

## APLICACIÓN DE LA TOMA DE DECISIONES MULTICRITERIO EN LA CADENA DE CORTE, ALZA Y TIRO DE LA CAÑA DE AZÚCAR

### Resumen / Abstract

La situación actual en que se encuentra la economía cubana hace necesario que se eleve su eficacia a fin de contribuir a su recuperación. Al ser esta una de las ramas principales, es imprescindible aplicar técnicas que permitan asegurar un funcionamiento óptimo de cada una de sus etapas y áreas, siendo la cadena de corte, alza y transportación de la caña de azúcar el eslabón que vincula a la agricultura con la industria y donde se incurre en una serie de costos que afectan decisivamente el costo total del proceso de obtención de azúcar; por lo que es importante evaluar la misma con varios criterios de desempeño. Por esta razón, es imprescindible el uso de la óptica multicriterio para la toma de decisiones en esta área y precisamente aquí radica el objetivo del presente trabajo, donde se presenta un modelo multimeta para evaluar el desenvolvimiento de la transportación de la caña desde el campo hasta la industria.

*The current situation in which the Cuban economy find herself has made it possible for her to elevate its efficiency in order to get some incomes. The sugar cane factory being one the major branches, it has become necessary, to apply all mechanisms to ensure its optimum operations in every sector. Being one of the fundamentals the chain of cut, boost and transportation of the sugar cane, which constitutes the link that ties the agriculture with the industry about the principal delayance and the cost of process of obtaining sugar which acts on several criterions of role playing. This has therefore become necessary for the usage of the multi-objective optic for taking of decisions and precisely here, radicates the object of this present work.*

**Fernando Marrero Delgado**, Ingeniero Industrial, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad Marta Abréu de Las Villas

**Javier Asencio García**, Ingeniero Industrial, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Auxiliar, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad Marta Abréu de Las Villas

**Roberto Cespón Castro**, Ingeniero Industrial, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Auxiliar, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad Marta Abréu de Las Villas

**René Abréu Ledón**, Ingeniero Industrial, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad Marta Abréu de Las Villas

**René Orozco Sánchez**, Ingeniero Industrial, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad Marta Abréu de Las Villas

**Juan Sánchez Castillo**, Licenciado en Economía, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad Marta Abréu de Las Villas, Villa Clara, Cuba  
e-mail: sfleitas@ind.ispjae.edu.cu

### Palabras claves / Key words

Industria azucarera, investigación de operaciones, logística, toma de decisiones  
Sugar cane industry, operations research, logistics, decision making

### INTRODUCCIÓN

En la vida corriente como en las organizaciones, a menudo hay que enfrentarse a difíciles decisiones debido a la necesidad de cubrir varios imperativos; el decisor se encuentra en disposición de escoger entre distintas posibilidades, denominadas **alternativas**, el conjunto de las cuales constituye el llamado **conjunto de elección**. Para escoger en este conjunto, el decisor tiene diversos puntos de vista, denominados **criterios**. Estos criterios son, al menos parcialmente, contradictorios en el sentido de que si el decisor adopta uno, por ejemplo la minimización del riesgo, no escogerá la misma alternativa que si se basa en otro criterio, por ejemplo, el de mejor rendimiento.<sup>1</sup>

Las ventajas de la modelización multicriterios deben ser valoradas en relación con la modelización clásica en la que el objetivo consiste en llegar a un problema de maximización con restricciones en la que la solución óptima representa la mejor elección según la referencia.<sup>2</sup>

Por otra parte, a pesar de ser Cuba uno de los primeros países del mundo que utilizó el ferrocarril y lo empleó como uno de los medios para la transportación de la caña de azúcar, nunca se ha logrado un óptimo aprovechamiento del equipamiento dedicado a esta vital industria de la economía nacional.

Tradicionalmente se han presentado problemas con la planificación de la transportación de la caña de azúcar, es por ello que se hace necesario realizar un análisis integral de esta área de la agroindustria azucarera.<sup>3</sup>

Dados estos elementos, es que el presente trabajo se ha propuesto como objetivo, analizar y mejorar la transportación de la caña desde el corte hasta el basculador, con vistas a disminuir el déficit y aumentar la frescura de la caña que llega al central azucarero.

