



Marcos Singer

Fusión de Aserraderos

Durante el año 2004, la madera aserrada fue el sexto ítem de exportación en Chile, con ventas de US\$ 613.700.000, creciendo en el 2005 más de 4%. El año 2005 el sector empleó, en forma directa, a 25.000 personas y, en forma indirecta, a varios miles más. La competencia en la industria es intensa, no sólo entre empresas del mismo rubro, sino contra productos sustitutos tales como el concreto, acero y plástico. Los principales mercados —Europa, EE.UU. y Japón— están lejos de Chile comparados con otras naciones productoras —Canadá, Suecia, Noruega y Finlandia—, lo que ha obligado a las empresas forestales chilenas a convertirse en líderes mundiales en el ámbito de la gestión logística y de procesos.

Tradicionalmente, las ganancias en eficiencia se han concebido como mejoras individuales en cada aserradero. Por ejemplo, Roos *et al.* (2001) evalúan tres estrategias: aumentar el valor agregado de los productos, aumentar la productividad del personal y ganar eficiencia por economías de escala. Carlsson & Rönnqvist (2005) proponen una estrategia diferente: ganar competitividad integrando la operación de varios aserraderos con capacidades complementarias. Siguiendo esta línea, Singer & Donoso (2007) evalúan los beneficios potenciales de operar Aserraderos Arauco Sociedad Anónima (AASA) de manera integrada. AASA es el holding de aserraderos más grande del hemisferio sur, con una capacidad agregada de procesar 4,3 millones de metros cúbicos de troncos o “rollizos” de madera, que se convierten en 2,5 millones de metros cúbicos de madera aserrada. El holding agrupa a doce aserraderos administrados de manera coordinada, pero autónoma.

En este caso analizaremos la posibilidad de fusionarse de dos aserraderos: A1 y A2. Para ello, se analizará si esto es conveniente para ambas partes, realizando una estimación de los beneficios potenciales que esta fusión les traería. Primeramente se calculará la máxima rentabilidad individual si los aserraderos operan de manera independiente, para luego compararla con la máxima rentabilidad que se podría alcanzar si los aserraderos integran su operación.

Descripción del Proceso Productivo Individual

El diagrama de flujo de la **Ilustración 1** muestra el proceso de elaboración de la madera aserrada. La primera actividad de aserrado produce un inventario intermedio de productos denominados “verdes”, luego de lo cual una segunda actividad de secado-cepillado produce un inventario de productos denominados “secos”.

