 presenta los resultados del cálculo del costo de oportunidad de los recursos utilizados en el Modelo 2.

Tabla 14. Costo de oportunidad de los recursos del Modelo 2.

Restricciones	Uso del recurso	Costo oportunidad	Disponibilidad inicial
Monte: tramo anual corta (ha)	93.75	173.51	93.75
Máximo motosierra (h)	268.49	0	9600
Uso motosierra (h)	2.84217E-14	7.39	0
Máximo mano de obra (h)	12000	1.55	12000
Uso mano de obra (h)	-4.60432E-12	1.55	0
Máximo carbonización (t)	81.34	0	259.2
Leña para carbón (m ³)	-2007.13	0	0
Postes (unidades)	0	0.89	0
Rollizos (m ³)	-5.68434E-14	61.77	0
Pastos naturales (ha)	1406.25	11.07	1406.25

En el caso de este modelo, el costo de oportunidad de la tierra con monte es de 173,5 \$/ha y el de la mano de obra es de 1,55 \$/h. La tierra destinada a pastos naturales tiene un costo de oportunidad de tan solo 11 \$/ha. Con respecto a los costos de oportunidad que presentan las actividades forestales, cabe aquí idéntico análisis que el efectuado en el Modelo 1. Para los límites de extracción forestal fijados, que hacen sustentable el plan anual de producción (26,23 m³/ha de leña, 6,12 unidades/ha de postes y 2,72 m³/ha de madera en rollo), el costo de oportunidad de la leña para carbón es nulo, de los postes es de 0,89 \$/unidad y de los rollizos es 61,77 \$/m³. Desde la rigurosidad matemática del resultado, estos valores indican que el margen bruto total del productor podría incrementarse si aumentasen los límites de extracción de madera para rollizos. Desde el punto de vista ecológico, esta posibilidad debe descartarse si se pretende un manejo sustentable del recurso forestal.

Desde una visión general del trabajo se puede señalar que con la aplicación de la programación lineal se obtienen, junto a la alternativa óptima, otros resultados como la dimensión de las actividades, el beneficio a obtener, el nivel de recursos utilizados y los costos de oportunidad, entre otros. Si bien el método de programación lineal presta una mayor atención a los aspectos económicos, esto no implica que la gestión del bosque consista exclusivamente en una planificación económica. Existen y deben tenerse en cuenta otros objetivos y restricciones, tales como la sustentabilidad ecológica y social de los sistemas productivos. Estas consideraciones son advertidas en los trabajos de Díaz Balteiro *et al.* (1999) y Gargano *et al.* (1999).

Introducir las restricciones de extracción forestal en un contexto maximizador, tal como se planteó en este estudio, implica que la solución obtenida asegura un manejo sustentable del bosque y el mejor resultado económico posible para el productor, con las limitaciones dadas para sus recursos. Cabe advertir que los modelos aquí planteados han considerado sólo objetivos derivados de la ganadería y de la producción de madera. Sin embargo, Díaz Balteiro *et al.* (1999) advierten que existen otras producciones y/o servicios que presta el bosque que podrían introducirse como objetivos de modelos perfeccionados, en una línea de investigación a seguir en el futuro. Por otra parte, Cursack *et al.* (2008) señalan que cuanto más variables se tengan en cuenta en el diseño del modelo, más detallado será el análisis y más precisos sus resultados. No obstante, al mismo tiempo, la incorporación de más datos diversos hace más complejo el modelo y de más difícil interpretación. Es necesario por tanto, buscar un justo equilibrio entre la cantidad de información y los objetivos propuestos.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se han construido modelos de planificación productiva de los que se han obtenido, en función del objetivo y las restricciones fijadas de antemano, alternativas de manejo viables y eficientes.

Para el pequeño productor, el plan anual óptimo consiste en destinar toda la superficie disponible (500 ha) al manejo silvopastoril, con 468,75 ha asignadas a forraje natural para cría y recría del ganado y con tramos anuales de aprovechamiento forestal de 31,25 ha. El margen bruto total anual es de \$17.247,25. La estabilidad que revela la solución en su conjunto estaría indicando que no es conveniente hacer cambios en el plan de producción que se propone.

El plan anual óptimo para el mediano productor sugiere la utilización de todo el predio (1.500 ha). Las actividades silvopastoriles consisten en el aprovechamiento de tramos de corta anual de 94 ha y en la producción ganadera de recría en el resto de la superficie. El margen bruto total es de \$50.514 al año. El plan óptimo se manifiesta un poco inestable, excepto en la producción de madera para rollizos

La información que proporciona el estudio realizado va más allá de la simple elección de una determinada solución, ya que permite fácilmente conocer cuál es el costo de introducir cualquier tipo de restricción o modificación.