Para ello se realizó un estudio de la situación actual de la transportación de la caña de azúcar, se hicieron propuestas que mejoren la organización de la transportación de la caña de azúcar y se formuló un modelo matemático que permita optimizar el uso de los medios de transporte valorando varios criterios de desempeño.

Con la finalidad de darle cumplimiento a la investigación proyectada se tomó como objeto de estudio un complejo agroindustrial azucarero y más específicamente sus áreas destinadas a la transportación de la caña de azúcar desde el campo hasta el central.

## ESTUDIO DE LA TRANSPORTACIÓN DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN UN COMPLEJO AGROINDUSTRIAL AZUCARERO

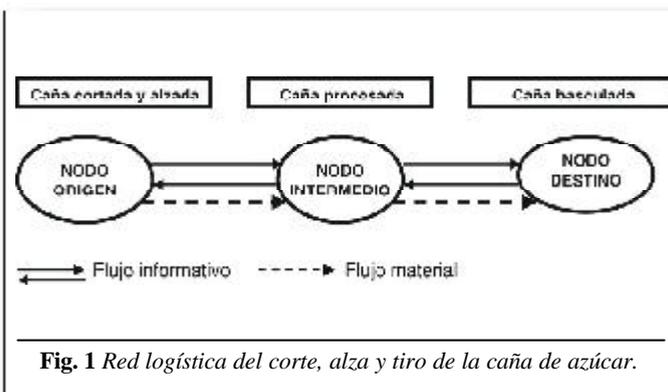
El complejo agroindustrial azucarero (CAI) tiene como misión la fabricación de azúcar como culminación de un proceso industrial que emplea la caña de azúcar como materia prima, luego de su producción; teniendo para ello que utilizar tres eslabones fundamentales que de forma general se presentan en la tabla 1.

Atendiendo a la clasificación de sistema productivo que brinda José Acevedo,<sup>4</sup> el subsistema de transporte fue clasificado de la siguiente forma:

1. Según la relación producción-consumo: se trabaja por entrega directa sin cobertura en el ciclo de entrega.
2. Según la forma de ejecutar el proceso de producción: se trabaja por ritmo de producción.
3. Según el elemento a optimizar: se tratan de optimizar los medios de trabajo y el ciclo de producción o servicio.

Se definió el tipo de sistema contra ritmo de producción por tener que garantizar un ritmo dado de salida de la producción final, además, es característico de la producción masiva, donde el conjunto de puestos de trabajo están cargados durante un tiempo prolongado con la misma producción, por lo que el objetivo del sistema es mantener determinado ritmo.

Analizados estos elementos se puede establecer la red logística del proceso como forma gráfica de representar el proceso tecnológico.<sup>5,6</sup> Esta red está conformada por las UBPC (Unidad de Básicas de Producción Cooperativa), las CPA (Cooperativas de Producción Agropecuaria) y las CCS (Cooperativas de Créditos y Servicios) como nodos iniciales y donde se concentra la materia prima del proceso; los centros de recepción (centros de limpieza y (o) centros de acopio) como nodos intermedios y el basculador del central azucarero como nodo final (figura 1).



## PRECISIÓN Y ENRIQUECIMIENTO DE LOS PROBLEMAS QUE AFECTAN LA GESTIÓN DE LA CADENA

Para este aspecto, se decidió utilizar como complemento la aplicación de una encuesta que abarcara las principales áreas del CAI relacionadas con la transportación de la caña.

Teniendo en cuenta que no toda la plantilla perteneciente a la empresa está relacionada con la transportación de la caña, se realizó una selección detallada por categoría ocupacional de los trabajadores que pudieran aportar en la identificación de los problemas fundamentales. A partir de esto se calculó el tamaño de la muestra a encuestar, y para ello se tomó como nivel de confianza el 95 % ( $\alpha = 0,05$ ) y un error absoluto  $d = 0,05$ .