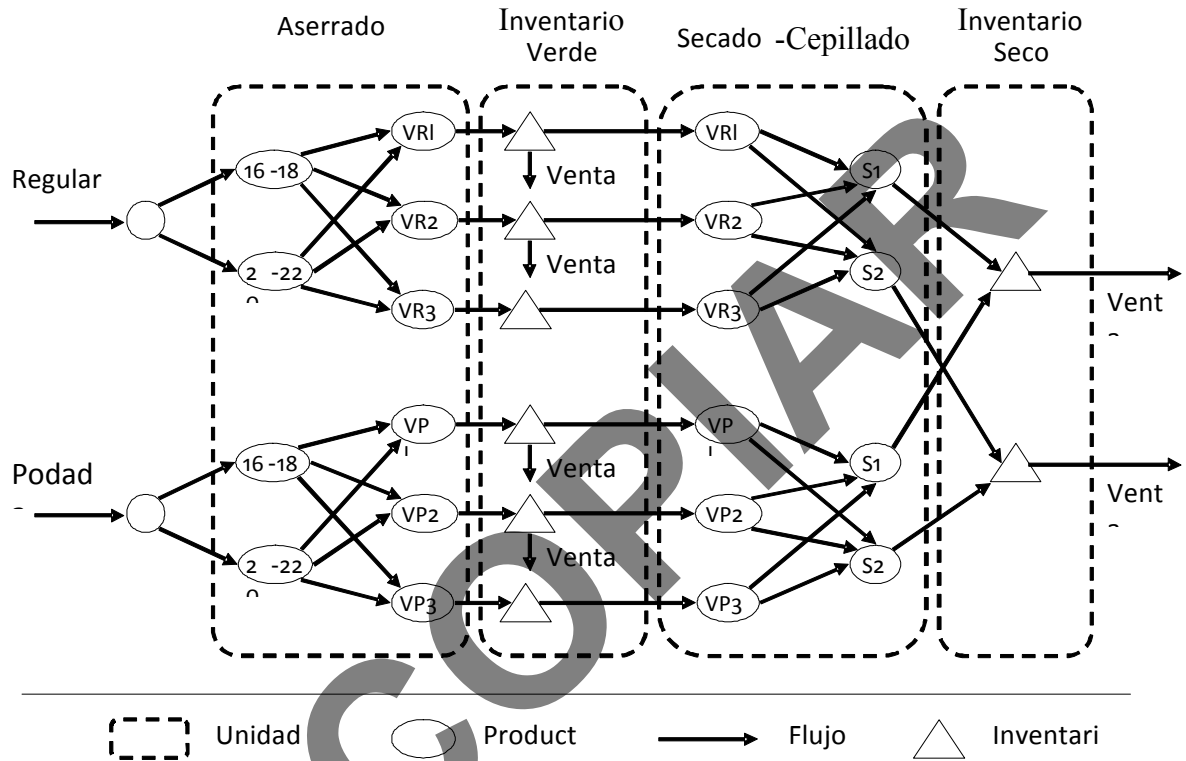


Ilustración 1: Diagrama de flujo de un aserradero

La primera etapa se inicia con la compra de materia prima, es decir, rollizos de madera, los que pueden ser de tipo “regular” o “podado”. La **Tabla 1** muestra los precios de compra por tipo de rollizo para cada aserradero.

Tabla 1: Precio de compra de rollizos [\$/m³]

Aserrader	Regular	Podada
A1	18,0	19,0
A2	19,44	16,7

Debido a las características de los bosques cercanos a cada aserradero, los m³ de rollizos regulares y podados se distribuyen en diferentes diámetros, según las proporciones mostradas en la **Tabla 2** y la **Tabla 3**.

Tabla 2: Diámetros regular

	A1	A2
16 - 18	67%	75%
20 - 22	33%	25%
Total	100%	100%

Tabla 3: Diámetros podado

	A1	A2
16 - 18	45	61%
20 -	55%	39
Total	100%	100%

La productividad del aserradero, en términos de volumen de rollizos procesados por hora, está dada en la Tabla 4.

Tabla 4: Productividad [m³/h]

		A1	A2
Regula	16 - 18	33,	46,
	20 -	37,	64,
Podad	16 - 18	29,	32,7
	20 -	44,	51,2

Dependiendo del tipo de corte que se le realice, se obtienen tres tipos de productos verdes, denominados V1, V2 y V3. Existen proporciones máximas de utilización de las materias primas debido a la geometría del corte de los productos, tal como lo sugiere la **Ilustración 2**. Además, existen pérdidas de material debido al ajuste de las secciones rectangulares de los tablonos a rollizos cilíndricos y porque el proceso de corte produce aserrín.

