



<https://eqrcode.co/a/nomqns>

ORIGINAL ARTICLE | ARTÍCULO ORIGINAL

Rational Organization of the Sugarcane Harvest-Transport Complex with the Integration of Mathematical Models

Organización racional del complejo cosecha-transporte en caña de azúcar con la integración de modelos matemáticos

Dr.C. Yanara Rodríguez-López*, Dr.C. Yanoy Morejón-Mesa, Ing. Claudia Cruz-Arredondo; Ing. Orlando Martínez-Bao
Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, San José de Las Lajas, Mayabeque, Cuba.

ABSTRACT. The present investigation was carried out in the Base Business Unit “Héctor Molina Riaño”, during the sugarcane harvest corresponding to the periods 2014-2015 to 2016-2017, to determine the rational organization of the harvest-transport brigade, through the integration of mathematical models, which guarantee the stability of the system flow. The rational conformation of the harvest-transport brigade was determined using methods such as Linear Programming and Queuing Theory for a single service station and for cascade stations. When analyzing the stability of the compositions with the Markov Chain Model, the most stable variant is when the queue theory is used in cascades while working in fields of 75 t/ha, with two CASE IH 8800 Harvesters and four Tractors BELARUS 1523 + four VTX 10000 self-balancing trailers, four HOWO SINOTRUCK aggregates + two trailers and three reception centers. All that with a 53,79% probability that the cycle will not be interrupted and a system-stop cost of 33,05 peso/h, being possible to reduce the costs for stops by more than 30% and observing a marked influence when increasing the number of collection centers.

Keywords: optimization, mathematical models, probability, stability, costs for stops.

RESUMEN. La presente investigación se realizó en la Unidad Empresarial de Base “Héctor Molina Riaño”, durante la cosecha en las zafra correspondientes a los períodos 2014-2015 al 2016-2017, para 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. 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: optimización, modelos matemáticos, probabilidad, estabilidad, costos por paradas

INTRODUCTION

As it is known, the biggest problems that arise during the process of obtaining sugar are the loss of time in the harvest-transport system. In the work of the harvest-transport-recep-

INTRODUCCION

Como es conocido, los mayores problemas que se presentan durante el proceso de obtención de azúcar, son las pérdidas de tiempo en el sistema de cosecha-transporte. En el trabajo de los

*Author for correspondence: Yanara Rodríguez-López, e-mail: yanita@unah.edu.cu

Received: 19/12/2019.

Approved: 14/05/2020.

tion links, waits are originated. Due to these losses of time during the wait in the queue, considerable material means, productive capacities and human energy are lost (Matos and Iglesias, 2012). The harvest-transport process of sugarcane can be stopped due to the lack of substantiation of the rational composition of the harvest-transport brigade. This results in the low flow stability of the technological process and its cost, which is why its determination is required based on scientific criteria (Giraldo, 1995).

In Cuba, from the organization of the transportation of sugarcane, losses arise that are not solved immediately (Martínez *et al.*, 2012). In the specific case of the Base Business Unit (UEB) Attention to Sugarcane Producers “Héctor Molina Riaño”, not only industrial problems have arisen, but also problems of an organizational and productive nature have occurred.

The analysis of the relation between the harvest and transport links requires the study of a waiting system in which it is necessary to balance that relationship, so that the loss due to these causes is minimal. In the work of the sugarcane combined, it happens that it waits for the means of transport or the transport waits for it to receive the load, in addition to waiting in the reception center for the unloading process (Kleinrock, 1975, Prawda, 1988 and Wolff, 1989). This type of phenomenon is characteristic and is associated with the development of the productive forces. A rational way to bring down queues is to study the laws of queue formation, to learn calculating the necessary number of service units and on this basis, to organize the work of service systems (Suárez, 2006).

For this, it is essential to apply mathematical modeling in scientifically based decision-making, alien to all kinds of improvisations, that allow justifying, for example, the levels of production, use of technical means and material resources whose combination produces the maximum efficiency (Buffa, 1968 and Cooper, 1981). Among the mathematical methods and models used in research to determine the rational organization of the harvest-transport process, the following can be mentioned: Markov Chains, Linear Programming, and the Theory of Mass or Queue Service (Escudero, 1972, Fonollosa *et al.*, 2002 and Morejón *et al.*, 2012).

MATERIALS AND METHODS

The rationalization of the harvest-transport-reception process should be based on the technological, economic and operational evaluation of the technical means involved in the harvest and transport, as well as the observation of the components of shift time in the reception center. In the present case study, it was taken into account that the harvest was carried out in fields with different agricultural yields; in transport, the road conditions were considered, as well as the type and capacity of the means of transport. It was also taken into account that the distance from the harvest field to the reception center will vary. In the case of costs, direct and specific operating costs were determined in each subsystem, as well as costs for shutdowns.

