EL PROBLEMA DEL TRANSPORTE DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN CUBA

Esteban López Milán[1], Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Holguín, Cuba
Silvia Miquel Fernández[2] y Lluis Miquel Plá Aragonés[3], Departamento de Matemáticas, Universidad de Lleida, España

RESUMEN
Este trabajo presenta una propuesta de solución al problema de la minimización del costo del transporte de la caña de azúcar, cosechada en diferentes campos cañeros y transportada hasta un central azucarero para su procesamiento. La complejidad del problema viene determinada por el número de variables y restricciones a tener en consideración. En las restricciones se hace referencia a la necesidad de abastecimiento continuo del central, los medios utilizados en la cosecha, los distintos tipos de transporte y las rutas de provisionamiento, caracterizadas por la existencia de centros de acopio de la caña, para el posterior transporte de la caña al central por ferrocarril.

ABSTRACT
In this work an approximation to the problem of cost minimization of sugar cane removal from the fields to the sugar mill, is demonstrated. The complexity of the problem is basically determined by the system approach used. It results in the generation of a great number of variables and constraints. Constraints refer to the necessity of continue supply to the sugar mill, cutting means involved in the cane harvesting, transportation vehicles and providing routes. The routes are characterized by the existence of storage places at the beginning of the railroad routes.

Key words: sugar cane transport, optimization, planning, Lnear Programming.

MSC: 90B06

1. EL PROBLEMA DEL TRANSPORTE DE LA CAÑA DE AZÚCAR

Actualmente en Cuba existe un parque de vehículos de transporte muy diversificado (Faedo, 1999), empleado en el traslado de la caña de azúcar desde el campo hasta los centrales azucareros, cada tipo de transporte presenta características técnico-económicas muy particulares que bajo determinadas condiciones operativas y de explotación, hacen que su uso resulte imprescindible. Generalmente la caña se transporta de dos maneras hacia el central: "tiro directo" al basculador, con el empleo de equipos de transporte automotor y el "tiro combinado" (intermodal), que emplea los mismos equipos de transporte automotor para llevar la caña hasta los centros de acopio donde se limpia de la paja, se carga en las casillas del ferrocarril, luego mediante el transporte ferroviario se lleva hasta el patio del central donde espera hasta ser procesada.

De esta manera el transporte ferroviario actúa como un almacén de caña cortada, permitiendo crear una reserva que de ser necesario, completa la demanda horaria del central en las horas diurnas cuando trabajan los equipos automotores; durante la noche y madrugada, el ferrocarril se hace cargo de todo el abastecimiento. Salvo que ocurra alguna avería imprevista, los medios de transporte ferroviario permiten que el central azucarero trabaje ininterrumpidamente las 24 horas del día, y sólo realice paradas cada 10 días a fin de realizar el mantenimiento técnico programado.

Un importante indicador técnico de calidad es el llamado frescura de la caña, que se define como el tiempo promedio que tarda la caña desde que se corta en el campo, hasta que se procesa en el basculador del central.

El empleo del transporte automotor generalmente propicia que la caña llegue más fresca al central, pero sus costos unitarios de transportación son superiores a los que presenta el transporte ferroviario. Normalmente se prefiere el "tiro directo" al basculador, porque esto permite que la caña llegue más fresca al central, aumentando con ello el rendimiento en la producción azucarera.

E-mail: [1]elopez@facing.uho.edu.cu
[2]smiquel@matematica.udl.es
[3]lmpla@matematica.udl.es

Estudios recientes realizados por López y Aleaga (2000), han demostrado que es posible procesar caña suficientemente fresca con el empleo del transporte ferroviario, adoptando medidas organizativas eficientes en la planificación de los cortes de caña y el movimiento de los trenes.

Un aspecto no menos importante en la problemática del sistema “corte-alza-tiro” es que frecuentemente para mejorar el brig de la caña se le suministran en forma de aerosoles maduradores a la caña, con el inconveniente que habrá entonces que cosechar esta caña lo antes posible pues su deterioro se acelera.