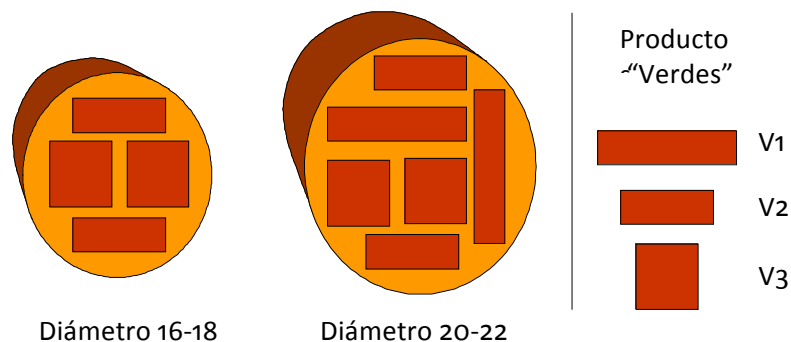


Ilustración 2: Geometrías de corte de productos verdes

La **Tabla 5** muestra las proporciones máximas de utilización de la materia prima para diferentes combinaciones de productos verdes, las que son ligeramente superiores para rollizos podados, pues su madera tiene menos nudos. Por ejemplo, cuando el aserradero A1 produce V1 a partir de rollizos regulares de diámetro 16-18, hasta un 21% del volumen del rollizo se convierte en producto verde, y cuando produce V2, hasta un 17%. Cuando produce V1 y V2, hasta un 26,6% se convierte en producto verde.

Tabla 5: Restricciones de proporciones máximas de utilización

Regula		A1	A2	Podad		A1	A2
16 - 18	V1	21,0%	11,2%	16 - 18	V1	23%	12%
	V2	17,0%	12,0%		V2	19%	12%
	V1+V2	26,6	20,8		V1+V2	29	22%
	V3	19,0%	14,8%		V3	20	16%
	V1+V2+V3	36,5%	40,9		V1+V2+V3	39	44
20 - 22	V1	22,9%	9,7%	20 - 22	V1	24	15%
	V2	18,4%	14,2%		V2	19%	16%
	V1+V2	29,0	24,5%		V1+V2	30	28
	V3	20,3	17,5%		V3	21%	18%
	V1+V2+V3	39,0	40,1%		V1+V2+V3	41%	49

Una vez finalizada la actividad de aserrado, los productos V1, V2 y V3 pueden pasar de inmediato a la actividad de secado-cepillado o pueden almacenarse en bodega. Un volumen de V1 y V2 se vende de inmediato a un precio de venta de 115 y 105 [\$/m³], respectivamente, cumpliendo las cantidades mínimas de la **Tabla 6** establecidas en contratos. Los productos se venden puestos en el puerto, por lo que los aserraderos deben cargar con el costo de transporte de 7 [\$/m³] y 5,1 [\$/m³] para A1 y A2 respectivamente.

Tabla 6: Demanda mínima por productos verdes [m³]

A1	t1	t2
V1	3.50	4.50
V2	8.00	7.00
A2	t1	t2
V1	4.55	5.85
V2	10.40	9.100

La segunda actividad de secado-cepillado convierte productos verdes en los productos secos S1 y S2. La **Tabla 7** muestra los porcentajes de volumen de productos secos obtenidos desde cada producto verde. Por ejemplo, por cada m³ de V1 de madera regular en el aserradero A2 un total de 0,8 m³ están destinados a la producción de S1 y los restantes 0,2 m³ a la producción de S2.

Tabla 7: Distribución de secos a partir de verdes en secado-cepillado

REGULAR	A1		A2	
	S1	S2	S1	S2
V1	100%	0	80	20
V2	55%	45	60	40
V3	46	54	37%	63
PODADA	A1		A2	
	S1	S2	S1	S2
V1	77%	23%	100%	0
V2	69	31%	55%	45
V3	44	56%	66	34

En la actividad de secado-cepillado un porcentaje de productos verdes se agrietan (en el secado) o se rompen (en el cepillado), según lo indica la **Tabla 8**.

Tabla 8: Pérdidas volumétricas de secado-cepillado

Producto	%
S1	5%
S2	7%

Las productividades de las sub-actividades de secado y de cepillado se muestran en la **Tabla 9** y en la **Tabla 10**. Estos parámetros son obtenidos a partir de las cantidades entrantes al proceso, sin considerar las pérdidas volumétricas asociadas. Si entran X m³ de V1 regular al secado de A1, éste utilizará X/21 horas del total de tiempo disponible.