For the rational composition of the harvest-transport brigade from Linear Programming and Queuing Theory

eslabones cosecha–transporte–recepción se originan esperas, por estas pérdidas de tiempo durante la espera en la cola, se pierden cuantiosos medios materiales, capacidades productivas y energía humana (Matos y Iglesias, 2012). El proceso cosecha–transporte de la caña de azúcar puede detenerse por la no fundamentación de la composición racional de la brigada cosecha–transporte, esto trae como consecuencia la baja estabilidad de flujo del proceso tecnológico y su costo, por lo que se requiere su determinación fundamentada bajo criterios científicos (Giraldo, 1995).

En Cuba, a partir de la organización del transporte de la caña de azúcar surgen pérdidas que no se solucionan de inmediato (Martínez *et al.*, 2012). En el caso específico de la Unidad Empresarial de Base (UEB) Atención a Productores Cañeros “Héctor Molina Riaño” han surgido problemas no solo industriales, sino a su vez se han manifestado problemas de orden organizativo y productivo.

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 (Kleinrock, 1975; Prawda, 1988; Wolff, 1989). Este tipo de fenómeno es característico y está asociado al desarrollo de las fuerzas productivas. Para abatir 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 *et al.*, 2006).

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 (Buffa, 1968; Cooper, 1981). Entre los métodos y modelos matemáticos que se emplean en la investigación para determinar la organización racional del proceso cosecha–transporte se pueden citar: las cadenas de Markov, la programación lineal y la teoría de servicio masivo o de cola (Escudero, 1972; Fonollosa *et al.*, 2002; Morejón *et al.*, 2012).

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la racionalización de la brigada cosecha transporte recepción se parte de la evaluación tecnológica, económica y de explotación de los medios técnicos que intervienen en la cosecha y el transporte, así como la observación de los componentes del tiempo de turno en el centro de recepción. En el presente estudio de caso se tuvo en cuenta que en la cosecha se trabajara en campos con rendimientos agrícolas diferentes, en el transporte se tuvo en cuenta las condiciones del camino, así como el tipo y capacidad del medio de transporte, también se tuvo en cuenta que variara la distancia desde el campo en cosecha al centro de recepción. En el caso de los costos se determinaron los costos directos de explotación y específico en cada subsistema, así como los costos por paradas.

Para la composición racional de la brigada cosecha transporte a partir de la programación lineal y de la teoría de colas para estaciones únicas de servicio y en cascadas se sigue la

for single service stations and cascades, it was followed the methodology set forth in the article “Mathematical modeling of the sugar cane harvest-transport complex” (Rodriguez *et al.*, 2016).

After having determined the composition of the brigade by the methods described above, it was determined which of the resulting compositions offers more stability in the operation of the crop in flow and for this the Markov Chain Method was used.

A Markov chain has stationary transition probabilities, if for any pair of states E_i and E_j there is a transition probability p_{ij} such that:

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

For the best analysis of the Markov chain, the transition matrix is established, within which the following can be stated:

Stochastic matrix:

It is a square matrix whose elements are non-negative and such that the sum of the elements in each row is equal to 1.

Transition matrix in one step:

Given a Markov chain with k possible states E_1, \dots, E_k and stationary transition probabilities.

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

The transition matrix P of any finite Markov chain with stationary transition probabilities is a stochastic matrix.

Foundations and applications of Markov Model can be used in the formation of the sugarcane harvest-transport-reception brigade, to determine the stability of the system, based on the probability of passing from one link to another, that is, it is used as an additional conformation method, which allows with various possibilities of structures of the harvest-transport-reception complex of sugarcane, to determine which is the most stable. In the particular case of this research, to establish the model, authors started from the definition of the states that make up the process, which are: sugarcane in harvest E_c , sugarcane in transport E_t and sugarcane in the reception center E_r , defining sugarcane as the element that transits, since it goes from being in the field to being cut, transported out of the field and towards the mill, where it is unloaded, classified and processed. After specifying the states, the number of necessary means of transport are defined and that is combined with the transition probability criteria from the elaborated matrix (Kijima, 1997, 2013; Hermanns, 2002; Ching y Ng, 2006; Ibe, 2013).

In order to form the transition matrix, the probability of transition or non-transition from one state to another must be determined through the Poisson tables according to Yesin and Sevostyanov (2014), as shown in Expression (3)

$$P_{t(x)} = \frac{e^{-\lambda} * \lambda^x}{x!} \quad (3)$$

It will be defined the probability of transition from the sugarcane state in harvest to that of sugarcane in transport

metodología expuesta en el artículo “Modelación matemática del complejo cosecha-transporte de la caña de azúcar para su racionalización” (Rodriguez *et al.*, 2016).

Luego de haber determinado la composición de la brigada por los métodos antes descritos, se procede a determinar cuál de las composiciones resultantes ofrece más estabilidad en el funcionamiento de la cosecha en flujo, para ello se emplea el método de cadenas de Markov.

Una cadena de Markov 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:

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

Para el mejor análisis de la cadena de Markov, 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 Markov con k estados posibles E_1, \dots, E_k y probabilidades de transición estacionarias.

