

# La Estabilidad en la composición racional del sistema cosecha-transporte-recepción de la caña de azúcar



## The Stability in Rational Composition of the Sugarcane Harvest-Transport-Reception System

CU-ID: 2177/v31n2e03

✉ Yanara Rodríguez-López\*, ✉ Yanoy Morejón-Mesa, ✉ Yolanda R Jiménez-Álvarez

Universidad Agraria de La Habana Fructuoso Rodríguez Pérez, Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

**RESUMEN:** La presente investigación se realizó en la Unidad Empresarial de Base Héctor Molina Riaño, con el objetivo de determinar la organización racional del sistema cosecha-transporte-recepción de la caña de azúcar, mediante la integración de modelos matemáticos, que garanticen la estabilidad del flujo del sistema. Se determinó la conformación racional de la brigada cosecha transporte empleando los métodos: programación lineal, teoría de cola para una estación única de servicio y para estaciones en cascadas. Al analizar la estabilidad de las composiciones con el modelo de cadenas de Markov se tiene que la variante más estable es cuando se emplea la teoría de colas en cascadas al trabajar en campos de 75 t/ha, con dos Cosechadoras CASE IH 8800 y cuatro Tractores BELARUS 1523 + cuatro remolques autobasculantes VTX 10000, cuatro agregados HOWO SINOTRUCK + dos remolques y tres centros de recepción con una probabilidad de 53,79% de que no se interrumpa el ciclo y un costo por paradas del sistema de 33,05 peso/h, siendo posible reducir los costos por paradas en más del 30%, observándose una marcada influencia al incrementarse el número de centros de acopio.

**Palabras clave:** organización, teoría de cola, cadenas de Markov.

**ABSTRACT:** The present investigation was carried out in “Héctor Molina Riaño” Base Business Unit, with the objective of determining the rational organization of the sugarcane harvest-transport-reception system, through the integration of mathematical models, which guarantee the stability of the flow in the system. The rational conformation of the harvest-transport-reception-system was determined using the following methods: linear programming, queuing theory for a single service station and for stations in cascades. When analyzing the stability of the compositions with the Markov chain model, it is found that the most stable variant is when the queuing theory is used in cascades when working in fields of 75 t/ha, with two CASE IH 8800 Harvesters and four Tractors BELARUS 1523 + four VTX 10000 dump trailers, four HOWO SINOTRUCK aggregates + two trailers and three reception centers with a probability of 53.79% that the cycle will not be interrupted and a cost of system stops of 33.05 peso/h, being possible to reduce the costs by stops in more than 30%, observing a marked influence when increasing the number of collection centers

**Keywords:** Organization, Queuing Theory, Markov Chain, System.

### INTRODUCCIÓN

La agricultura de los tiempos actuales exige una óptima explotación de sistemas mecanizados; la concentración y la especialización de la producción, y el incremento de la productividad en el trabajo, con

base en los rendimientos agrícolas, la disminución de los costos de producción, la obtención de nuevas variedades de plantas, así como la mecanización y automatización científica del trabajo (Aguilera & Fonseca, 2013).

\*Autora para la correspondencia: Yanara Rodríguez-López, e-mail: [yanita@unah.edu.cu](mailto:yanita@unah.edu.cu)

Recibido: 09/05/2021

Aceptado: 14/03/2022

En el proceso de cosecha transporte y específicamente cuando se habla de caña de azúcar, el análisis del nexo entre los eslabones cosecha y transporte, requiere el estudio de un sistema de espera en el que es necesario balancear dicha relación, de tal forma que la pérdida por estas causas sea mínima. En el trabajo de la combinada cañera ocurre que esta espera por el medio de transporte o el transporte espera por esta para recibir la carga, además de la espera en el centro de recepción para el proceso de descarga. Como resultado de la pérdida de tiempo durante la espera en la cola, se pierden cuantiosos medios materiales, capacidades productivas y energía humana. Este tipo de fenómeno es característico y está asociado al desarrollo de las fuerzas productivas. Para disminuir las colas existe un medio racional: estudiar las leyes de formación de las colas; aprender a calcular el número necesario de unidades de servicio y sobre esta base, organizar el trabajo de los sistemas de servicio (Suárez, 1999a, 1999b). Para ello resulta imprescindible la aplicación de la modelación matemática en la toma de decisiones científicamente fundamentadas, ajenas a todo tipo de improvisaciones, que permitan justificar, por ejemplo, los niveles de producción, empleo de los medios técnicos y recursos materiales cuya combinación produzca la máxima eficiencia.

Entre los métodos y modelos matemáticos que se han empleado para determinar la organización racional del proceso cosecha-transporte se pueden citar, entre otros: el método determinista, cadenas de Márkov, la Programación Lineal y la Teoría de Servicio Masivo o de Cola (Rodríguez et al., 2015; Morejón, 2012; Fonollosa et al., 2002).

Un modelo determinístico es un modelo matemático donde las mismas entradas producirán invariablemente las mismas salidas, no contemplándose la existencia del azar ni el principio de incertidumbre. La inclusión de mayor complejidad en las relaciones, con una cantidad mayor de variables y elementos ajenos al modelo determinístico, hará posible que éste se aproxime a un modelo probabilístico o de enfoque estocástico, aplicado al tema de esta investigación, posibilita determinar la cantidad de medios de transporte para un grupo de cosechadoras, a partir de la productividad de estos eslabones del sistema cosecha-transporte, con la limitante de que no considera el carácter probabilístico de la interrelación entre los eslabones productivos (Morejón, 2012; Rodríguez, 2007).

Las cadenas de Márkov, que recibe su nombre del matemático ruso Andrei Andreevitch Márkov (1856-1922), es una serie de eventos, en la cual la probabilidad de que ocurra un evento depende del evento inmediato anterior. En efecto, las cadenas de este tipo tienen memoria, "recuerdan" el último evento y esto condiciona las posibilidades de los eventos futuros. Esta dependencia del evento anterior distingue

a las cadenas de Márkov de las series de eventos independientes (Sánchez, 2016; Ibe, 2013; Hermanns, 2002a; 2002b; Kijima, 1997).