Tabla 9: Productividad de secado [m³/hr]

Regular	A1	A2
V1	21,00	30,0
V2	26,0	38,4
V3	18,66	22,4
Podada	A1	A2
V1	21,42	35,70
V2	26,52	45,7
V3	19,03	26,6

Tabla 10: Productividad de cepillado [m³/hr]

Regular	A1	A2
V1	23,0	30,0
V2	14,0	15,00
V3	22,28	28,8
Podad	A1	A2
V1	24,15	32,10
V2	14,70	16,05
V3	23,39	30,8

Las capacidades de las actividades están dadas en la **Tabla 11**. Los costos variables están dados en la **Tabla 12**, en base a la cantidad de m³ secos producidos.

Tabla 11: Capacidad de producción por actividad [hr/periodo]

	A1		A2	
	t1	t2	t1	t2
ASERRADO	40	38	453	38
SECAD	30	30	788	68
CEPILLADO	20	192	40	38

Tabla 12: Costos de producción por actividad [\$/m³]

	A1	A2
ASERRADO	16,8	13,0
SECADO	16,0	10,0
CEPILLADO	13,4	6,

Una vez finalizado el proceso de producción, cada aserradero vende una parte de su producción de S1 y S2 cumpliendo con las cantidades establecidas por contratos. Los compromisos mínimos de venta están en la **Tabla 13** y los precios en la **Tabla 14**.

Tabla 13: Demanda mínima por productos secos

A1	t1	t2
S1	1.500	1.500
S2	1.500	1.500
A2	t1	t2
S1	1.500	1.500
S2	1.500	1.500

Tabla 14: Precio de venta

	t1	t2
S1	120,0	180,0
S2	344,	400,

Los aserraderos pueden almacenar su producción para el próximo período, por ejemplo, porque esperan un aumento de precio. Los costos de bodegaje están dados en la **Tabla 15**.

Tabla 15: Costos de bodegaje [\$/m³]

	A1		A2	
	t1	t2	t1	t2
S1	6,8	6,8	6,53	6,53
S2	8,4	8,4	19,60	19,60

Los productos secos también se venden puestos en el puerto, por lo que los aserraderos deben cargar con los mismos costos de transporte de 7 [\$/m³] y 5,1 [\$/m³] para A1 y A2 respectivamente.

Modelación del Proceso Productivo Individual

Planificaremos la producción de cada aserradero mediante un programa lineal que maximiza la utilidad durante los períodos de operación. Para ello definimos

Conjuntos:

R = {regular, podada}

: tipo de rollizos

D = {16-18, 20-22}

: tipo de diámetros

$V = \{V1, V2, V3\}$: tipo de productos verdes
 $S = \{S1, S2\}$: tipo de productos secos
 $T = \{1, 2, \dots\}$: períodos de evaluación

Parámetros:

C_r [\$/m³] : costo de rollizo tipo r
 $P_{r,d}$ [%] : proporción de rollizo tipo r que son de diámetro d
 $H1_t$ [hr] : horas disponibles de aserrado en el período t
 $H2_t$ [hr] : horas disponibles de secado en el período t
 $H3_t$ [hr] : horas disponibles de cepillado en el período t
 $Q_{r,d}$ [m³/hr] : productividad de rollizo tipo r de diámetro d
 $M_{r,d,v}$ [%] : máxima proporción de rollizo r de diámetro d a convertirse en verde del tipo v
 $M_{r,d,+}$ [%] : máxima proporción de rollizo r de diámetro d a convertirse en $V1+V2$
 $M_{r,d}$ [%] : máxima proporción de rollizo r de diámetro d a convertirse en verde
 $L_{v,t}$ [m³] : cantidad mínima de v a liberar en el período t
 $E_{s,t}$ [m³] : cantidad mínima de s a liberar en el período t
 $W_{v,t}$ [\$/m³] : precio de venta del producto v en el período t
 $U_{s,t}$ [\$/m³] : precio de venta del producto s en el período t
 $Y_{r,v,s}$ [%] : porcentaje del producto v proveniente del rollizo tipo r que se transforma en un producto tipo s
 A_s [%] : perdidas volumétricas según el producto s
 $J_{r,v}$ [m³/hr] : productividad de secado para el producto v proveniente de un rollizo tipo r
 $G_{r,v}$ [m³/hr] : productividad de cepillado para el producto v proveniente de un rollizo tipo r
 $K1$ [\$/m³] : costo de aserrado
 $K2$ [\$/m³] : costo de secado
 $K3$ [\$/m³] : costo de cepillado
 $F_{s,t}$ [\$/m³] : costo de bodegaje según producto s
 TR [\$/m³] : costo de transporte a puerto
 $B1_v$ [m³] : cantidad inicial en bodega del producto v
 $B2_s$ [m³] : cantidad inicial en bodega del producto s