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

La matriz de transición P de cualquier cadena de Markov finita con probabilidades de transición estacionarias es una matriz estocástica.

El modelo de Markov, 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 (Kijima, 1997, 2013; Hermanns, 2002; Ching y Ng, 2006; Ibe, 2013).

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 según Yesin y Sevostyanov (2014), como se muestra en la expresión (3)

$$P_{t(x)} = \frac{e^{-\lambda} * \lambda^x}{x!} \quad (3)$$

La probabilidad de transición del estado caña en cosecha al de caña en transporte y de esta a ser descargada en el centro de

and from it, to be unloaded in the reception center, considering the fact that there are the necessary inputs for their correct exploitation, due to the reliability of the technical means involved in the process.

For harvesting and transportation, it is determined from the technical availability coefficient of the technical means involved, because what defines the transition from the sugarcane state at harvest to the transport means and from it to the reception center, is that the technical means work.

$$\lambda_{mt} = n_{mt} * k_{dmt} \tag{4}$$

where:

n_{mt} - number of technical means;

k_{dmt} - availability coefficient of the technical means.

From the calculation of the mathematical expectation of the operation of the technical means in the sugarcane at harvest and sugarcane in transport (λ_c and λ_t) states determined by Expression 4, the transition probability is established using the Poisson Tables where x is the value of number of technical means in each state.

To determine the mathematical expectation of the operation of technical means in the sugarcane state at reception λ_{cer} , 15 observations were made, which were averaged, determining the number of trucks waiting to deliver the product (n_{cer}) and the total number of trucks in the reception center. (n_{tr});

$$P_{nt} = \frac{n_{cer}}{n_{tr}} \tag{5}$$

Taking into account the probabilities of non-transition in each state, the transition probabilities can be obtained:

$$P_t = 1 - P_{nt} \tag{6}$$

Then the transition matrix shown in Expression 7 is constructed. The product of the transition probabilities indicates the probability that the flow harvest works, which allows determining the solutions proposed in each model, which will make the system work with fewer stops, that is, more stable.

$$\begin{matrix} E_c & E_t & E_r \\ E_c & P_{nt} & P_t & 0 \\ E_t & 0 & P_{nt} & P_t \\ E_r & P_r & 0 & P_{nr} \end{matrix} \tag{7}$$

Based on the analysis previously carried out, an estimate of the economic impact due to the break of the C_{pet} cycle can be obtained from the determination of the costs for shutdowns in each element of the cycle and the probability that it will not transit from one state to another.

$$C_{pet} = (C_{pc} * P_{ntc}) + (C_{pt} * P_{ntt}) + (C_{pcr} * P_{ntr}); \text{peso/h} \tag{8}$$

where:

C_{pc} , C_{pt} and C_{cr} - cost per stop at harvest, transportation and central reception center, respectively; peso/h

Regarding the costs for stops in the reception center, the wages of the workers linked to the process, the fuels and lubricants consumed in the process, as well as the maintenance

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.

Para la cosecha y transporte se determina a partir del coeficiente de disponibilidad técnica de los medios técnicos que intervienen, debido a que, lo que define el paso del estado caña en cosecha al transporte y del transporte al centro de recepción es que funcionen los medios técnicos:

$$\lambda_{mt} = n_{mt} * k_{dmt} \tag{4}$$

donde:

n_{mt} - número de medios técnicos;

k_{dmt} - coeficiente de disponibilidad de medios técnicos.

A partir del cálculo de la esperanza matemática del funcionamiento de los medios técnicos en los estados caña en cosecha y caña en transporte (λ_c y λ_t) determinada por la expresión 4 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 λ_{cer} , 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_{tr});

$$P_{nt} = \frac{n_{cer}}{n_{tr}} \tag{5}$$

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

$$P_t = 1 - P_{nt} \tag{6}$$

Luego se construye la matriz de transición mostrada en la expresión 7. 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.

$$\begin{matrix} E_c & E_t & E_r \\ E_c & P_{nt} & P_t & 0 \\ E_t & 0 & P_{nt} & P_t \\ E_r & P_r & 0 & P_{nr} \end{matrix} \tag{7}$$

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.

$$C_{pet} = (C_{pc} * P_{ntc}) + (C_{pt} * P_{ntt}) + (C_{pcr} * P_{ntr}); \text{peso/h} \tag{8}$$

donde:

C_{pc} , C_{pt} y C_{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

and the electrical energy consumed as shown in Expression 9 are taken into account.

$$C_{pcr} = C_s \pm C_c \pm C_{mr} \pm C_e, \text{ peso/h} \quad (9)$$

RESULTS AND DISCUSSION

For the rational composition of the complex harvest-transport of sugarcane, combining mathematical methods, three variants are analyzed, which are listed below:

Variant I: The estimated agricultural yield of the field is 65 t/ha, two CASE AUSTOFT IH 8800 harvesters are used, for intermediate transport the BELARUS 1523+ VTX 10000 transport aggregates are used (10 t capacity) and for external transport HOWO SINOTRUK + 2 TRAILER trucks (total capacity 60 t, 20 t on each trailer and 20 t on the truck). The distance to transport is 18 km, 6 km of them are on a paved road and 12 km are an embankment.