Para el análisis de la estructura racional del complejo cosecha-transporte de la caña de azúcar empleando el modelo de Márkov, se parte de que es un proceso estocástico, pues varía en el tiempo de una manera probabilística, lo cual no es más que una sucesión de observaciones y los valores de estas no se pueden predecir exactamente (Hillier & Liberman, 2010).

El caso más simple de un proceso estocástico en que los resultados dependen de otros, ocurre cuando el resultado en cada etapa sólo depende del resultado de la etapa anterior y no de cualquiera de los resultados previos. Tal proceso se denomina proceso de Márkov o cadena de Márkov (una cadena de eventos, cada evento ligado al precedente). Como se menciona antes, estas cadenas tienen memoria, recuerdan el último evento y eso condiciona las posibilidades de los eventos futuros (Ching 2006; Bini et al., 2005). Esto justamente las distingue de una serie de eventos independientes como el hecho de tirar una moneda. Las cadenas de Márkov tienen tres propiedades básicas:

1. La suma de las probabilidades de los estados debe ser igual a 1.
2. La matriz de transición debe ser cuadrada.
3. Las probabilidades de transición deben estar entre 0 y 1.

Para el estudio de las cadenas de Márkov, deben tenerse en cuenta algunos conceptos claves como los siguientes:

*Estados:* El estado de un sistema en un instante  $t$  es una variable cuyos valores solo pueden pertenecer al conjunto de estados en el sistema. El sistema modelado por la cadena, por lo tanto, es una variable que cambia con el valor del tiempo, cambio que se llama transición.

*Matriz de transición:* Los elementos de matriz representan la probabilidad de que el estado próximo sea el correspondiente a la columna si el estado actual es el correspondiente a la fila.

Los complejos tecnológicos están formados de máquinas y agregados que cuentan con diferentes niveles de fiabilidad. Para lograr un alto nivel de fiabilidad del complejo, se deben buscar máquinas y agregados, cuyo nivel de fiabilidad sea alto. Cuando esto no es posible de lograr, entonces la capacidad de trabajo del complejo se mantiene mediante la introducción de una cantidad superior de las máquinas (las reservas), disminuyendo el régimen de trabajo de las máquinas, organizando las actividades de mantenimientos técnicos y reparaciones, o a través de la combinación de estas medidas. Es necesario tener en cuenta, que estas medidas se traducen en un

aumento del costo de explotación, este a su vez depende de la fiabilidad del complejo, principalmente de la cantidad y la complejidad de los fallos y de la mantenibilidad que se caracteriza por el costo de eliminación de los fallos (Amú, 2010; Bolch et al., 2006; Fernández & Delgado, 1989; Fernández & Álvarez, 1988; Conlisk, 1976).

### MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en la Unidad Empresarial de Base Héctor Molina Riaño, con el objetivo de determinar la organización racional de la brigada cosecha-transporte de la caña de azúcar, mediante la integración de modelos matemáticos, que garanticen la estabilidad del flujo del sistema. En la [Tabla 1](#) se muestran los rendimientos agrícolas de los campos evaluados, así como los medios técnicos empleados para la cosecha y el transporte especificándose la capacidad de carga de estos últimos, así como las distancias a transportar en total y según el tipo de camino.

Se determinó la conformación racional de la brigada cosecha transporte empleando los métodos: programación lineal, teoría de cola, para una estación única de servicio y para estaciones en cascadas, analizando la estabilidad de las composiciones con el modelo de cadenas de Markov.

La implementación del modelo de Márkov se basa en la existencia de procesos estocásticos, lo cual no es más que la sucesión de observaciones  $X_1, X_2, \dots, X_n$  (Rodríguez, 2019). Los valores de estas observaciones no se pueden predecir exactamente, pero se pueden especificar las probabilidades para los distintos valores posibles en cualquier instante de tiempo, siendo  $X_1$ : variable que define el estado inicial del proceso y  $X_n$ : variable que define el estado del proceso en el instante de tiempo  $n$ .

Para cada posible valor del estado inicial  $E_1$  y para cada uno de los sucesivos valores  $E_n$  de los estados  $X_n$ ,  $n = 2, 3, \dots$ , se debe cumplir que:

$$P(X_{n+1} = E_{n+1} | X_1 = E_1, X_2 = E_2, \dots, X_n = E_n) \quad (1)$$

Dado que la cadena de Márkov es un proceso estocástico en el que si el estado actual  $X_n$  y los estados previos  $X_1, \dots, X_{n-1}$  son conocidos, entonces:

La probabilidad del estado futuro  $X_{n+1}$  no depende de los estados anteriores  $X_1, \dots, X_{n-1}$ , y solamente depende del estado actual  $X_n$

Es decir:

Para  $n = 1, 2$ , y para cualquier sucesión de estados  $E_1, \dots, E_{n+1}$

$$P(X_{n+1}=E_{n+1} | X_1=E_1, X_2=E_2, \dots, X_n=E_n) = P(X_{n+1}=E_{n+1} | X_n=E_n) \quad (2)$$

Dentro de los modelos de Márkov, el modelo finito de Márkov, tiene una elevada importancia para el análisis de la estabilidad de procesos en flujo, dado que es una cadena para la que existe sólo un número finito  $k$  de estados posibles  $E_1, \dots, E_k$  y en cualquier instante de tiempo la cadena está en uno de estos  $k$  estados (Rodríguez, 2019).