De esta manera, lo más importante entonces sería determinar la combinación óptima de los medios de transporte, de forma tal que los costes globales de esta transportación resulten mínimos y se garantice el abastecimiento horario y diario al central azucarero, además de que se obtengan aceptables niveles de frescura de la caña y se eviten las pérdidas por no cosecha.

El modelo matemático que se planteará tiene en cuenta todos estos aspectos, lo que puede sugerir la creación de un sistema multicriterio; sin embargo el problema puede ser resuelto con el empleo de sólo una función objetivo, controlándose el resto de los parámetros a través de las restricciones y el coeficiente de oportunidad, que se introduce en la función objetivo.

A continuación, en la sección 2 se presenta el modelo general con la descripción de las variables utilizadas, la función objetivo y el conjunto de restricciones. Los medios de corte, la cantidad de caña en los campos, la disponibilidad de los medios de transporte y corte, cambian frecuentemente. Por tanto, un ejemplo que ilustra la operación del modelo basado en datos reales, se planteará, se resolverá y se discutirán sus resultados en la sección 3. Finalmente en la sección 4 se exponen las conclusiones, dónde se enfatizará en las sugerencias que se proponen para mejorar el trabajo con la utilización del modelo en etapas posteriores.

2. FORMULACIÓN GENERAL DEL MODELO DE TRANSPORTE

2.1. Las variables

Para el modelo se definirán variables de decisión de acuerdo a la denominación: $X_{i,j,k,l,m}$.

Donde:

i: orígenes. (i = 1 a i = A, centros de acopio; i = A +1 a i = A + B, como campos cañeros).

j: representa a los destinos. (j = 1, central; j = 2 a j = A +1, como centros de acopio).

k: medios de transporte. (k = 1 a k = K).

l: medios de corte. (l = 1 para k = 1, pues en el transporte ferroviario es indiferente de qué forma se corta la caña; l = 2 a l = L+1, pelotones de corte mecanizado; l = L + 2 a l = L + C + 1, pelotones de corte manual).

m: representa las horas del día (m = 1 a m = H, $m \leq 24$).

Por tanto $X_{i,j,k,l,m}$ va a representar la cantidad de caña transportada de i a j mediante el transporte k habiendo sido cortada por el medio cosechador l en la hora m.

Las variables de decisión tienen una naturaleza combinatoria, para definir las que definitivamente estarán presentes en el modelo, se establecen las siguientes reglas:

- Eliminar aquellas que determinan que un origen sea su propio destino.
- En el caso que el origen sea un centro de acopio (i = 1 a A), el único destino admitido es el central (j = 1). Los centros de acopio no realizarán traspaso de caña entre ellos.
- Los orígenes en los campos cañeros admitirán cualquier destino (j = 1 a j = A + 1).
- Las variables que contemplan del empleo del transporte ferroviario (k = 1), sólo se definen para la combinación con el central azucarero (j = 1) y el subíndice l = 1.
- Otras reglas que afectan a las variables de decisión pueden ser consideradas de acuerdo a las características del lugar donde se aplique el modelo.

2.2. Las restricciones

Las restricciones del modelo se clasifican siguiendo la propuesta de Plá **et al**. (2001) en función de los aspectos considerados en el problema:

- La capacidad de producción de los campos cañeros.
- Los medios para la cosecha de la caña.
- La demanda máxima y mínima del central azucarero en una hora.
- Las capacidades de los centros de acopio.
- La igualdad en la cantidad de caña que llega y sale de los centros de acopio.
- La capacidad de transportación de los medios de transporte.
- La satisfacción de la demanda del central para un día de trabajo.

Así se obtienen los siguientes grupos de restricciones:

Restricciones de Capacidad de producción de los campos cañeros (en @).

La capacidad de los campos en @ se representa por Cap_i

$$\sum_{j=1}^{A+1}\sum_{k=2}^{K}\sum_{l=2}^{L+C+1}\sum_{m=1}^{H} X_{i,j,k,l,m} \le Cap_i \qquad i = A+1, A+2,..., A+B$$

Restricciones de los medios de corte (en @/h).