Para la realización de las encuestas fue necesario crear un grupo de trabajo teniendo en cuenta la distancia que separa a las unidades que intervienen en la transportación de la caña y el tamaño de la muestra seleccionada. Esta selección fue basada en la experiencia y el conocimiento de los especialistas entrevistados, que permitiera aportar elementos al estudio; además, con antelación recibieron una explicación acerca del objetivo del estudio que posibilitara aumentar su motivación.

TABLA 1 Tareas específicas de cada área dentro de la cadena		
Agricultura	Transporte	Industria
Producción de la caña Corte, alza y tiro de la caña hasta los centros de recepción	Preparación y limpieza de la materia prima Transporte de la materia prima hasta la industria	Procesamiento industrial de la caña Fabricación de azúcar

Después de concluido el análisis de la encuesta, teniendo en cuenta la complejidad y características del trabajo a realizar, se decidió crear una comisión de expertos que ayudará en la selección de los problemas fundamentales que afectan a gestión de la transportación de la caña, aplicando así algunos métodos de trabajo en grupo como la tormenta de ideas (*Brainstorming*).

Tomando como base el resultado de las encuestas aplicadas los expertos determinaron los problemas que afectan la transportación de la caña.

Para la determinación de los problemas de mayor importancia relativa que afectan la transportación de la caña, de conjunto con la comisión de expertos se empleó el trabajo en grupos y después de un análisis exhaustivo se decidió reducir el número de problemas a los cinco relacionados a continuación:

A. Sistema de suministro de materiales y recursos insuficientes e ineficientes.

B. Desaprovechamiento de las capacidades disponibles.

C. Deficiente aplicación de los mantenimientos a los equipos destinados a la transportación.

D. Incumplimiento de los plazos de entrega de caña, establecidos para su cliente inmediato, en la cadena de transporte.

E. Bajo rendimiento de la caña por caballería.

Seguidamente se realizó un análisis del peso específico de cada problema detectado, que permitiera establecer un orden de prioridad, para lo cual se empleó la puntuación, en una escala de uno a cinco donde se le atribuye una importancia reciente, lo que implica una mayor importancia al cinco, y una menor importancia al uno.

## MODELO MATEMÁTICO PARA OPTIMIZAR EL TRANSPORTE DE LA CAÑA DE AZÚCAR

Se considera necesario el empleo de un modelo económico-matemático de la programación multicriterio para proponer la solución óptima para la transportación de la caña de esta empresa, teniendo en consideración que se trata de una decisión que requiere de evaluar varios criterios de desempeño y no de un solo objetivo, se utilizó la programación multimeta.<sup>7</sup>

### Planteamiento del modelo

#### Índices

i: Caña i = 1;2 1: manual, 2: mecanizada

j: Medios de transporte j = 1;4

1: Carretas de bueyes

2: Carretas de tractor

3: Camión tradicional con remolques

4: Kamaz con remolques

#### Variable de decisión

$X_{ij}$ : Cientos de arrobas (@) de caña del tipo  $i$  a transportar en el medio  $j$ .

$X_{id}$ : Variable de desviación de las horas dedicadas a la transportación de la caña del tipo  $i$ .

$X_{id}$ : Variable de desviación de los cientos de arrobas (@) de caña total del tipo  $i$  a transportar.

$Y_{ij}$ : Número de viajes de caña  $i$  en el medio  $j$ .

#### Parámetros

$P_{ij}$ : Horas del equipo  $j$  por cientos de arrobas @ de caña  $i$  a transportar.

$P_{ei}$ : Peso específico de la caña  $i$  (@ / m<sup>3</sup>).

$C_{vj}$ : Capacidad volumétrica del medio (m<sup>3</sup>).

$E_j$ : Cantidad de equipos utilizados del tipo  $j$ .

$C_{cj}$ : Capacidad de carga del equipo  $j$  (100@).

$P_{dj}$ : Fondo de tiempo productivo disponible para el equipo  $j$  (hora).

$D_{ij}$ : Distancia media del centro de recepción al bloque de corte.

$V_{tj}$ : Velocidad técnica del medio  $j$ .