Las ventajas del empleo de las cadenas de Márkov para la determinación de la estabilidad del complejo de máquinas durante la cosecha de caña de azúcar son:

- Permite conocer la estabilidad del proceso a partir de la estabilidad de cada parte componente del mismo;
- La estabilidad de cada parte del proceso se puede modelar para que se condiciones a lo que provocaría el paro del proceso;
- Es una forma sencilla y útil de dependencia entre las variables aleatorias que forman el proceso estocástico, analizándose la transición de un estado a otro como un proceso estocástico
- Al determinar los costos por paradas tiene en cuenta la probabilidad de paro del sistema.
- El estado en  $t + 1$  sólo depende del estado en  $t$  y no de la evolución anterior del sistema

Estos aspectos posibilitan conocer la probabilidad de transición de un estado a otro según Rodríguez (2019), esta probabilidad en su forma condicionada, se determina mediante la siguiente expresión:

$$P(X_{n+1}=E_j | X_n=E_i) \quad (3)$$

De igual forma se puede analizar la probabilidad de transición estacionaria:

Una cadena de Márkov tiene probabilidades de transición estacionarias, si para cualquier par de estados  $E_i$  y  $E_j$  existe una probabilidad de transición  $p_{ij}$  tal que:

**TABLA 1.** Medios técnicos empleados en la cosecha transporte, según rendimiento agrícola y distancia a transportar

Ra, t/ha	70	65	75	90	22,8	
Agregado cosecha	2 cosechadoras CASE IH 8800 y 2 Tractores BELARUS 1523 + remolque autobasculantes VTX 10000 (10 t).					
Agregado transporte	KAMAZ + 1 remolque		HOWO SINOTRUCK + 2 remolques			
Qn, t	20			60		
Distancia, km	20	18	20	24	18	
Distancia, km	Asfalto	7	6	7	9	6
	Terraplén	13	12	13	15	12

$$P(X_{n+1} = E_j | X_n = E_i) = p_{ij} \text{ para } i = 1, 2, \dots \quad (4)$$

Para el mejor análisis de la cadena de Márkov, según [Rodríguez \(2019\)](#), se establece la Matriz de transición, dentro de esta se pueden plantear:

- **Matriz estocástica:**

Es una matriz cuadrada cuyos elementos son no negativos y tal que la suma de los elementos de cada fila es igual a 1.

- **Matriz de transición en un solo paso:**

Dada una cadena de Márkov con k estados posibles  $E_1, \dots, E_k$  y probabilidades de transición estacionarias.

$$Sip_{ij} = P(X_{n+1} = E_j | X_n = E_i) \rightarrow P = \begin{pmatrix} p_{11} & \dots & p_{1k} \\ p_{12} & \dots & p_{2k} \\ \vdots & & \vdots \\ p_{k1} & \dots & p_{kk} \end{pmatrix} \quad (5)$$

La matriz de transición P de cualquier cadena de Márkov finita con probabilidades de transición estacionarias es una matriz estocástica ([Rodríguez, 2019](#)).

Según [Rodríguez \(2019\)](#) el modelo de Márkov, partiendo de sus fundamentos y aplicaciones, se puede emplear en la conformación de la brigada cosecha-transporte-recepción de la caña de azúcar, para, a partir de la probabilidad del paso de un eslabón a otro, determinar la estabilidad del sistema, o sea, se emplea como un método de conformación adicional, que permite con varias posibilidades de estructuras del complejo cosecha-transporte -recepción de la caña de azúcar, determinar cuál es la más estable. En el caso particular de esta investigación, para establecer el modelo se parte de la definición de los estados que forman el proceso que son: caña de azúcar en cosecha  $E_c$ , caña de azúcar en transporte  $E_t$  y caña de azúcar en el centro de recepción  $E_r$ , definiéndose a la caña de azúcar como el elemento que transita, pues pasa de estar en el campo a ser cortada, luego se transporta fuera del campo y hacia el central, donde es descargada, clasificada y procesada. Luego de especificados los estados se define la cantidad de medios de transporte necesarios y se combina con los criterios de probabilidad de transición provenientes de la matriz elaborada.

Con el objetivo de formar la matriz de transición se debe determinar la probabilidad de transición o no transición de un estado a otro a través de las tablas de Poisson como se muestra en la expresión (6)

$$P_{t(x)} = \frac{e^{-\lambda} \lambda^n}{x!} \quad (6)$$

La probabilidad de transición del estado caña en cosecha al de caña en transporte y de esta a ser descargada en el centro de recepción va a estar definida, partiendo de que se cuenta con los insumos necesarios para la correcta explotación de los mismos,

por la fiabilidad de los medios técnicos que intervienen en el proceso ([Rodríguez, 2019](#)).

Para la cosecha se determina a partir del coeficiente de disponibilidad técnica de la cosechadora, debido a que, lo que define el paso del estado caña en cosecha al transporte depende de que funcione la cosechadora:

$$\lambda_c = n_c * k_{dc} \quad (7)$$

donde:

$n_c$  - número de cosechadoras;

Para el transporte se tiene en cuenta la disponibilidad técnica de los mismos, pues es lo que define que la caña pueda pasar del estado de transporte a caña en el centro de recepción:

$$\lambda_t = n_t * k_{dt} \quad (8)$$

donde:

$n_t$  - número de camiones ([Rodríguez, 2019](#)).

Para los usuarios de la técnica agrícola un gran interés lo presentan los índices complejos de la fiabilidad, que permiten evaluar a la máquina no sólo desde el punto de vista de la factibilidad económica de su compra, sino también para determinar los gastos relacionados con los mantenimientos técnicos, reparaciones y paradas por causas técnicas de la misma. De estos índices complejos de la fiabilidad el más empleado es el coeficiente de disponibilidad técnica  $K_d$ , que también se utiliza como uno de los índices de clase mundial para el control de la gestión del mantenimiento tanto en la agricultura, en la industria como en otras esferas de producción ([Shkiliova, 2004](#)).

A partir del cálculo de la esperanza matemática del funcionamiento de los medios técnicos en los estados caña en cosecha y caña en transporte ( $\lambda_c$  y  $\lambda_t$ ) determinada por las expresiones 5 y 6 se establece la probabilidad de transición empleando las tablas de Poisson donde la x es el valor de número de medios técnicos en cada estado.