La cosecha se lleva a cabo con pelotones de corte mecanizado (en número: L) y de forma manual con pelotones de corte manual (en número: C). La producción por hora de trabajo de cada pelotón se denota por $Prod_l$.

$$\sum_{i=A+1}^{A+B}\sum_{j=1}^{A+1}\sum_{k=2}^{K} X_{i,j,k,2,m} \le Prod_l \qquad m = 1,2,\dots,H \ \text{ y } \ l = 2, 3, ..., L+C+1$$

Suministro directo al central

Uno de los más importantes grupos de restricciones es el que se refiere al suministro del central, quien como máximo puede procesar una cantidad de caña fija por hora (nombrada $Smax_m$). En estas restricciones la caña que llega desde los centros de acopio no se considera, porque el ferrocarril actúa como un almacén de caña cortada. De lo que se trata es de evitar que al central llegue una cantidad de caña sobre $Smax_m$ @, por transportación directa.

Capacidad máxima de procesamiento del central por transportación directa:

$$\sum_{i=A+1}^{A+B}\sum_{k=2}^{K}\sum_{l=2}^{L+C+1} X_{i,1,k,l,m} \le Smax_m \qquad m = 1, 2,\dots, H$$

Para garantizar que el azúcar producido alcance mejores índices de calidad, se puede dar prioridad al "tiro directo" fijando una cuota de caña que como mínimo se suministre de forma directa al central en cada hora de trabajo, en este caso $Smin_m$ @ (por supuesto, $Smin_m < Smax_m$)

Suministro mínimo de caña por transportación directa:

$$\sum_{i=A+1}^{A+B}\sum_{k=2}^{K}\sum_{l=2}^{L+C+1} X_{i,1,k,l,m} \ge Smin_m \qquad m = 1, 2,\dots, H$$

Suministro a los centros de acopio

Cada centro de acopio tiene una capacidad límite para procesar la caña expresada en @/h, representada por CA_j.

$$\sum_{i=A+1}^{A+B}\sum_{k=2}^{K}\sum_{l=2}^{L+C+1} X_{i,j,k,l,m} \leq CA_j \qquad m = 1, 2,\dots, H \;\; y \;\; j = 2, 3,..., A + 1$$

Igualdad entre la cantidad de caña que llega y la que sale de los centros de acopio

El flujo de caña que pasa por cada centro de acopio se debe conservar durante el día, y aún por cada hora para satisfacer la demanda del central. De esta manera, las restricciones plantean que toda la caña que llega debe salir hora por hora de cada uno de los centros de acopio.

$$X_{1,j,1,1,m} - \sum_{i=A+1}^{A+B}\sum_{k=2}^{K}\sum_{l=2}^{L+C+1} X_{i,j,k,l,m} = 0 \qquad m = 1, 2,\dots, H \;\; y \;\; j = 2, 3,..., A + 1$$

Restricciones de los medios de transporte

El transporte ferroviario es capaz de absorber toda la cantidad de caña que se destine para el consumo del central en un día, de modo que las restricciones de capacidad del transporte, estarán asociadas únicamente a los medios de transporte automotor. En este caso TM_k representará el número de unidades disponibles de cada tipo de transporte automotor.

$$\sum_{i=A+1}^{A+B}\sum_{j=1}^{A+1}\sum_{l=2}^{L+C+1} CR_{i,j,k,l} \cdot X_{i,j,k,l,m} \leq TM_k \qquad m = 1, 2,\dots, H \;\; y \;\; k = 2, 3,..., K$$

Los coeficientes de las variables en las restricciones, son indiferentes de la hora en que se realiza la transportación y se calculan a través de la siguiente fórmula:

$$CR_{i,j,k,l} = \frac{D_{i,j} \cdot \left(\frac{1}{Vcc_k} + \frac{1}{Vsc_k}\right) + Tc_{k,l}}{Cc_k} \qquad \text{(Ec. 1)}$$

Donde:

$CR_{i,j,k,l}$: Coeficiente de la variable $X_{i,j,k,l,m}$ en la restricción de la capacidad de los medios de transporte. Este coeficiente es indiferente al valor de m (hora).