#### Funciones objetivos

1. Mín  $Z = \sum$  Variables de desviación

2. Max  $Z_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m X_{ij}$  Caña a transportar (cientos de arrobas)

3. Mín  $Z_2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_{ij} \cdot X_{ij}$  Tiempo de transportación (horas)

4. Mín  $Z_3 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m Y_{ij}$  Cantidad de viajes

5. Max  $Z_4 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m X_{ij} / P_{ei} \cdot 1 / C_{vj} \cdot E_j$  Utilización de la capacidad volumétrica

#### Restricciones

1.  $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m X_{ij} \leq \text{Max @}$

2.  $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m X_{ij} \geq \text{Min @}$

3,4,5,6.  $\sum_{i=j}^n (D_{ij} \cdot Y_{ij} / V_{tj}) + X_{id} = \text{Fondo de tiempo } E_j$

7,8.  $\sum_{j=1}^m X_{ij} + X_{id} = @ \text{ corte } i$

$$9,10,11,12. Y_{ij} = X_{ij} / C_{cj} \cdot E_j$$

$$13,14,15,16. X_{ij} \leq \text{Max } @$$

## TOMA DE DECISIONES UTILIZANDO EL PARADIGMA DECISIONAL MULTICRITERIO

Un modelo multimeta es una variante del paradigma decisional multicriterio a emplear, pero en cualquier caso debe seguirse como metodología la planteada por Barba-Romero *et. al.*<sup>2</sup>

El proceso comienza generalmente por una discusión con el o los mandantes de las razones que hacen pensar en la necesidad del análisis multicriterio. Ello supone una previa sensibilización del mandante. También se puede dar el caso que sea un asesor quien recomiende la utilización del análisis multicriterio. De cualquier forma, en un primer momento el analista trabaja con el contexto de estudio y con el problema de decisión que se ha planteado.

Este primer contacto con el problema es importante para evaluar la viabilidad del trabajo e identificar bien los actores y la problemática de decisión. En esta fase se llega a la comprensión y la aceptación del marco de estudio y se termina con la designación de las personas que formarán parte del grupo de trabajo.

El segundo momento comienza con la generación de las alternativas y la construcción de los criterios, es decir, se trata de construir el modelo de decisión multicriterio, el cual quedará terminado al plantear su matriz de decisión. El modelo debe ser presentado a mandantes y decisores para su discusión y validación, pudiendo cambiar los criterios y las alternativas. En este momento se puede agregar nuevas alternativas, por cambios de criterios y (o) por un perfeccionamiento de las evaluaciones, lo que permitiría una mejora substancial del modelo.

Es importante, en esta etapa, valorar criterios que respondan al tratamiento medioambiental del objeto de estudio, sus impactos e implicaciones.

La siguiente etapa requiere de un papel activo del decisor para la elección del método de agregación, la recopilación de información sobre las preferencias del decisor. El analista necesita movilizar al decisor para determinar los pesos o cualquier otra información previa sobre las preferencias.

El proceso termina con un análisis riguroso de los resultados. Es el momento en que el analista precisa los límites de validez del modelo e incita al decisor a diversos estudios de sensibilidad.

## ANÁLISIS MULTICRITERIO DE LA CADENA DE CORTE, ALZA Y TIRO DE LA CAÑA DE AZÚCAR

Para la modelización multicriterio del problema objeto de estudio se parte del planteamiento de la necesidad del análisis

multicriterio para la gestión de la mencionada cadena y su comprensión por el personal del MINAZ.

Es necesario evaluar con múltiples criterios el desempeño de la cadena logística de corte, alza y tiro de la caña de azúcar a fin de elevar su eficacia integral y de esta forma ubicar la caña en el basculador del central, en el menor tiempo posible, con mayor calidad y en la cantidad necesaria; lo que conlleva a que se eleven los volúmenes de azúcar a producir al aumentar los rendimientos de la caña y el aprovechamiento de las capacidades.