Para la determinación de la esperanza matemática del funcionamiento de los medios técnicos en el estado caña en recepción  $\lambda_{cr}$ , se realizan 15 observaciones que se promediaron determinando el número de camiones en espera para entregar el producto ( $n_{cer}$ ) y el total de camiones en el centro de recepción ( $n_r$ );

$$P_{nt} = \frac{n_{cer}}{n_r} \quad (9)$$

Teniendo en cuenta las probabilidades de no transición en cada estado se puede obtener las probabilidades de transición:

$$P_t = 1 - P_{nt} \quad (10)$$

Luego se construye la matriz de transición mostrada en la [expresión 11](#) ([Rodríguez, 2019](#)). El producto de las probabilidades de transición indica la probabilidad de que funcione la cosecha en flujo, lo que permite determinar de las soluciones propuestas en cada modelo, cual hará que el sistema funcione con menos paradas, o sea, más estable.

$$\begin{matrix} E_c & E_t & E_r \\ E_c \begin{pmatrix} P_{nt} & P_t & 0 \\ E_t \begin{pmatrix} 0 & P_{nt} & P_t \\ E_r \begin{pmatrix} P_t & 0 & P_{nt} \end{pmatrix} \end{pmatrix} \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (11)$$

Basado en el análisis anteriormente realizado se puede obtener una estimación de la afectación económica por la rotura del ciclo  $C_{pet}$  a partir de la determinación de los costos por paradas en cada elemento del ciclo y la probabilidad de que no se transite de un estado a otro del mismo (Rodríguez, 2019).

$$C_{pet} = (C_{pc} * P_{ntc}) + (C_{pt} * P_{ntt}) + (C_{pcr} * P_{nt_r}); \text{peso/h} \quad (12)$$

donde:

$C_{pc, pt \text{ y } cr}$  - costo por parada en la cosecha, transporte y centro de recepción del central, respectivamente; peso/h

En cuanto a los costos por paradas en el centro de recepción se tienen en cuenta el salario de los trabajadores vinculados al proceso, los combustibles y lubricantes consumidos en el proceso, así como los mantenimientos y la energía eléctrica consumida como se muestra en la [expresión 13](#) (Rodríguez, 2019).

$$C_{pcr} = C_s \pm C_c \pm C_{mr} \pm C_e, \text{peso/h} \quad (13)$$

## DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Con el fin de determinar cuál de los modelos matemáticos utilizados ofrece la conformación de la brigada más estable y económicamente factible en la determinación de la composición racional de los medios que intervienen en el proceso, se utiliza el modelo de Márkov, para lo que se definieron tres estados para su resolución, que fueron la caña en cosecha  $E_c$  (subsistema cosecha), la caña en transporte  $E_t$  (subsistema transporte) y la caña en recepción  $E_r$  (subsistema recepción). Para la aplicación de este modelo, a través del sistema SACRCCT-CA versión 1.0, se determinaron las esperanzas matemáticas ( $\lambda_m$ ) para el estado de caña en cosecha, en transporte y recepción (este último solo para el modelo de teoría de cola con estaciones consecutivas o en cascadas) necesarios para la obtención de los valores de no transición mediante las tablas de Poisson. Partiendo de la misma se determina la probabilidad de transición de los mismos. También se determinan los coeficientes de disponibilidad técnica de las cosechadoras, los medios de transporte y el centro de recepción.

En la [Tabla 2](#) se muestran las matrices de transición conformadas y en la misma se puede observar que a medida que aumenta el número de medios técnicos (cosechadoras, autobasculantes, camiones y centros de recepción), al no variar mucho los coeficientes de disponibilidad técnica, aumenta la probabilidad de transición, por lo que disminuye la posibilidad de que

se interrumpa el flujo del proceso. En el estado de caña en cosecha y caña en recepción se analizaron juntos los resultados obtenidos empleando la programación lineal y la teoría de colas para una estación única de servicio debido a que en el caso de la cosecha coinciden los valores y en el caso del centro de recepción el criterio que se emplea para analizar la probabilidad de transición y no transición es el mismo. Como se puede observar en todas las matrices el valor de la probabilidad del paso de la caña desde el estado en cosecha al estado de recepción es nula, puesto que la caña tiene que obligatoriamente ser transportada, así mismo, la probabilidad del paso de la caña de ser transportada al estado en cosecha es nula, pues una vez que se corta la caña pasa a ser transportada, similar situación sucede en el estado de caña en recepción, pues la caña una vez que llega al central no se devuelve.

Cuando se emplea la programación lineal (PL) en todas las variantes analizadas la probabilidad de pasar al estado de recepción es de 77%, existiendo una probabilidad de no hacerlo del 23%, lo que puede estar dado por rotura de la cosechadora o por falta de medios de transporte. De igual manera ocurre con el resto de los modelos en las demás variantes exceptuando las variantes II, IV y V, cuando se analiza la conformación de la brigada con el modelo de teoría de colas en cascadas que en ambos casos la probabilidad de transición es de 80,5%, siendo estos los más estables.

En el caso del estado transporte la probabilidad de transición hacia el centro de recepción está entre 75 y 80% para las variantes I, II y V cuando se emplea el método de teoría de colas en cascadas (TCc), y en la variante II en el resto de los modelos empleados. En los otros modelos y las variantes se encuentra entre 80 y 83%.