Variables:

z [\$] : resultado de la operación
 $a_{r,t}$ [m³] : cantidad de rollizos tipo r adquiridos en el período t
 $x_{r,d,v,t}$ [m³] : cantidad de producción de v a partir de rollizos tipo r de diámetro d en el período t
 $v1_{r,v,t}$ [m³] : cantidad vendida del producto v de rollizos tipo r en el período t
 $v2_{s,t}$ [m³] : cantidad vendida del producto s en el período t
 $i1_{r,v,t}$ [m³] : cantidad traspasada a la segunda etapa productiva del producto v de rollizos tipo r en el período t
 $b1_{r,v,t}$ [m³] : cantidad de producto v de rollizos tipo r guardado en bodega en el período t
 $b2_{s,t}$ [m³] : cantidad de producto s guardado en bodega en el período t

Por simplicidad, definiremos la función objetivo sin considerar la utilidad o pérdida por diferencias de inventario. Con ello el programa lineal es:

Maximizar z = resultado verdes
 + resultado secos
 - costo materia prima

$$= \sum_{r,v,t} (W_{v,t} \cdot v1_{r,v,t} - TR \cdot v1_{r,v,t}) - K1 \cdot \sum_{r,d,v,t} x_{r,d,v,t} +$$

$$+ \sum_{r,d,t} (E_{2,r,d,t} - K2 \cdot x_{r,d,t}) - K3 \cdot \sum_{r,d,t} x_{r,d,t} - \sum_{r,t} C_r \cdot a_{r,t}$$

Sujeto a:

$\sum_{r,d,v} \frac{x_{r,d,v,t}}{Q_{r,d}} \leq H1_t$	$\forall t$	Capacidad de aserrado
$x_{r,d,v,t} \leq P_{r,d} \cdot a_{r,t} \cdot M_{r,d,v}$	$\forall r, d, v, t$	Proporciones máximas
$x_{r,d,v1,t} + x_{r,d,v2,t} \leq P_{r,d} \cdot a_{r,t} \cdot M_{r,d,+}$	$\forall r, d, t$	Proporciones máximas
$x_{r,d,v1,t} + x_{r,d,v2,t} + x_{r,d,v3,t} \leq P_{r,d} \cdot a_{r,t} \cdot M_{r,d}$	$\forall r, d, t$	Proporciones máximas
$\sum_r v1_{r,v,t} \geq L_{v,t}$	$\forall v, t$	Ventas mínimas verde
$b1_{r,v,t-1} + \sum_d x_{r,d,v,t} = b1_{r,v,t} + v1_{r,v,t} + \dot{n}_{r,v,t}$	$\forall r, v, t$	Inventario verde
$\sum_r b1_{r,v,t=0} = B1_v$	$\forall v$	Inventario inicial verde
$\sum_{r,v} \frac{i1_{r,v,t}}{J_{r,v}} \leq H2_t$	$\forall t$	Capacidad secado
$\sum_{r,v} \frac{i1_{r,v,t}}{G_{r,v}} \leq H3_t$	$\forall t$	Capacidad cepillado
$v2_{s,t} \geq E_{s,t}$	$\forall s, t$	Ventas mínimas seco
$b2_{s,t-1} + \sum_{r,v} i1_{r,v,t} \cdot Y_{r,v,s} \cdot (1 - A_s) = b2_{s,t} + v2_{s,t}$	$\forall s, t$	Inventario seco
$b2_{s,0} = B2_s$	$\forall s$	Inventario inicial seco
$a_{r,t}, x_{r,d,v,t}, v1_{r,v,t}, v2_{s,t}, \dot{n}_{v,r,t}, b1_{v,r,t}, b2_{s,t} \geq 0$	$\forall r, d, v, t$	