Variant II: The estimated agricultural yield of the field is 70 t/ha, two CASE AUSTOFT IH 8800 harvesters are used, for intermediate transport the BELARUS 1523+ VTX 10000 transport aggregates are used (10 t capacity) and for external transport KAMAZ trucks + 1 TRAILER (total capacity 20 t, 10 t on the trailer and 10 t on the truck). The distance to transport is 20 km, of them 7 km are on a paved road and 13 km are an embankment.

Variant III: The estimated agricultural yield of the field is 75 t/ha, two CASE AUSTOFT IH 8800 harvesters are used, for intermediate transport the BELARUS 1523+ VTX 10000 transport aggregates are used (capacity 10 t) and for external transport HOWO SINOTRUK + 2 TRAILER trucks (total capacity 60 t, 20 t on each trailer and 20 t on the truck). The distance to transport is 20 km, of them 7 km are on a paved road and 13 km are an embankment.

Determination of the Rational Composition of the Sugarcane Harvest-Transport Complex Using Linear Programming

The POM-QW FOR WINDOWS version 3 software was used to determine the rational composition of the media involved in the sugarcane harvest-transport process using Linear Programming. The quantity variables were taken as decision variables of harvesters necessary in the process (X_1) and the number of external means of transport (trucks) necessary in the process (X_2). Table 1 shows the restrictions 1 and 2 as well as the objective function used in the formation of the models according to the agricultural performance of the field (Sadleir, 1970).

proceso, así como los mantenimientos y la energía eléctrica consumida como se muestra en la expresión 9.

$$C_{pcr} = C_s \pm C_c \pm C_{mr} \pm C_e, \text{ peso/h} \quad (9)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la composición racional del complejo cosecha transporte de la caña de azúcar combinando métodos matemáticos se analizan tres variantes, las que se relacionan a continuación:

Variante I: El rendimiento agrícola estimado del campo es de 65 t/ha, se emplean dos cosechadoras CASE AUSTOFT IH 8800, para el transporte intermedio se emplean los agregados de transporte BELARUS 1523+ VTX 10000 (capacidad 10 t) y para el transporte externo camiones HOWO SINOTRUK+2 REMOLQUE (capacidad total 60 t, 20 t en cada remolque y 20 t en el camión). La distancia a transportar es de 18 km, de ellos 6 km son de camino asfaltado y 12 km son terraplén.

Variante II: El rendimiento agrícola estimado del campo es de 70 t/ha, se emplean dos cosechadoras CASE AUSTOFT IH 8800, para el transporte intermedio se emplean los agregados de transporte BELARUS 1523+ VTX 10000 (capacidad 10 t) y para el transporte externo camiones KAMAZ+1 REMOLQUE (capacidad total 20 t, 10 t en el remolque y 10 t en el camión). La distancia a transportar es de 20 km, de ellos 7 km son de camino asfaltado y 13 km son terraplén.

Variante III: El rendimiento agrícola estimado del campo es de 75 t/ha, se emplean dos cosechadoras CASE AUSTOFT IH 8800, para el transporte intermedio se emplean los agregados de transporte BELARUS 1523+ VTX 10000 (capacidad 10 t) y para el transporte externo camiones HOWO SINOTRUK+2 REMOLQUE (capacidad total 60 t, 20 t en cada remolque y 20 t en el camión). La distancia a transportar es de 20 km, de ellos 7 km son de camino asfaltado y 13 km son terraplén.

Determinación de la composición racional del complejo cosecha-transporte de la caña de azúcar con el empleo de la programación lineal

En la determinación de la composición racional de los medios que intervienen en el proceso cosecha-transporte de la caña de azúcar mediante la Programación Lineal se empleó el Software POM-QW FOR WINDOWS versión 3. En el proceso se tomaron como variables de decisión la cantidad de cosechadoras necesarias en el proceso (X_1) y la cantidad de medios de transportes externos (camiones) necesarios en el proceso (X_2), en la Tabla 1 se muestran las restricciones 1 y 2 así como la función objetivo empleada en la conformación de los modelos según el rendimiento agrícola del campo (Sadleir, 1970).

TABLE 1. Objective function and restrictions 1 and 2 according to the agricultural performance of the field
TABLA 1 Función objetivo y restricciones 1 y 2 según el rendimiento agrícola del campo

Ra, t/ha	Objective function	R 1	R 2	R-3	R-4
65	$Z=22,18*X_1+9,52*X_2$	$446,71*X_1=391,92$	$54,96*X_2=138,79$		
70	$Z=29,46*X_1+6,94*X_2$	$459,82*X_1=675$	$18*X_2=75$	$X_1 \geq 2$	$X_2 \geq 1$
75	$Z=22,11*X_1+9,52*X_2$	$807,99*X_1=748$	$55,26*X_2=134,83$		

For the given production volume and taking into account the agricultural yields of the fields, it was obtained with the method used that the necessary number of harvesters is in all cases 2 (Table 2), while the number of trucks varies depending on the agricultural yield being that, in fields with 65 t/ha, two HOWO SINOTRUCK trucks must be used with a minimum cost of 66.47 peso/h, needing three when the field has 75 t/ha with a minimum cost of 64,04 peso/h. In fields of 70 t/ha, four KAMAZ trucks are needed to obtain a minimum cost of 77.25 peso/h.