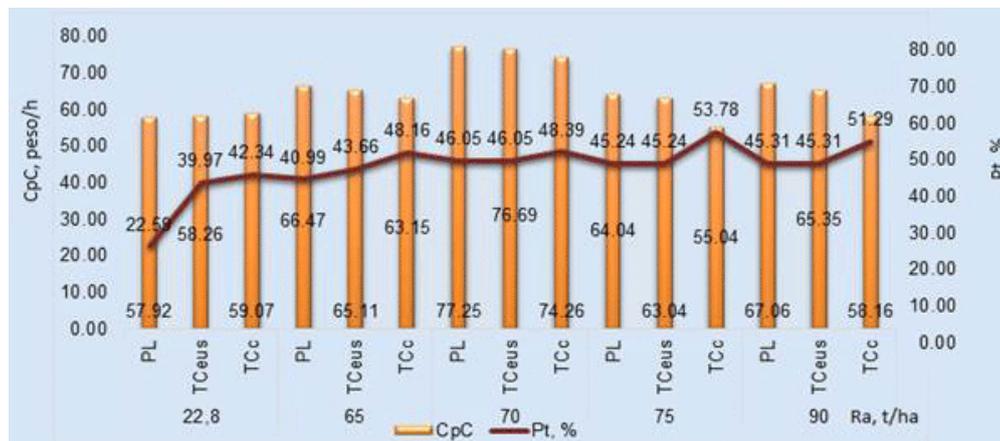
En el estado recepción en los modelos programación lineal y teoría de colas para una estación única de servicio (TCeus), así como en la variante I cuando se emplea la teoría de colas en cascadas la probabilidad de transición está entre 76 y 78%, siendo de 82% cuando se emplea el método de teoría de cola en cascadas en las variantes desde la II hasta la V.

Luego de tener definidas las matrices de transición se determinó la afectación económica por inestabilidad o fallo tecnológico de los diferentes ciclos que representan las diferentes conformaciones del complejo cosecha-transporte-recepción de la caña de azúcar, los mismos se pueden observar en la [Figura 1](#) y [Tabla 3](#).

En la **variante I**, la menor pérdida por paradas del sistema y mayor estabilidad se obtiene con la conformación propuesta por la teoría de colas en cascadas (dos cosechadoras CASE AUSTOFT IH 8800, dos BELARUS 1523+ VTX 10000, dos HOWO SINOTRUK+ dos REMOLQUES (cada uno) y dos

**TABLA 2.** Matrices de transición obtenida según el modelo matemático empleado

Modelo	Ra, t/ha	PL	TCeus	TCc
		$\begin{matrix} & E_c & E_t & E_r \\ E_c & \begin{pmatrix} 0,27 & 0,73 & 0 \\ 0 & 0,194 & 0,806 \\ 0,77 & 0 & 0,23 \end{pmatrix} \end{matrix}$	$\begin{matrix} & E_c & E_t & E_r \\ E_c & \begin{pmatrix} 0,27 & 0,73 & 0 \\ 0 & 0,17 & 0,83 \\ 0,77 & 0 & 0,23 \end{pmatrix} \end{matrix}$	$\begin{matrix} & E_c & E_t & E_r \\ E_c & \begin{pmatrix} 0,27 & 0,73 & 0 \\ 0 & 0,238 & 0,762 \\ 0,762 & 0 & 0,238 \end{pmatrix} \end{matrix}$
		$\begin{matrix} & E_c & E_t & E_r \\ E_c & \begin{pmatrix} 0,27 & 0,73 & 0 \\ 0 & 0,27 & 0,73 \\ 0,77 & 0 & 0,23 \end{pmatrix} \end{matrix}$	$\begin{matrix} & E_c & E_t & E_r \\ E_c & \begin{pmatrix} 0,271 & 0,729 & 0 \\ 0 & 0,223 & 0,778 \\ 0,77 & 0 & 0,23 \end{pmatrix} \end{matrix}$	$\begin{matrix} & E_c & E_t & E_r \\ E_c & \begin{pmatrix} 0,195 & 0,805 & 0 \\ 0 & 0,27 & 0,73 \\ 0,82 & 0 & 0,18 \end{pmatrix} \end{matrix}$
		$\begin{matrix} & E_c & E_t & E_r \\ E_c & \begin{pmatrix} 0,27 & 0,73 & 0 \\ 0 & 0,191 & 0,809 \\ 0,78 & 0 & 0,22 \end{pmatrix} \end{matrix}$	$\begin{matrix} & E_c & E_t & E_r \\ E_c & \begin{pmatrix} 0,27 & 0,73 & 0 \\ 0 & 0,191 & 0,809 \\ 0,78 & 0 & 0,22 \end{pmatrix} \end{matrix}$	$\begin{matrix} & E_c & E_t & E_r \\ E_c & \begin{pmatrix} 0,27 & 0,73 & 0 \\ 0 & 0,191 & 0,809 \\ 0,82 & 0 & 0,18 \end{pmatrix} \end{matrix}$
		$\begin{matrix} & E_c & E_t & E_r \\ E_c & \begin{pmatrix} 0,27 & 0,73 & 0 \\ 0 & 0,194 & 0,806 \\ 0,77 & 0 & 0,23 \end{pmatrix} \end{matrix}$	$\begin{matrix} & E_c & E_t & E_r \\ E_c & \begin{pmatrix} 0,27 & 0,73 & 0 \\ 0 & 0,194 & 0,806 \\ 0,77 & 0 & 0,23 \end{pmatrix} \end{matrix}$	$\begin{matrix} & E_c & E_t & E_r \\ E_c & \begin{pmatrix} 0,195 & 0,805 & 0 \\ 0 & 0,184 & 0,816 \\ 0,82 & 0 & 0,18 \end{pmatrix} \end{matrix}$
		$\begin{matrix} & E_c & E_t & E_r \\ E_c & \begin{pmatrix} 0,27 & 0,73 & 0 \\ 0 & 0,194 & 0,806 \\ 0,77 & 0 & 0,23 \end{pmatrix} \end{matrix}$	$\begin{matrix} & E_c & E_t & E_r \\ E_c & \begin{pmatrix} 0,27 & 0,73 & 0 \\ 0 & 0,194 & 0,806 \\ 0,77 & 0 & 0,23 \end{pmatrix} \end{matrix}$	$\begin{matrix} & E_c & E_t & E_r \\ E_c & \begin{pmatrix} 0,195 & 0,805 & 0 \\ 0 & 0,223 & 0,778 \\ 0,82 & 0 & 0,18 \end{pmatrix} \end{matrix}$



**FIGURA 1.** Costos por paradas y probabilidad de transición del sistema.

centros de recepción) con un costo mínimo por paradas ( $C_{pctrc}$ ) de 34,06 peso/h (10,77 y 0,91 peso/h menos que si se emplea la programación lineal y teoría de cola de única estación de servicio). Con esta conformación la probabilidad de transición de la caña de la cosecha al transporte es del 73%, del transporte a la recepción de 80,9% y de ser procesada en el centro de recepción de 76%, siendo la probabilidad de que se complete el ciclo de 42,34%.