Con estos elementos se forma el grupo de trabajo que debe estar integrado por personal de todas las áreas, incluyendo especialistas del CITMA -fundamentalmente en medio ambiente- A continuación se deben definir las alternativas a evaluar y que deben estar dadas por las diferentes formas en que se puede organizar la cadena de acuerdo con la distribución de los recursos de cualquier índole que intervienen en la ejecución de las funciones de la cadena. Con las alternativas definidas es necesario modelar los criterios, proceso que puede ser aplicado buscando un desarrollo sustentable de la actividad.<sup>8,9</sup>

Por ello los criterios se agrupan en tres grandes categorías:

- Eficiencia económica:
  - Razón costo-beneficio.
  - Alta productividad.
  - Frescura de la caña.
- Calidad ambiental:
  - Reducir pérdidas del suelo.
  - Reducir contaminación del suelo y del aire.
  - Aumentar los beneficios del suelo.
- Impacto social:
  - Mejora de las condiciones de trabajo.
  - Incremento de los beneficios sociales.

En el caso de la calidad ambiental se tiene en cuenta un estudio de CELADE sobre las interrelaciones: población, desarrollo y medio ambiente<sup>9</sup> donde se analizan las interrelaciones que tienen alcance regional y local como la degradación del suelo y la contaminación del aire.

Las categorías antes mencionadas se tratarán a continuación de forma independiente.

### Razón costo-beneficio

La forma en que se organice y gestione la cadena logística de corte, alza y tiro de la caña de azúcar incide en los costos de proceso y por ende en los resultados que de su funcionamiento se puedan producir. Es por ello que la alternativa a seleccionar debe ser aquella que menor costo total genere y mayores volúmenes de caña haga llegar al basculador del central, en el momento oportuno.

### Alta productividad

La productividad de los recursos que intervienen en la cadena (entiéndase macheteros, equipos de corte, alza y tiro, personal de aseguramiento, etc.), incide directamente en el volumen y calidad de la caña que recibe el central para su molida, por lo que la misma debe ser maximizada.

### Frescura de la caña

Mientras mayor frescura tenga la caña que se muele, mayores rendimientos en azúcar habrá, lo que se traduce en mayores volúmenes de azúcar a obtener.

### Reducir pérdidas del suelo

La minimización de los recorridos en el campo de los medios de corte, alza y tiro reduce los niveles de compactación del suelo o que incide directamente en la capacidad de drenaje del terreno y influye en la disminución de la posibilidad de desertificación. También se debe minimizar la quema de caña pues esta favorece a erosión de la superficie desnuda de los suelos.

### Reducir contaminación del suelo y del aire

Es necesario cortar la mayor cantidad de caña verde pues la quema de la caña produce:

- Afectaciones respiratorias producto del humo (el humo contiene dióxido de silicio que irrita las vías respiratorias).
- Evaporización de productos químicos usados.
- Lanzamiento a la atmósfera de grandes cantidades de monóxido y dióxido de carbono, hollín y otros compuestos químicos.
- Descomposición rápida de la materia orgánica y evaporación del agua que produce bajos rendimientos agrícolas.

### Aumentar los beneficios del suelo

El corte de caña verde beneficia el suelo con una cantidad apreciable de material orgánico, además de disminuir la contaminación atmosférica. Asimismo constituye una fuente de abonos orgánicos y mantiene el equilibrio biológico de parásitos y lepradores.

### Mejora de las condiciones de trabajo

El corte de caña verde mejora las condiciones y la salud de los cortadores. Una buena organización del corte, alza y tiro reduce los traslados innecesarios del personal de las distintas actividades.

La minimización de las distancias de transportación, también influye en una mejora de las condiciones de trabajo y reduce la probabilidad de riesgo de accidentes laborales.<sup>10</sup>

### Incremento de los beneficios sociales

El análisis multicriterio de la cadena logística de corte, alza y tiro de la caña de azúcar aporta desde el punto de vista social resultados importantes vinculados todos con un mejoramiento de la gestión de la cadena de corte, alza y tiro de la caña de azúcar, que se raducen en un mejor aprovechamiento de la caña, la reducción de las pérdidas y en consecuencia, una mejor utilización de la capacidad instalada en los centrales, así como un mejor recobrado y rendimiento en azúcar, repercutiendo ello en mayores ingresos tanto en moneda nacional como en moneda libremente convertible, que pueden destinarse a la satisfacción de las necesidades de la población y a la recuperación económica del país.