Objective function Para el volumen de producción dado y teniendo en cuenta los rendimientos agrícolas de los campos se obtuvo con el método empleado que el número necesario de cosechadoras es en todos los casos 2 (Tabla 2), mientras que el número de camiones varía en función del rendimiento agrícola quedando que en campos 65 t/ha se deben emplear dos camiones HOWO SINOTRUCK con un costo mínimo de 66,47 peso/h, necesitando tres cuando el campo tiene 75 t/ha con un costo mínimo de 64,04 peso/h. En campos de 70 t/ha se necesitan cuatro camiones KAMAZ para obtener un costo mínimo de 77,25 peso/h.

TABLE 2. Result of rational conformation using linear programming
TABLA 2. Resultado de la conformación racional empleando la programación lineal

	65	70	75
Z, peso/h	66,47	77,25	64,04
Number of combines	2	2	2
Number of trucks	2	4	3

As it can be observed, as the agricultural yield of the field increases and the distance to transport the necessary number of means of transport increases, this occurs due to the high values reached by the cycle time, which is affected by the conditions of the fields.

Como se puede observar, a medida que aumenta el rendimiento agrícola del campo y la distancia a transportar aumenta el número necesario de medios de transporte, esto ocurre por los elevados valores que alcanza el tiempo de ciclo, el cual está afectado por las condiciones de los campos.

Determination of the Rational Composition of the Sugarcane Harvest-Transport Complex Using the Queue Theory for Consecutive Stations or Cascades

Determinación de la composición racional del complejo cosecha-transporte de la caña de azúcar con el empleo de la Teoría de Cola para estaciones consecutivas o de cascadas

Moskowitz and Wright (1991) and Medhi (2002), using the Queue Theory, the waiting model with two stations in cascades with a limited number of clients and in a system where the arrivals of the means of transport to the field behaved according to the Poisson distribution, obtained the following results (Table 3) for each subsystem (Harvest, Transport and Reception).

Mediante la Teoría de Cola según Moskowitz y Wright (1991); Medhi (2002), utilizando el modelo de espera con dos estaciones en cascadas con un número limitados de clientes y donde las llegadas de los medios de transporte al campo se comportan según la distribución de Poisson se obtuvieron los siguientes resultados (Tabla 3) para cada subsistema (Cosecha, Transporte y Recepción).

In Variant I, in the Harvest Subsystem, there were four self-balancing trailers (servers) to service two harvesters (customers), where the filling time of the self-balancing trailer was 0,27 h. To satisfy the demand of the two combines, four self-balancing trailers are needed, which will be able to satisfy 1,17 combines in 1 hour, with a channel capacity of 3,11 and a system request of 0,36. The probability that there are no units in the subsystem is 25%, the mean queue length is 2,25 and the length of stay 1,93 h. In the Transport Subsystem, it was found that, with two means of transport, in one channel hour, 0,39 requests can be satisfied. With a channel capacity of 1,42, the density of requests for the system is 0,27. The average number of units in the queue is 0,37, the queue length is 0,10, the length of stay is 0,27 h and the probability that there are no units in the subsystem is 73%. In the Reception Subsystem, two Reception Centers are needed to satisfy 1,34 means of transport with a channel capacity of 2,32 and a system request density of 0,58. The average queue length is 1,37, with a stay time of 0,58 h.

En la **variante I** en el subsistema Cosecha, se contaba con cuatro autobasculantes (servidores) para darle servicio a dos cosechadoras (clientes), donde el tiempo de llenado del autobasculante es de 0,27 h. Para satisfacer la demanda de las dos cosechadoras se necesitan cuatro autobasculantes, que podrán satisfacer en 1 h a 1,17 cosechadoras, con una capacidad del canal de 3,11 siendo la solicitud del sistema de 0,36. La probabilidad de que no haya unidades en el subsistema es de 25%, siendo el largo medio de la cola de 2,25 y el tiempo de estancia de 1,93 h. En el subsistema transporte se tuvo que, con dos medios de transporte, en una hora de canal se pueden satisfacer 0,39 solicitudes, con una capacidad del canal de 1,42, siendo la densidad de solicitudes del sistema de 0,27. El número medio de unidades en la cola es de 0,37, siendo el largo de la cola de 0,10, el tiempo de estancia es de 0,27 h y la probabilidad de que no haya unidades en el subsistema de 73%. En el subsistema recepción se necesitan dos Centros de recepción para satisfacer 1,34 medios de transportes con una capacidad del canal de 2,32 y una densidad de solicitudes del sistema de 0,58. El largo medio de la cola es de 1,37, siendo el tiempo de estancia de 0,58 h.