El trabajo muestra que la aplicación a la planificación productiva de métodos basados en herramientas analíticas como la programación lineal, no sólo es factible sino que puede proporcionar resultados muy interesantes al gestor forestal. Esto no implica que el método esté exento de críticas ni que pueda necesitar un mayor número de estudios con el fin de perfeccionar los resultados obtenidos y mejorar las prestaciones del mismo. Sin embargo, no debe olvidarse que la formulación de un modelo significa la transferencia de un problema de mundo real a un formato de ecuaciones matemáticas.

Se reconoce que la utilización de estas herramientas optimizadoras no asegura que se puedan contestar todas las preguntas que surgen al proceder a la planificación de sistemas productivos debido a su innata complejidad, pero estos modelos proporcionan un conjunto de políticas y pautas de acción a seguir que pueden ayudar al gestor a mejorar su toma de decisiones.

5. REFERENCIAS

- Brassiolo, M. 1997. "Zur Bewirtschaftung degraderter Wälder im semiariden Chaco Nordargentiniens unter Berücksichtigung der traditionellen Waldweide". Tesis doctoral. Universidad Albert-Ludwigs Freiburg, Alemania. 147 p.
- Brassiolo, M. 2001. "Diagnóstico socioeconómico y de uso del suelo en la Zona de Amortiguamiento del Parque Nacional Copo". Área Protegida Copo. APN/GEF/BIRF.
- Brassiolo, M.; M. Abt; W. Casino; R. Coirini; H. Jañes; U. Karlin; M. Renolfi y S. Roldán. 2005. "Determinación de modelos prediales sustentables en la Reserva Copo, área de amortiguamiento del Parque Nacional Copo". Servicio de consultoría contratado por la Administración de Parques Nacionales. Red Agroforestal Chaco Argentino. 124 p.
- CEAL. 1993. "Sociología rural argentina: estudio en torno al campesinado". Centro Editor de América Latina. Buenos Aires, Argentina. 203 p.
- Cursack, A. M.; H. Castignani; O. Osan; M. Suero y M. C. Brizi. 2008. "Optimización en empresas lecheras mixtas". 2º Congreso Regional de Economía Agraria. Montevideo, Uruguay. 14 p.
- Davis L. y N. Johnson. 1987. "A framework for decision making". In Forest management, p 171-232. Tercera edición. Nueva York, Estados Unidos.
- Díaz Balteiro, L. y A. Prieto Rodríguez. 1999. "Modelos de planificación forestal basados en la programación lineal. Aplicación al monte Pinar de Navafría (Segovia)". Investigaciones Agrarias. Recursos Forestales 8 (1): 63-72. Madrid, España.
- Díaz, A. M. 1999. "Económica de sistemas de producción para minifundios de Leandro Alem e San Javier, Misiones, Argentina". Tesis de maestría. Universidad Federal de Viçosa. Minas Gerais, Brasil.
- Frank, R. 1995. "Introducción al cálculo de costos agropecuarios". Editorial El Ateneo. Sexta edición. Buenos Aires, Argentina. 37 p.
- Frank, R. 2001. "Planeamiento de la empresa con programación lineal". Documento de Administración Rural. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. Argentina. 179 p.
- Gargano, A.; M. Aduriz y M. Saldungaray. 1999. "Modelación de agrosistemas con programación lineal para el partido de Coronel Rosales, Argentina". Revista Facultad de Agronomía (LUZ) 16 (5): 562-576. Venezuela.
- González, M. C. y L. Pagliettini. 2004. "Los costos agrarios y sus aplicaciones". Editorial Facultad de Agronomía. UBA. Buenos Aires, Argentina. 78 p.

- Rehman, T. 2001. "An introductory economic interpretation of Linear Programming". Material didáctico del curso de Economía de los Recursos Naturales. Instituto Agronómico Mediterráneo de Zaragoza. Centro Internacional de Altos Estudios Agronómicos Mediterráneos. España. 138 p.
- Rodríguez Sánchez, S. y L. Plà Aragonés. 2006. "Planificación de la producción ganadera mediante programación lineal". XXIX Congreso Nacional de Estadística e Investigación Operativa. Tenerife. 2 p.
- Schrage, L. 1998. "Optimization Modeling with LINDO". Lindo Systems Inc. Chicago, Estados Unidos. 399 p.