Considerando un horizonte de evaluación de sólo dos períodos, podemos implementar este modelo en Microsoft Excel. Definiendo $B1_v = 0 \forall v$ y $B2_s = 0 \forall s$, los resultados se muestran en la **Tabla 16**.

Tabla 16: Resultados individuales

	Aserradero A1		Aserradero A2	
	t = 1	t = 2	t = 1	t = 2
Resultado verdes	897.440	929.586	1.228.928	1.301.145
Resultado secos	573.606	1.039.909	594.200	2.929.020
Costo materia prima	966.254	775.018	1.997.158	1.025.809
Resultado de la operación	1.699.268		3.030.327	

Antecedentes de la Fusión de Aserraderos

En el escenario de fusión de ambos aserraderos, el proceso de producción de cada aserradero es idéntico al descrito anteriormente. Las mejoras económicas provienen de la posibilidad de traspasar productos tal como lo muestra el diagrama de flujo de la **Ilustración 3**: después de la elaboración de los productos verdes y después de la elaboración de los productos secos. En otras palabras, los aserraderos pueden abastecerse entre ellos para aprovechar la capacidad instalada. También se obtienen beneficios por la posibilidad de combinar las restricciones de ventas mínimas comprometidas.

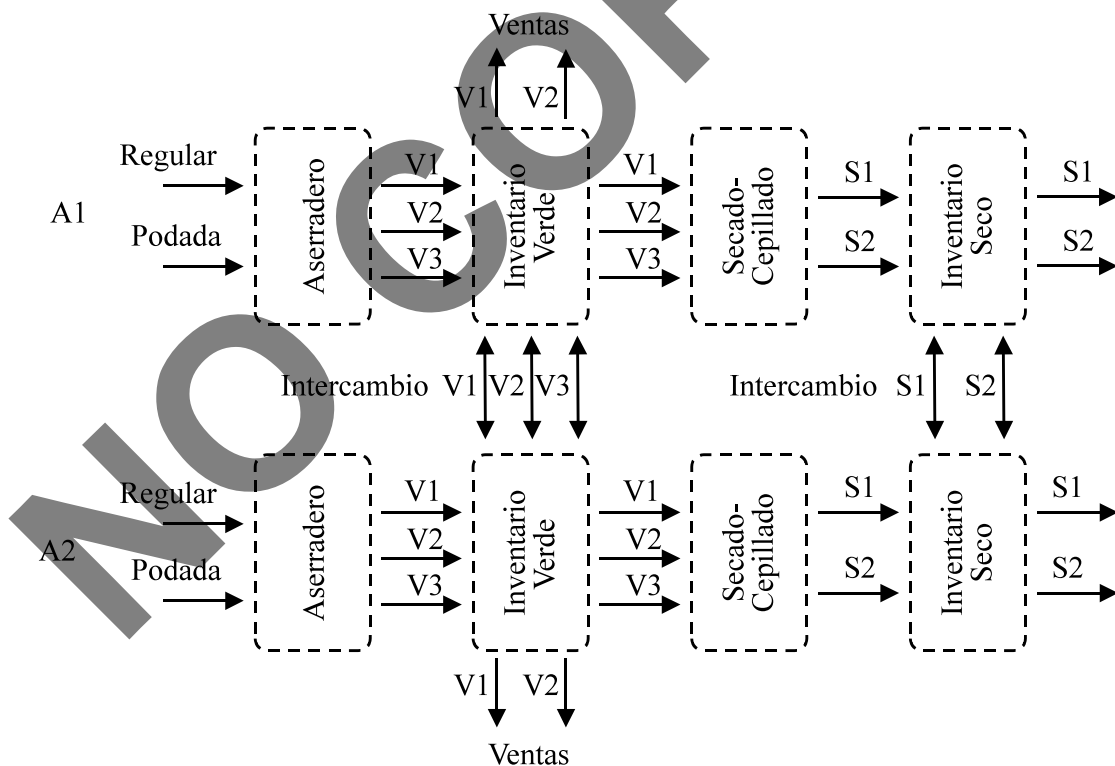


Ilustración 3: Diagrama de flujo de la operación fusionada de aserraderos

Modelación del Proceso Productivo Fusionado

Modelamos la operación fusionada como un programa lineal basado en los mismos conjuntos, parámetros y variables definidos anteriormente. La diferencia es que ahora agregamos un índice que asocia los parámetros y variables a cada uno de los aserraderos. Por ejemplo, la variable $a_{r,t}$ de rollizos adquiridos se convierte en dos variables: $a_{r,t}^{A1}$ para A1 y $a_{r,t}^{A2}$ para A2. Además agregamos los siguientes elementos.

Nuevo parámetro:

\tilde{N} : Precio de transporte de un m^3 entre los aserraderos [$\$/m^3$]