$D_{i,j}$: Distancia desde el origen i, hasta el destino j.

Vcc_k: Velocidad de desplazamiento del medio de transporte k, con carga.

Vsc_k: Velocidad de desplazamiento del medio de transporte k, sin carga.

$Tc_{k,l}$: Tiempo de espera del medio de transporte k, con el tipo de corte l.

Cc_k: Capacidad de carga del medio de transporte k.

Suministro diario al central

Como máximo, el central es capaz de procesar Mmax @ en un día de trabajo, pero se fija una cantidad mínima (Mmin @) a procesar. Se tiene en cuenta en este caso toda la caña que llega al central, sea por tiro directo o por el ferrocarril.

Máxima demanda del central para un día de trabajo (j = 1).

$$\sum_{i=1}^{A}\sum_{m=1}^{H} X_{i,1,1,1,m} + \sum_{i=A+1}^{A+B}\sum_{k=2}^{K}\sum_{l=2}^{L+C+1}\sum_{m=1}^{H} X_{i,1,k,l,m} \leq Mmax$$

Mínima demanda del central para un día de trabajo (j = 1).

$$\sum_{i=1}^{A}\sum_{m=1}^{H} X_{i,1,1,1,m} + \sum_{i=A+1}^{A+B}\sum_{k=2}^{K}\sum_{l=2}^{L+C+1}\sum_{m=1}^{H} X_{i,1,k,l,m} \geq Mmin$$

2.3. Función objetivo

Los coeficientes económicos de la función objetivo ($C_{i,j,k,l,m}$) establecen el costo de la transportación de la caña, en dependencia de las distancias y los medios de transporte utilizados en cada caso.

El coeficiente económico de cada variable se determina como sigue:

$$C_{i,j,k,l,m} = c_k \cdot D_{i,j} \qquad \text{(Ec. 2)}$$

Donde:

$C_{i,j,k,l,m}$: coeficientes económicos.

c_k: costo unitario relativo al transporte k.

$D_{i,j}$: distancia entre el i-origen y el j-destino.

Como se puede apreciar en la ecuación 2 (Ec. 2), el coeficiente económico es indiferente de la forma en que se corta la caña y la hora en que se realizan los cortes (o se realiza la transportación), este coeficiente representa los costos de las transportaciones y depende sólo del medio utilizado y la distancia a recorrer.

En resumen, la función objetivo consiste en minimizar los costos de las transportaciones:

$$\text{F.O. : Minimizar } Z = \sum_{i=1}^{A+B}\sum_{j=1}^{A+1}\sum_{k=1}^{K}\sum_{l=1}^{L+C+1}\sum_{m=1}^{H} C_{i,j,k,l,m} \cdot Co_i \cdot X_{i,j,k,l,m}$$

Donde:

$C_{i,j,k,l,m}$: coeficientes económicos.

Co_i: coeficientes de oportunidad.

$X_{i,j,k,l,m}$: variables de decisión.

El coeficiente de oportunidad representa la preferencia para realizar el corte en un determinado campo cañero; depende únicamente del origen o más exacto, de donde se corta la caña. Por tanto si el origen es un centro de acopio (i = 1 a A), este coeficiente toma el valor de 1; para el resto de los orígenes, $Co_i \leq 1$

2.4. Total de restricciones y variables

Restricciones

Capacidad de los campos cañeros:	B
Restricciones de los medios de corte:	H×(L+C)
Suministro al central:	2×H
Suministro a los centros de acopio:	H×A
Caña que llega y sale de los centros de acopio:	H×A
Medios de transporte:	H×(K-1)
Suministro diario al central:	2

Total: H×(2+2 A+ L+C+ K-1)+2+B

Variables

$X_{i,1,1,1,m}$:	$A \times H$
$X_{i,1,k,l,m}$:	$B \times (K - 1) \times (L + C) \times H$
$X_{i,j,k,l,m}$:	$B \times A \times (K - 1) \times (L + C) \times H$
Total:	$H\times(B\times(A+1)\times(K-1)\times(L+C)+A)$

3. APLICACIÓN DEL MODELO: UN CASO DE ESTUDIO

3.1. Formulación del modelo

Para ejemplificar el modelo se considerará un caso real. El planteamiento corresponde a un día de trabajo en la Empresa Azucarera “Fernando de Dios”.