La actividad de la cadena proporciona, además una fuente de materia prima para la elaboración de alimento animal (con todos los beneficios sociales y económicos que ofrece la ganadería) y a producción de energía con vistas a reducir el déficit energético del país.

Como es lógico suponer todos estos criterios simultáneamente no pueden ser optimizados, pues como se puede apreciar algunos de ellos son contradictorios, entran en conflicto, por lo que el análisis multicriterio busca una solución que logre un equilibrio en todos ellos.

Otro elemento importante a analizar aquí, es la diversidad de intereses entre los miembros del grupo, por lo que el análisis multicriterio tiene que buscar un consenso entre estos. Es por ello que una vez que se haya evaluado cada alternativa para cada criterio se debe pasar a determinar el peso de cada criterio para

realizar la evaluación. En este proceso pueden surgir nuevas alternativas y eliminarse algunas de ellas.

Llegado al consenso se aplica el o los métodos de agregación para llegar a la mejor alternativa, es decir, a la mejor forma de organizar la cadena de corte, alza y tiro de la caña de azúcar y finalmente realizar un análisis de sensibilidad de la solución obtenida.

Por último, es necesario hacer hincapié en la importancia de la capacitación del personal que estará involucrado en el proceso de toma de decisiones debido a lo novedoso que es este campo dentro de la teoría de la decisión, donde las investigaciones que se han realizado en Cuba, en esta temática son del ámbito académico.

## CONCLUSIONES

1. Las técnicas y modelos de la investigación de operaciones permiten apoyar la toma de decisiones logísticas.
2. El vínculo proveedores y clientes afecta el suministro material lo cual influye negativamente en el buen desempeño de la transportación de la caña de azúcar.
3. Las estrategias de trabajo se basan en la experiencia del personal encargado de su elaboración lo cual le resta objetividad a las mismas.
4. El principal problema que afecta la transportación de la caña lo constituye su bajo rendimiento por caballería.
5. Se obtuvo un modelo de programación multimeta que permite evaluar la transportación de la caña de azúcar valorando varios criterios de desempeño. □

## REFERENCIAS

1. **GARCÍA HUERTA, JOSÉ RAMÓN:** *Teoría de la decisión*, Edición de la Ciudad de Matanzas, 1990.
2. **BARBA-ROMERO CASILLAS, SERGIO:** *Decisiones multicriterio. Fundamentos teóricos y utilización práctica*, Servicio de Publicaciones de la UAH de la Universidad de Alcalá, Colección de economía de la universidad de Alcalá, España, 1997.
3. **PETROSIAN, L. A. et al.:** "Modelo matemático de planificación operativa para la recolección de caña", *Ingeniería Industrial*, No. 1, pp. 78-87, Ciudad de La Habana, 1984.
4. **ACEVEDO SUÁREZ, JOSÉ A.:** *Proyectos de organización de las empresas industriales*, Ed. ISPJAE, Ciudad de La Habana, 1986.
5. **BALLOU, RONALD H.:** *Logística empresarial, control y planificación*, Ediciones Díaz de Santos, Madrid, 1991.
6. **COMAS PULLES, RAIMUNDO:** "La Logística, origen, desarrollo y análisis sistémico", *Logística Aplicada*, No. 1, pp. 3-9, Ciudad de La Habana, 1996.
7. **GALLAGER, CHARLES A. et al.:** *Métodos cuantitativos para la toma de decisiones en administración*, McGraw-Hill, México, 1982.
8. **MONKS, JOSEPH G.:** *Administración de operaciones* McGraw-Hill Interamericana, México, 1991.
9. **RODRÍGUEZ, V. J.:** *Población, medio ambiente y desarrollo en América Latina*, p. 31, CELADE, Santiago de Chile, 1995.
10. **GARCÍA MARRERO, AGUSTÍN, et al.:** *CAI Dirección de los complejos agroindustriales*. Ed. de Ciencias Sociales, Ciudad de La Habana, 1983.