Nuevas variables:

$tvA1A2_{r,v,t}$: traspaso de v desde A1 a A2 de rollizos tipo r en el período t [m^3]

$tsA1A2_{r,s,t}$: traspaso de s desde A1 a A2 de rollizos tipo r en el período t [m^3]

$tvA2A1_{r,v,t}$: traspaso de v desde A2 a A1 de rollizos tipo r en el período t [m^3]

$tsA2A1_{r,s,t}$: traspaso de s desde A2 a A1 de rollizos tipo r en el período t [m^3]

Construimos un nuevo modelo de optimización combinando los modelos individuales de cada uno de los aserraderos. La función objetivo es la suma de las funciones originales, menos el costo de traspaso de inventario igual a:

$$\tilde{N} \left(\sum_{r,v,t} tvA1A2_{r,v,t} + tsA1A2_{r,s,t} + tvA2A1_{r,v,t} + tsA2A1_{r,s,t} \right)$$

Las restricciones de cada aserradero se conservan, aunque las ecuaciones de inventario de productos verdes y de productos secos deben incluir las nuevas variables de traspaso. Para el caso de A1 la ecuación de inventario de productos verdes es:

$$b1_{r,v,t}^{A1} + \sum_d x_{r,d,v,t}^{A1} + tvA2A1_{r,v,t} = b1_{r,v,t}^{A1} + v1_{r,v,t}^{A1} + i1_{r,v,t}^{A1} + tvA1A2_{r,v,t}$$

Para el caso de A1 la ecuación de inventario de productos secos es:

$$b2_{s,t}^{A1} + \sum_{r,v,t} i1_{r,v,t}^{A1} \cdot Y_{r,v,s}^{A1} \cdot (-A_s^{A1}) + tsA2A1_{r,s,t} = b2_{s,t}^{A1} + v2_{s,t}^{A1} + tsA1A2_{r,s,t}$$

Las restricciones de ventas mínimas de cada aserradero, tanto para productos verdes como para productos secos se fusionan de la siguiente manera:

$$\sum_r v1_{r,v,t}^{A1} + \sum_r v1_{r,v,t}^{A2} \geq L_{v,t}^{A1} + L_{v,t}^{A2} \quad \forall v, t \quad \text{Ventas mínimas verde}$$

$$v_{2_s,t}^{A1} + v_{2_s,t}^{A2} \geq E_{s,t}^{A1} + E_{s,t}^{A2}$$

$\forall v, t$ Ventas mínimas seco

Finalmente, agregamos las restricciones de no-negatividad de las nuevas variables.