En el ejemplo, al central se le puede suministrar la caña desde nueve campos diferentes. Cuenta además con cinco centros de acopio desde donde se le envía la caña por el ferrocarril. Finalmente, las labores de cosecha y por tanto de transporte se realizan en una jornada de 14 horas.

En las siguientes subsecciones se brindan los datos específicos del central para un día de la zafra de 2003 y que se usan para la completa formulación del problema.

Restricciones de capacidad de los campos cañeros (en @)

Cada campo implicado en la cosecha tiene diferente extensión superficial y consecuentemente diferente potencial productivo. Los datos que se muestran en la Tabla 1, representan en algunos casos la cantidad de caña estimada que queda por cosechar en los campos.

Tabla 1. Estimado de producción (en @) de los nueve campos cañeros.

Campo: i	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Cap_i	32000	18000	50000	63000	18000	80000	92000	12000	35000

Restricciones de los medios de corte (en @/h)

La caña se cosecha con combinadas cañeras agrupadas en pelotones de corte mecanizado en número de seis, además de un pelotón de corte manual. La capacidad de producción de cada uno de estos medios se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Capacidad de corte de los medios de cosecha disponibles (en @/h).

Medios	mecánico	mecánico	mecánico	mecánico	mecánico	mecánico	manual
l	1	2	3	4	5	6	7
$Prod_l$	5400	5400	5400	5400	5400	5400	2000

Suministro al central

Se fijan 13000 @ que es la máxima cantidad de caña que el central puede procesar en una hora. Por otro lado, se le ha establecido una cantidad mínima de 8900 @ por hora.

Suministro a los centros de acopio

Cada centro de acopio como máximo puede procesar 84000 @ de caña en la jornada de 14 horas, es decir, en una hora de trabajo su capacidad es de 6000 @.

Igualdad entre la cantidad de caña que llega y la que sale de los centros de acopio

Para cada uno de los centros de acopio y por cada una de las 14 horas, se plantean las correspondientes restricciones.

Restricciones de los medios de transporte

Para el central “Fernando de Dios” los medios de transporte disponibles son: ZIL 130 C/R, ZIL 130 S/R y MTZ 80. Para calcular los coeficientes de este grupo de restricciones (cf Ec. 1) se usan los valores proporcionados en las tablas 3 y 4. En la tabla 3 se muestran las características técnicas y de operación, mientras que en la tabla 4 se muestran las distancias medias expresadas en km, entre los posibles orígenes y los destinos.

Tabla 3. Indicadores técnicos de los medios de transporte automotor.

Medios de transporte	k	Velocidad (km/h)		Tiempo total de espera (h)		Capacidad de carga (@)	Cantidad de medios
		Con carga	Sin carga	Corte manual	Corte mecanizado		
MTZ 80	2	15	15	0,42	0,5	1100	25
ZIL 130 C/R	3	20,5	35	0,55	0,33	950	30
ZIL 130 S/R	4	25	40	0,25	0,15	520	9

La caña que se le suministra al central, se puede cortar en nueve campos diferentes y transportada directamente o usando el intermedio de los centros de acopio. La cantidad de centros de acopio disponibles es 5.

Tabla 4. Distancias expresadas en km entre los orígenes i y los destinos j.