In Variant I, working with two harvesters, four intermediate means of transport, two external means of transport (HOWO SINOTRUCK) and three reception centers, the queue probability is 28%, with a minimum cost for stops of 63,15 pesos/h.

En la **variante I**, trabajando con dos cosechadoras, cuatro medios de transporte intermedio, dos medios de transporte externos (HOWO SINOTRUCK) y tres Centros de recepción la probabilidad de cola es de 28%, habiendo un costo mínimo por paradas de 63,15 peso/h.

In Variant II in the Harvest Subsystem, there were four self-balancing trailers (servers) to service two harvesters (customers), where the filling time of the self-balancing trailer is 0,3 h. To satisfy the demand of the two combines, two self-balancing trailers are needed, which can satisfy 1,79 combines in 1 hour, with a channel capacity of 3,58 and the system request is 0,50. The probability that there are no units in the subsystem is 50%, with the mean queue length being 1 and the residence time being 0,28 h. In the Transport Subsystem, it was found that, with four means of transport, 0,90 requests can be satisfied in one channel hour, with a channel capacity of 2,25, the system request density being 0,40. The average number of units in the queue is 0,66, the queue length being 0,264, the stay time is 0,29 h and the probability that there are no units in the subsystem is 60%.

In the Reception Subsystem, three Reception Centers are needed to satisfy 2,30 means of transport with a channel capacity of 2,99 and a system request density of 0,51. The average length of the queue is 1,05, the stay time being 0.24 h.

In Variant II, working with two combines, two intermediate means of transport, four external means of transport (KAMAZ) and three Reception Centers, the queue probability is 21%, with a minimum cost per stop of 74,26 peso/h.

In Variant III, in the Harvest Subsystem, there were four self-balancing trailers (servers) to service two combines, where the filling time of the self-balancing trailer is 0,26 h. When applying the model, it was obtained that four self-balancing trailers (servers) must be used in the Harvesting System; in one hour the canal can satisfy 1,13 combines. The capacity of the service channel in one hour is 1,50. The system request density was 0,75 with a probability of no units in the subsystem of 96%. The average number of units in the queue is 0,0045, the queue length being 0,002, which translates into a time spent in the system of 0,6 h.

When analyzing the Transport Subsystem, it was found that, with four means of transport, 0,75 requests can be satisfied in one channel hour, with a channel capacity of 2,84, the system request density being 0,26. The average number of units in the queue is 0,15, with the queue length being 0,02 and the stay time is 0,5 h. The probability that there are no units in the subsystem is 87%.

To satisfy the demands of the Transport Subsystem and, consequently, those of the Harvest Subsystem, it is necessary that the Reception Subsystem be made up of three centers satisfying 1,34 transport aggregates in 1h of channel, with the service capacity at that time being 3,09 and the system request density of 0,58. The average number of means of transport in the queue is 1,37, with the stay time of one unit in the Reception Center being 0,59 h and the probability that there are no units in the subsystem of 42%.

From the above, it is obtained that in Variant III, working with two harvesters, four intermediate means of transport, four external means of transport (HOWO SINOTRUCK) and three reception centers, the probability of queuing is 8%, with a minimum cost of stops of 55,04 peso/h.

En la **variante II** en el subsistema Cosecha, se contaba con cuatro autobasculantes (servidores) para darle servicio a dos cosechadoras (clientes), donde el tiempo de llenado del autobasculante es de 0,3 h. Para satisfacer la demanda de las dos cosechadoras se necesitan dos autobasculantes, que podrán satisfacer en 1 h a 1,79 cosechadoras, con una capacidad del canal de 3,58 siendo la solicitud del sistema de 0,50. La probabilidad de que no haya unidades en el subsistema es de 50%, siendo el largo medio de la cola de 1 y el tiempo de estancia de 0,28 h. En el subsistema transporte se tuvo que, con cuatro medios de transporte, en una hora de canal se pueden satisfacer 0,90 solicitudes, con una capacidad del canal de 2,25, siendo la densidad de solicitudes del sistema de 0,40. El número medio de unidades en la cola es de 0,66, siendo el largo de la cola de 0,264, el tiempo de estancia es de 0,29 h y la probabilidad de que no haya unidades en el subsistema de 60%.

En el subsistema recepción se necesitan tres Centros de recepción para satisfacer 2,30 medios de transportes con una capacidad del canal de 2,99 y una densidad de solicitudes del sistema de 0,51. El largo medio de la cola es de 1,05 siendo el tiempo de estancia de 0,24 h.

En la **variante II**, trabajando con dos cosechadoras, dos medios de transporte intermedio, cuatro medios de transporte externos (KAMAZ) y tres Centros de recepción la probabilidad de cola es de 21%, habiendo un costo mínimo por paradas de 74,26 peso/h.