Nuevamente consideraremos un horizonte de sólo dos períodos. El costo de transporte entre ambos aserraderos es 1,1 [\$/m³]. Definiendo $B_{1_v}^{A1} = B_{1_v}^{A2} = 0 \forall v$ y $B_{2_s}^{A1} = B_{2_s}^{A2} = 0 \forall s$ para ambos aserraderos, los resultados se muestran en la **Tabla 17**.

Tabla 17: Resultados de aserraderos fusionados

	Aserradero A1		Aserradero A2	
	t = 1	t = 2	t = 1	t = 2
Resultado verdes	- 280.188	- 252.878	2.422.379	2.494.995
Resultado secos	- 111.679	- 77.800	1.296.072	4.297.819
Costo materia prima	1.201.633	932.615	1.462.802	1.025.809
Costo traspaso verdes	14.092	13.715	0	0
Costo traspaso secos	2.253	4.409	0	0

El resultado agregado es \$5.131.392, superior a la suma de los resultados individuales \$1.699.268 + \$3.030.327 = \$4.279.595, lo que representa un incremento en el resultado operacional de aproximadamente 8,5%.

Cabe señalar que los traspasos calculados no requieren que la propiedad de los aserraderos esté fusionada. Si existe un mercado suficientemente activo de productos verdes, éstos podrían transarse como lo sugiere la solución óptima, y las ganancias debido a la mayor eficiencia se repartirían de acuerdo con la ley de la oferta y la demanda. Los compromisos comerciales también podrían traspasarse de una empresa a otra, si los productos son de idéntica calidad (*commodities*). Algo así ocurre en la industria del cobre. Las empresas mineras intercambian compromisos (*swaps*) cuando es más eficiente cumplirlos para una empresa que para otra.

Ejercicios para el Alumno

Caso Computacional: Operación de Aserraderos Independientes

Resuelva el modelo descrito y compruebe la solución de la **Tabla 16**.

- Suponga que un proveedor ofrece al aserradero A1 un nuevo tipo de madera podada que es 7% más productiva en el aserrado y 1% menos productiva en el secado-cepillado. ¿Hasta cuánto estaría dispuesto a pagar por este nuevo producto que reemplazaría al rollizo podado utilizado actualmente?
- Volviendo a la situación original, suponga que A2 tiene la posibilidad de agrandar la bodega de productos secos a un costo de \$25.000. Esta construcción contribuirá a que los costos de almacenamiento bajen 1 [\$ / m³] en ambos productos para ambos períodos. ¿Es conveniente realizar este proyecto? ¿En qué porcentaje cambia la cantidad de productos almacenados?
- Volviendo a la situación original, ¿qué efecto tendría aumentar la capacidad de aserrado a 600 [hr/período] en A1? Dado lo anterior, ¿cuál es la disposición a pagar por dicho incremento de capacidad?

Caso Computacional: Operación Fusionada de Aserraderos

Resuelva el modelo descrito y compruebe la solución de la **Tabla 17**.

- ¿Cómo afectaría su respuesta si A1 aumentara sus ventas mínimas de productos verdes en 15%? ¿Cómo afectaría a los traspasos?
- Volviendo a la situación original fusionada, ¿qué efecto tendría aumentar la capacidad de secado a 600 [hr/período] en A1? ¿Cómo afectaría a los traspasos? ¿Cuánto estaría dispuesto a pagar por mejorar esta capacidad de secado.

NO COPIAR

NO COPIAR