Origen(i)		Destino (j)					
		1	2	3	4	5	6
		Central	CA 1	CA 2	CA 3	CA 4	CA 5
1	CA 1	4.0	0.0	-	-	-	-
2	CA 2	9.0	-	0.0	-	-	-
3	CA 3	7.0	-	-	0.0	-	-
4	CA 4	11.0	-	-	-	0.0	-
5	CA 5	11.0	-	-	-	-	0.0
6	Campo 1	5.0	7.0	15.0	12.0	8.0	9.5
7	Campo 2	1.0	3.0	11.0	8.0	11.0	8.8
8	Campo 3	6.2	4.2	5.0	12.0	18.2	16.2
9	Campo 4	14.0	12.0	4.0	21.0	26.0	24.0
10	Campo 5	13.5	15.5	23.5	15.5	1.5	9.5
11	Campo 6	8.4	10.4	18.4	4.5	12.1	4.2
12	Campo 7	14.0	16.0	24.0	7.0	22.0	14.0
13	Campo 8	21.0	19.0	11.0	9.0	23.0	16.0
14	Campo 9	21.0	19.0	11.0	9.0	23.0	16.0

Suministro diario al central

El central “Fernando de Dios” puede procesar como máximo 350000 @ en un día de trabajo. Una cantidad mínima similar a la media histórica, se establece en 320000 @.

3.2. Función objetivo

La siguiente tabla muestra el indicador costo unitario de la transportación, asociado a los diferentes medios de transporte.

Tabla 5. Indicadores económicos de los medios de transporte.

	Medio de transporte (k)			
	1 Ferrocarril	2 ZIL 130 S/R	3 ZIL130 C/R	4 MTZ 80
Costo unitario ($/t-km)	0.32	2.6	2.2	1.5

El coeficiente económico de cada variable se determina multiplicando el costo unitario del transporte (Tabla 5), por la distancia entre los dos puntos entre los cuales se lleva a cabo la transportación (Tabla 4). En este ejemplo los coeficientes de oportunidad se establecen en 1.

Ejemplo: $X_{04,1,3,3,01}$ establece el origen en el campo 1 y como destino el central azucarero, se emplea el ZIL 130 C/R y es en la primera hora de trabajo.

$$C_{04,1,3,3,01} = 11.0 \text{ km} \cdot 2.2 \text{ \$/t·km} = 4.4 \text{ \$/t} = 0.05060 \text{ \$/@}$$

El coeficiente expresado en $/t hay que convertirlo en $/@ para garantizar la compatibilidad en la Función Objetivo. Para realizar la conversión se tiene en cuenta que 1 t = 86.956 @.

Tamaño del problema

El problema que se formula genera $H\times(2+2\ A+\ L+C+\ K\text{-}1)+2+B$ = 14×(2+2 5+ 6+1+ 4-1)+2+9 = 319 restricciones y $H\times(B\times(A+1)\times(K\text{-}1)\times(L+C)+A)$ = 14×(9×(5+1)×(4-1)×(6+1)+5) = 15946 variables.

Esta cantidad total se reduce al considerar restricciones extras establecidas por los especialistas del central “Fernando de Dios”. Así, los tractores MTZ80 solo realizan transportación hacia los centros de acopio j = 4,5 y 6 y trabajan pareados a los medios de corte l = 3,4,5,6 y 7; la caña que se corta de forma manual se transporta con los vehículos 130 S/R. Los ZIL 130 C/R trabajan con los medios de corte l = 1,2,3,4 y 5 y los destinos j =1,2 y 3.

Por tanto, la cantidad total de las restricciones es la misma y se reducen las variables a 4463.

3.3. Resultados y discusión

El problema real representado se ha podido simplificar, aunque puede llegar a ser mucho más complejo. Lo más problemático es el manipular tantas variables.

Inicialmente un caso reducido para una hora de trabajo fue resuelto empleando el Solver del Microsoft Excel© en pocos segundos, esta primera etapa ha servido para refinar el modelo y más específicamente, para mostrar que la capacidad de los centros de acopio resulta esencial para garantizar la factibilidad (restricciones de suministro a los centros de acopio).