En la **variante III**, en el subsistema Cosecha, se contaba con cuatro autobasculantes (servidores) para darle servicio a dos cosechadoras, donde el tiempo de llenado del autobasculante es de 0,26 h. Al aplicar el modelo se obtuvo que en el sistema cosecha se deben utilizar cuatro autobasculantes (servidores) se tiene que en una hora el canal puede satisfacer 1,13 cosechadoras. La capacidad del canal de servicio en una hora es de 1,50. La densidad de solicitudes del sistema fue de 0,75 con una probabilidad de que no haya unidades en el subsistema de 96%. El número medio de unidades en la cola es 0,0045 siendo el largo de la cola de 0,002, lo que se traduce en un tiempo de estancia en el sistema de 0,6 h.

Al analizar el subsistema transporte, se tuvo que, con cuatro medios de transporte, en una hora de canal se pueden satisfacer 0,75 solicitudes, con una capacidad del canal de 2,84, siendo la densidad de solicitudes del sistema de 0,26. El número medio de unidades en la cola es de 0,15, siendo el largo de la cola de 0,02 y el tiempo de estancia es de 0,5 h y la probabilidad de que no haya unidades en el subsistema de 87%.

Para satisfacer las demandas del subsistema transporte y por consiguiente las del subsistema cosecha, se necesita que el subsistema recepción esté compuesto por tres Centros satisfaciendo en 1 h de canal a 1,34 agregados de transporte, siendo la capacidad de servicio en ese tiempo de 3,09 y la densidad de solicitudes del sistema de 0,58. El número de medios de transporte medio en la cola es de 1,37, siendo el tiempo de estancia de una unidad en el Centro de Recepción de 0,59 h y la probabilidad de que no haya unidades en el subsistema de 42%.

De lo anterior se obtiene que en la **variante III**, trabajando con dos cosechadoras, cuatro medios de transporte intermedio, cuatro medios de transporte externos (HOWO SINOTRUCK) y tres Centros de recepción la probabilidad de cola es de 8%, habiendo un costo mínimo por paradas de 55,04 peso/h.

TABLE 3. Results of the waiting model with two stations in cascades using the Queue Theory, for each subsystem
TABLA 3 Resultados del modelo de espera con dos estaciones en cascadas utilizando la Teoría de Cola, para cada subsistema

Ra, t/ha		65	70	75
Indicator				
	Ab	4	2	4
	n	2	4	4
	Cr	3	3	3
λ	SC	1,17	1,79	1,13
	ST	0,39	0,90	0,75
	SR	1,34	2,30	1,34
μ	SC	3,11	3,58	1,50
	ST	1,42	2,25	2,84
	SR	2,32	2,99	3,09
P_0 , %	SC	0,36	0,50	0,75
	ST	0,27	0,40	0,26
	SR	0,58	0,51	0,58
Mc	SC	25	50	96
	ST	73	60	87
	SR	42	49	42
Ms	SC	2,25	0,5	0,002
	ST	0,10	0,264	0,02
	SR	0,78	0,54	0,79
T_{est} , h	SC	3	1	0,045
	ST	0,37	0,66	0,15
	SR	1,37	1,05	1,37
P_{cola} , %	SC	1,93	0,28	0,6
	ST	0,27	0,29	0,5
	SR	0,77	0,24	0,59
S , peso/h		28	21	8
		63,15	74,26	55,04

Determination of the Stability of the Technological Flow Harvest-Transport-Reception Using the Markov Model

In order to determine which mathematical model of the previous ones used is the most stable and economically feasible in determining the rational composition of the media involved in the process, the Markov Model was used, in which three (3) states were defined for resolution; which were the cane in harvest E_c (Harvest Subsystem), the cane in transport E_t (Transport Subsystem) and the cane in reception E_r (Reception Subsystem). For the application of this model, the mathematical expectations (λ_m) for the state of cane at harvest, in transport and reception (only for the Queue Theory Model with consecutive stations or in cascades) necessary to obtain the values of no transition using Poisson Tables. Starting from it, the probability of their transition is determined. The coefficients of technical availability of the combines, the means of transport and the Reception Center are also determined.

From the elaborated transition matrices, it can be verified that as the number of technical means (harvesters, self-balancing trailers, trucks and reception centers) increases, as the coefficients of technical availability do not vary much, the probability of transition increases, due to which the possibility of interrupting the process flow is reduced. In the state of cane at

Determinación de la estabilidad del flujo tecnológico cosecha-transporte-recepción con el empleo del modelo de Márkov

Con el fin de determinar qué modelo matemático de los anteriores utilizados es el más estable y económicamente factible en la determinación de la composición racional de los medios que interviene en el proceso se utiliza el Modelo de Márkov, en el cual se definieron tres (3) 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 se determinaron las esperanzas matemáticas (λ_m) para el estado de caña en cosecha, en transporte y recepción (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.