En la **variante II** también el método que muestra mejores resultados en cuanto a estabilidad y mínimo de pérdidas económica es el de teoría de colas en cascadas (dos cosechadoras CASE AUSTOFT IH 8800, cuatro BELARUS 1523+ VTX 10000, dos HOWO SINOTRUK+ dos REMOLQUE (cada uno) y tres centros de recepción) con una pérdida por paradas del sistema de 32,74 peso/h (6,48 y 3,94 peso/h menos que si se emplea la programación lineal y teoría de

**TABLA 3.** Afectación económica de los modelos empleados

Ra, t/ha	Método Matemático	Cp, peso/h	Pt, %	Pnt	Cpctr, peso/h
22,8	PL	57,92	22,59	0,77	44,83
	TCeus	58,26	39,97	0,60	34,97
	TCc	59,07	42,34	0,58	34,06
65	PL	66,47	40,99	0,59	39,22
	TCeus	65,11	43,66	0,56	36,68
	TCc	63,15	48,16	0,52	32,74
70	PL	77,25	46,05	0,54	41,68
	TCeus	76,69	46,05	0,54	41,38
	TCc	74,26	48,39	0,52	38,33
75	PL	64,04	45,24	0,55	35,07
	TCeus	63,04	45,24	0,55	34,52
	TCc	55,04	53,78	0,46	25,44
90	PL	67,06	45,31	0,55	36,67
	TCeus	65,35	45,31	0,55	35,74
	TCc	58,16	51,29	0,49	28,33

cola de única estación de servicio). Con esta conformación la probabilidad de transición de la caña de la cosecha al transporte es del 80,5%, del transporte a la recepción de 73%, de ser procesada en el centro de recepción de 82% y de que se cumpla la cosecha en flujo de 48,16%.

Así mismo, en la **variante III** se obtienen los mejores resultados con el método matemático planteado siendo la conformación óptima de dos cosechadoras CASE AUSTOFT IH 8800, dos BELARUS 1523+ VTX 10000, cuatro KAMAZ+ un REMOLQUE (cada uno) y tres centros de recepción con una pérdida por paradas del sistema de 38,33 peso/h (3,35 y 3,05 peso/h menos que si se emplea la programación lineal y teoría de cola de única estación de servicio). Con esta conformación la probabilidad de transición del sistema es 48,39%, siendo la de la caña de la cosecha al transporte de 73%, del transporte a la recepción de 80,9% y de ser procesada en el centro de recepción de 82%.

En la **variante IV** se obtiene el mismo valor de pérdidas por paradas del sistema (25,54 peso/h) cuando se analiza con la programación lineal y la teoría de colas de estación única de servicio, disminuyendo las pérdidas a 9,53 y 8,98 peso/h cuando se emplea la variante de conformación resultante de aplicar la teoría de cola en cascadas que es de dos cosechadoras CASE AUSTOFT IH 8800, cuatro BELARUS 1523+ VTX 10000, cuatro HOWO SINOTRUK+ dos REMOLQUES (cada uno) y tres centros de recepción. Con esta conformación la probabilidad de transición de la caña en la cosecha al transporte es del 80,5%, del transporte a la recepción de 81,6% y de ser procesada en el centro de recepción de 82%, existiendo un 53,78% de probabilidad de que ocurra el proceso en flujo.

En la **variante V** el método que muestra las mínimas pérdidas por paradas del sistema es el de teoría de cola en cascadas con 28,33 peso/h por lo que

se recomienda que la brigada quede conformada por dos cosechadoras CASE AUSTOFT IH 8800, cuatro BELARUS 1523+ VTX 10000, tres HOWO SINOTRUK+ dos REMOLQUES (cada uno) y tres centros de recepción, siendo la probabilidad de transición del sistema de 51,29%, de que la caña pase de cosecha al transporte es de 73%, del transporte a la recepción de 77,8% y de ser procesada en el centro de recepción de 82%.

Como se observa en la [Figura 1](#) y la [Tabla 2](#), en todos los casos, cuando se emplea el método de teoría de cola en cascadas, se obtiene la mayor probabilidad de transición en todo el sistema, o sea, es más probable que se mantenga el ciclo, siendo las conformaciones más estables las que ofrece este método para campos de 75 y 90 t/ha (53,78 y 51,29% respectivamente) y en las que son menores las pérdidas por paradas del sistema.

En los campos de 22,8 t/ha de rendimiento agrícola estimado, la probabilidad de transición que arroja la solución empleando cualquier método es baja, siendo este otro elemento que pone en dudas la conveniencia de trabajar en campos agrícolas de rendimientos tan bajos.

Al analizar la conformación de la brigada cosecha-transporte-recepción que se utilizó en el proceso real, con la que arroja cada modelo matemático ([Figura 2](#)), se puede observar que en los campos de 22,8 t/ha se propone disminuir el número de agregados de transportes externos cuando se emplean los métodos de programación lineal y teoría de colas para estaciones únicas de servicio. Al trabajar en campos de 65 t/ha la diferencia radica en que con el método de teoría de colas para estaciones únicas se propone aumentar el número de medios de transportes externos a tres, mientras que al utilizar el método de teoría de colas en cascadas se propone aumentar el número de medios de transportes internos de dos a cuatro. En los campos de 65 t/ha de rendimiento agrícola estimado se

propone con todos los métodos duplicar el número de agregados de transportes externos, lo mismo sucede en los campos de 75 t/ha cuando se utiliza el método de teoría de colas y en los de 90 t/ha al utilizar los métodos de programación lineal y teoría de colas para estaciones únicas de servicio. En los campos con los dos últimos rendimientos agrícolas relacionados, se propone duplicar el número de agregados de transportes internos cuando se emplea para conformar la brigada, el método de teoría de colas en cascadas.