Existen softwares profesionales que permiten resolver modelos de programación lineal más complejos como es este caso, por ejemplo: el HyperLINDO (ver detalles en Schrage, 1997). Este paquete se empleó para resolver el modelo completo tal como se ha planteado, en pocos milisegundos después de 325 iteraciones, se llegó a la solución.

El costo mínimo resultó ser de $ 41892.98 para el día de trabajo. La solución tal como se muestra en la tabla 6, se ha simplificado para mostrar la cantidad de caña que se transporta en el día de trabajo.

Al analizar la cantidad de caña cortada se observa como el requerimiento mínimo de 320000 @ se cumple, no más allá para no incrementar los costos de la transportación. Esta cantidad se reparte entre los centros de acopio (165000 @) y la transportación directa desde los campos hacia el central (155000 @).

La solución muestra como no siempre la transportación directa se prefiere, pues no todas las restricciones de este grupo fueron suficientemente satisfechas y por tanto, la máxima cantidad por día no se satisface completamente (13300·14 = 186200 @). Sólo los campos 1, 2, 3 y 6 (i = 6, 7, 8 y 11 respectivamente) sirven directamente la caña al central, esto es porque son los campos más cercanos al central y la transportación por automotor resulta barata. Los otros medios de transporte automotor envían la caña para los centros de acopio pero no trabajan en los campos 8 y 9 (i = 13 e i = 14).

En la Tabla 6 se observa que desde el campo #4 (i = 9) se envía la caña al centro de acopio #2 (j = 3), los campos #6 y 7 (i =11 e i = 12 respectivamente) hacia el centro de acopio #3 (j = 4), el campo #5 (i = 10) envía la caña hacia el centro de acopio #4 (j = 5) y también desde el campo #6 (i = 11) para el centro de acopio #5 (j = 6). Todas estas conexiones muestran como los centros de acopio más cercanos a los campos cañeros, se prefieren para el traslado de la caña hacia allí.

Tabla 6. Solución del modelo para el día, compactada del reporte suministrado por el LINDO.

Variable	Caña transportada (@)	
	A los centros de acopio	**Al central**
X09322	42800	
X09325	20200	
X02111		63000
X11444	8400	
X11447	16600	
X12447	59000	
X03111		84000
X10546	18000	
X04111		18000
X11645	30400	
X05111		30400
X06122		32000
X07124		18000
X08122		800
X08124		49200
X11123		24600
Total	165000	320000

Por otro lado no toda la capacidad de los centros de acopio se aprovecha (5·14·6000 @ = 420000 @ >> 320000 @). Mientras el centro de acopio 3 se emplea a plena capacidad, el centro de acopio 1 no se usa; el resto de los centros de acopio trabajan por debajo de sus respectivas capacidades.

Producto a la naturaleza del problema existen múltiples soluciones óptimas (Prawda, 1993; Schrage, 1997), que le permiten al usuario seleccionar la solución más aconsejable desde su punto de vista, teniendo en cuenta por ejemplo, los requerimientos de transporte y los medios de corte. En la Tabla 6 se muestra una de las soluciones tomando en cuenta la distribución de los medios de corte entre los campos cañeros.

La formulación del modelo matemático para el sistema integral de transporte cañero, enfatiza en la reducción de los costos y controla la frescura de la caña, mediante las restricciones de suministro mínimo al central por tiro directo.

Con el coeficiente de oportunidad (Co_i), se controla la preferencia para cosechar determinado campo cañero con un índice brig mayor; un valor del coeficiente de oportunidad inferior a 1 provoca un decrecimiento del valor real del coeficiente económico ($C_{i,j,k,l,m}$) asociado a la variable en la función objetivo, permitiendo que la correspondiente variable ($X_{i,j,k,l,m}$) entre en el conjunto de soluciones del modelo más fácilmente.

Esto es una práctica válida porque un pequeño incremento en el costo de la transportación, se compensa con un incremento de la producción azucarera y el aumento de la calidad del azúcar producido en el central.