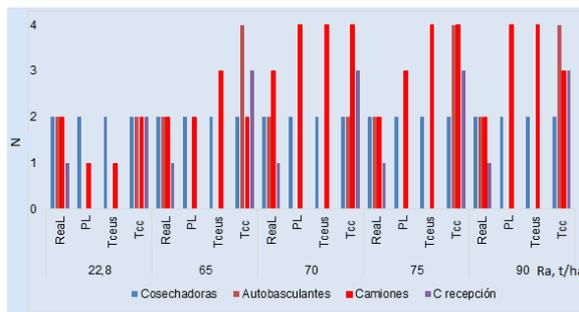
En cuanto al número de centros de recepción, como se puede observar en la [Figura 2](#), al trabajar en todos los campos, empleando el método de teoría de colas en cascadas, se propone aumentarlos (a dos al cosechar en campos de 22,8 t/ha y a tres en el resto), los que disminuiría los tiempos de ciclo del transporte y los tiempos de espera por medios de transporte externos en el campo, contribuyendo a disminuir los costos por paradas del sistema.

Así mismo, al analizar los costos por paradas que se obtuvieron experimentalmente, con los obtenidos integrando los métodos matemáticos de programación lineal, teoría de cola de estaciones únicas y teoría de colas en cascadas con el método de cadenas de Márkov ([Figura 3](#)) se puede observar que la diferencia oscila entre 17,34 y 44,86 peso/h disminuyendo los costos por paradas calculados entre 27,89 y 68,31% respecto a los obtenidos experimentalmente.

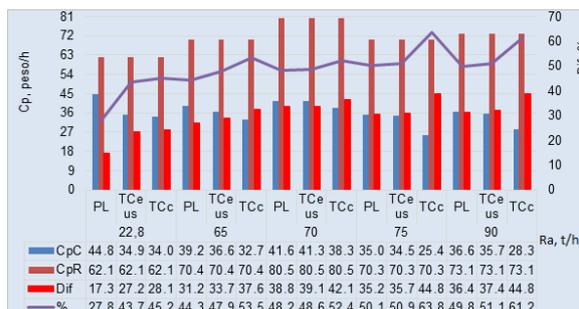
Para conocer en qué porcentaje disminuyen los costos por paradas, si se establecen las conformaciones de las brigadas propuestas se debe observar la [Figura 4](#). En campos de 22,8 t/ha disminuyen los costos por paradas en 28,12 peso/h, lo que representa el 54,78% de los obtenidos experimentalmente, mientras que en los campos de 65 t/ha la disminución sería del 46,48% (37,69 peso/h). En los campos de 70, 75 y 90 t/ha se disminuye en 42,19; 44,86 y 44,84 peso/h, lo que representa el 47,60; 36,19 y 38,72% de los costos por paradas del sistema obtenido experimentalmente.

### CONCLUSIONES

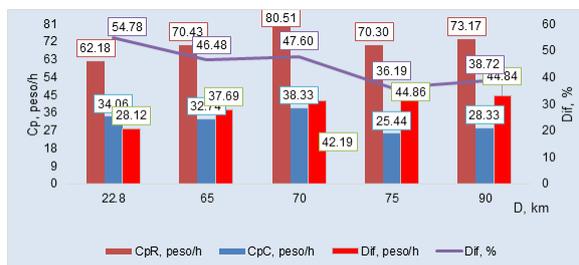
- Al analizar la estabilidad de las composiciones con el modelo de cadenas de Márkov se tiene que la variante más estable es la resultante de conformar la brigada con el método de teoría de colas en cascadas al trabajar en campos de 75 t/ha (recorriéndose 20 km, de ellos 7 km por asfalto y 13 km por terraplén), con dos Cosechadoras CASE IH 8800 y cuatro Tractores BELARUS 1523 + cuatro remolques autobasculantes VTX 10000, cuatro agregados HOWO SINOTRUCK + dos remolques y tres centros de recepción con una probabilidad de 53,79% de que no se interrumpa el ciclo y un costo por paradas del sistema de 33,05 peso/h.



**FIGURA 2.** Conformación de la brigada real y la obtenida por los métodos matemáticos.



**FIGURA 3.** Comparación de los costos por paradas obtenidos experimentalmente con los calculados según modelo matemático empleado.



**FIGURA 4.** Comparación de los costos por paradas.

- A partir de los criterios de racionalización, basados en la integración de los modelos matemáticos, es posible reducir los costos por paradas en más del 30%, observándose una marcada influencia al incrementarse el número de centros de acopio.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUILERA, O.; FONSECA, J.: Aplicación de un procedimiento para evaluar la eficiencia en el proceso de explotación según el consumo de combustible de las cosechadoras de caña KTP-2M, Ed. Grin Verlag, Berlín, Germany, 2013, ISBN: 10: 365646779X; ISBN-13: 978-3656467793.

AMÚ, L.G.: "Logística de cosecha. Evaluación de tiempos y movimientos. Indicadores y control", Revista Tecnicaña, 26: 25-30, 2010, ISSN: 0123-0409.

BINI, A.D.; LATOUCHE, G.; MEINI, B.: Numerical methods for structured Markov chains, Ed. Oxford

- University Press on Demand, New York, USA, 2005, ISBN: 0-19-852768-3.
- BOLCH, G.; GREINER, S.; DE MEER, H.; TRIVEDI, K.S.: Queueing networks and Markov chains: modeling and performance evaluation with computer science applications, Ed. John Wiley & Sons, 2006, ISBN: 0-471-79156-3.
- CHING, W.K.; NG, M.K.: Markov Chains: Models, Algorithms and Applications, Ed. Springer US, New York, USA, 2006, ISBN: 978-1-4614-6312-2.
- CONLISK, J.: "Interactive markov chains", Journal of Mathematical Sociology, 4(2): 157-185, 1976, ISSN: 0022-250X.
- FERNÁNDEZ, P.A.; ÁLVAREZ, R.E.: "Determinación de los principales indicadores de fiabilidad de la cosechadora de caña KTP-1.", Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 1(3): 57-60, 1988, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054.
- FERNANDEZ, P.A.; DELGADO, O.N.: "Análisis del trabajo del parque de tractores en función del número de roturas imprevistas.", Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 2(1): 27-32, 1989, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054.
- FONOLLOSA, G. J. B; SALLÁN, J. M; SUÑÉ, A.: Métodos cuantitativos de organización industrial II. Ediciones UPC. España. 2002. Libro electrónico. ISBN: 8483017946.
- HILLIER, F Y LIBERMAN, G.: Cadenas de Markov. Introducción a la Investigación de Operaciones. Edición magnética ISBN: 978-607-15-0308-4. México. 1012 p. 2010.
- HERMANN, H.: "Interactive markov chains", En: Interactive Markov Chains, Ed. Springer, pp. 57-88, 2002a.
- HERMANN, H.: "Interactive Markov chains in practice", En: Interactive Markov Chains, Ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, vol. 2428, Berlin, Germany, pp. 125-146, 2002b, ISBN: 978-3-540-45804-3.
- IBE, O.: Markov processes for stochastic modeling, Ed. Newnes, 2013, ISBN: 0-12-407839-7.
- KIJIMA, M.: Markov Processes for Stochastic Modeling, Ed. Chapman & Hall, 1st edición ed., Cambridge, USA, 194 p., 1997, ISBN: 0 412 60660 7.
- KIJIMA, M.: Markov processes for stochastic modeling, Ed. Springer, Cambridge, USA, 2013, ISBN: 1-4899-3132-5.
- MOREJÓN, Y.: Determinación de la composición racional de la brigada cosecha-transporte del arroz con la aplicación de la teoría del servicio masivo en el complejo agroindustrial arrocero "Los Palacios". Tesis presentada en opción al grado científico de Máster en Mecanización Agrícola. Mayabeque, Cuba, 2012
- RODRÍGUEZ, B. R.: Modelación económico matemática para decisiones óptimas en la cosecha de la caña de azúcar. (en línea) 2007, Disponible en: <http://retos.reduc.edu.cu/index.php/retos/article/view/13> (Consulta: 18 de Marzo 2014). 2014.
- RODRÍGUEZ, L.Y.; MOREJÓN, M.Y.; SOSA, G.D.; MARTÍNEZ, B.O.: "Modelación matemática del complejo cosecha-transporte de la caña de azúcar para su racionalización", Revista de Ciencias Técnicas Agropecuarias, 24(Exp.): 42-48, 2015, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054.
- RODRÍGUEZ, L.Y.: Organización racional del complejo cosecha-transporte en caña de azúcar con la integración de modelos matemáticos, Tesis (presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas Agropecuarias), Universidad Agraria de La Habana Fructuoso Rodríguez Pérez, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, 2019.
- SÁNCHEZ, B.A.: "Aplicación de Cadenas de Markov en un proceso de producción de plantas in vitro", Tecnología en Marcha, 29(1): 74-82, 2016, ISSN: 2215-3241.
- SHKILIOVA, L.: "Fundamento teórico para determinar la efectividad de mantenimiento técnico", Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 13(1): 51-53, 2004, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054.
- SHKILIOVA, L.; SUÁREZ, P.C.; IGLESIAS, C.C.: "Fiabilidad de los complejos tecnológicos", Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 9(3-4): 23-29, 2000, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054.
- SUÁREZ, C.E.: Investigación de la organización de la cosecha mecanizada de la caña de azúcar. Tesis de Doctorado. 157p. La Habana, Cuba. 1999a.
- SUÁREZ, C.E.; SHKILIOVA, L.; HERNÁNDEZ, A.; GARCÍA, A.: Determinación de los principales indicadores de fiabilidad de las cosechadoras de caña KTP-2M. RCTA. ISCAH, La Habana, Cuba. Vol. 8, No1. 1999b.

Yanara, Rodríguez-López, Prof. e Inv. Auxiliar, Universidad Agraria de La Habana (UNAH) Fructuoso Rodríguez Pérez, Facultad de Ciencias Técnicas, Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA), Carretera de Tapaste y Autopista Nacional km 23 ½. San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, e-mail: [yanita@unah.edu.cu](mailto:yanita@unah.edu.cu).  
Yanoy Morejón-Mesa, Profesor Titular, Universidad Agraria de La Habana Fructuoso Rodríguez Pérez, Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, e-mail: [yymm@unah.edu.cu](mailto:yymm@unah.edu.cu).  
Yolanda R Jiménez-Álvarez, Profesor Auxiliar. Departamento Matemática Física. Universidad Agraria de la Habana, Fructuoso Rodríguez Pérez, Mayabeque -32700 Cuba, e-mail: [yolandar@unah.edu.cu](mailto:yolandar@unah.edu.cu).

**AUTHOR CONTRIBUTIONS:** **Conceptualization:** Y. Rodríguez, Y. Morejón. **Data curation:** Y. Rodríguez, Y. Morejón. **Formal analysis:** Y. Rodríguez, Y. Morejón, Y. Jiménez. **Investigation:** Y. Rodríguez, Y. Morejón, Y. Jiménez. **Methodology:** Y. Rodríguez, Y. Morejón, Y. Jiménez. **Supervision:** Y. Rodríguez, Y. Morejón. **Validation:** Y. Rodríguez, Y. Morejón. **Roles/Writing, original draft:** Y. Rodríguez, Y. Morejón. **Writing, review & editing:** Y. Morejón, Y. Jiménez.

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.