Lo más trascendente de este modelo es que le permite al directivo que realiza la planificación, elaborar los planes de transportación de la misma manera que lo hacía, basándose en criterios objetivos o de aquellos que ha adquirido en su experiencia profesional, sólo que ahora, sin descuidar el costo de la transportación. Otro aspecto significativo es la propia concepción de las variables de decisión, que permiten hacer una posible distribución preliminar mucho más abierta de la ubicación de los medios de corte y transporte que se disponen, sugiriendo posteriormente la solución del modelo la distribución de estos recursos en lugar y tiempo.

Cada variable de decisión es portadora de información múltiple y muy útil a los efectos de la planificación, por cuanto conjuntamente con la información de cantidad de caña que se transporta al central, se dice desde donde se transportaría esta caña, el medio de transporte a utilizar, la forma de corte y hora del día en que se realizaría esta transportación. Agrupando convenientemente cada una de las variables y realizando operaciones complementarias muy sencillas, se puede conocer el ritmo de trabajo de los medios de corte, la cantidad de equipos de transporte que han de estar implicados en la transportación, la hora del día en que se deben realizar movimientos de los medios de transporte y de corte hacia otros campos y por último, realizar el cálculo de la cantidad de combustible para la reserva.

Cuanto más crezca la cantidad de escenarios probables de corte, tipos de medios de transporte, medios disponibles para el corte de la caña y las horas del día para realizar la transportación, crece también la cantidad de variables de decisión involucradas; por tanto para la solución de este modelo se necesita de un sistema automatizado. Una opción podría ser el combinar en un software las posibilidades que brindan algunos sistemas para la solución de modelos de programación lineal (ejemplo: HyperLINDO), con el conocimientos y la experiencia de la persona que normalmente se dedica a la planificación de la actividad corte-alza-tiro de la caña de azúcar.

4. CONCLUSIONES

El problema real puede plantear jornadas de trabajo que conduzcan a formulaciones mucho más complejas de lo que se ha mostrado. Ello se debe a la posibilidad de que las variables y las restricciones cambien de un día para otro (por ejemplo, la disponibilidad de los medios de corte y transporte, posibles orígenes y destinos, y el número de horas de trabajo en el día, pueden incrementarse y llegar a determinar la aparición de más de 30000 variables y 400 restricciones en el modelo matemático); por tanto la automatización del proceso de formulación del modelo es imprescindible ya que resulta extremadamente laboriosa cuando se hace de forma manual.

En cambio, la solución del modelo no representa un problema considerando que el modelo ejemplificado se resolvió rápidamente. Los softwares profesionales permiten la solución de modelos de programación lineal complejos, pero resultan difíciles de operar por los directivos. Producto a esto es necesario elaborar un software basado en una interfaz amigable, capaz de generar una gran cantidad de variables y formular el modelo matemático de forma transparente al usuario, de esta manera replantear el problema y actualizarlo diariamente será fácil y posible. La mayor ventaja de un sistema de estas características es el ahorro de tiempo y dinero a los directivos de los centrales azucareros.

La interpretación y puesta en pantalla de los resultados de forma clara para los directivos, será nuestra próxima meta, tarea en la cual ya estamos trabajando.

REFERENCIAS

FAEDO, D. (1999): **El transporte de carga y pasajeros**, Ed. Pueblo y Educación. La Habana.

LÓPEZ M., E. y A. ALEAGA (2000): “Optimización del tráfico ferroviario de la caña de azúcar en los CAI Fernando de Dios y Urbano Noris”, **IX Exposición Nacional “Forjadores del futuro”,** La Habana.

MIQUEL PLÁ, Ll; S. MIQUEL y E. LÓPEZ (2001): “Aproximación a la optimización del transporte de la caña de azúcar desde el campo a un central azucarero en Cuba”. **XXVI Congreso Nacional de Estadística e Investigación Operativa**, Úbeda.

PRAWDA, J. (1993): **Métodos y modelos de la investigación de operaciones**,1, Modelos determinísticos. Ed. Limusa, México.

SCHRAGE, L. (1997): **Optimization modeling with LINDO**, 5th Ed. Duxbury Press, ITP. New York.