A partir de las matrices de transición elaboradas se puede comprobar 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

harvest and cane at reception, the results obtained were analyzed together using Linear Programming and Queuing Theory for a single service station because the values coincide in the case of Harvest, and, in the case of the Center of Reception, the criterion used to analyze the probability of transition and non-transition is the same. In all the matrices the value of the probability of the cane passing from the harvest state to the reception state is null, since the cane has to be transported, likewise, the probability of the cane passing to be transported to the Harvest status is nil, because once the cane is cut it becomes transported. A similar situation occurs in the cane state when it is received, because once the cane reaches the mill it is not returned.

When Linear Programming is used in all the variants analyzed, the probability of entering the reception state is 77%, and there is a probability of not doing so of 23%, which may be due to breakage of the combine harvester or lack of means of transport. The same occurs with the rest of the models in the other variants except for Variants I and III, when analyzing the conformation of the brigade with the Queuing Theory Model in cascades, which in both cases has a probability of transition of 80,5%, these being the most stable.

In the case of the transport state, the probability of transition to the Reception Center is between 75 and 80% in the case of Variants I and III when the Queue Theory Method is used in cascades, and in Variant I in the rest of the models used. In the rest of the models and variants it is between 80 and 83%.

In the reception state in the Linear Programming and Queuing Theory Models for a single service station, the transition probability is between 76 and 78%, being 82% when using the cascade queuing theory method in the Variants from I to III.

After having defined the transition matrices, the economic impact due to instability or technological failure of the different cycles that represent the different conformations of the sugarcane harvest-transport-reception complex, was determined, which can be seen in Figure 1.

In Variant I, the method that shows the best results in terms of stability and minimum economic losses is the Queuing Theory in cascades (two CASE AUSTOFT IH 8800 combines, four BELARUS 1523+ VTX 10000, two HOWO SINOTRUK + two TOWING (each) and three reception centers) with a loss due to system stops of 32,74 peso/h (6,48 and 3,94 peso/h less than if using Linear Programming and Queue Theory of a single service station). With this conformation, the probability of the transition of sugarcane from harvest to transport is 80,5%, from transport to reception 73%, of being processed in the Reception Center of 82% and that the harvest is completed in 48,16% flow.

Likewise, in Variant II, the best results are obtained with the mathematical method proposed, being the optimal conformation of two CASE AUSTOFT IH 8800 combines, two BELARUS 1523+ VTX 10000, four KAMAZ + one TRAILER (each) and three reception centers with a loss for system stops of 38,33 peso/h (3,35 and 3,05 peso/h less than if Linear Programming and Queue Theory of single service station are used). With this conformation, the probability of transition of the system is 48,39%, being that of the cane from harvest to transport of 73%,

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. 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 en todas las variantes analizadas la probabilidad de pasar al estado de recepción es de 77%, habiendo 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 I, y III, 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 % en el caso de las variantes I y III cuando se emplea el método de teoría de colas en cascadas, y en la variante I en el resto de los modelos empleados. En el resto de los 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, 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 I hasta la III.

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.

En la **variante I** 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 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 II** 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

from transport to reception of 80,9% and of being processed in the Reception Center of 82 %.

In Variant III, the same value of losses due to system stops (25,54 peso/h) is obtained when analyzed with Linear Programming and Queue Theory of single service station, reducing losses to 9,53 and 8,98 peso/h when the conformation variant resulting from applying the Queue Theory in cascades is used, which is two CASE AUSTOFT IH 8800 combines, four BELARUS 1523+ VTX 10000, four HOWO SINOTRUK + two TRAILERS (each) and three centers of reception. With this conformation, the probability of transitioning the cane from harvest to transport is 80,5%, from transport to reception 81,6%, and of being processed at the Reception Center, 82%, with 53,78 % probability that the process will occur in flow.

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 III** 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 de 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.

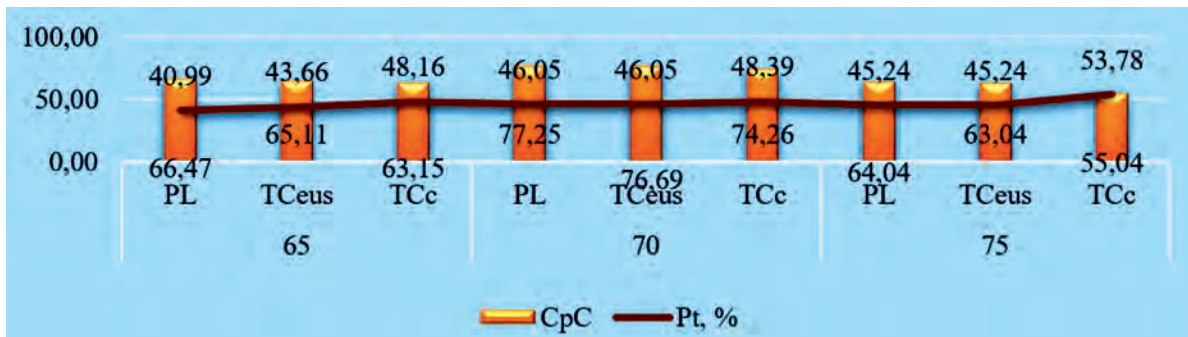


FIGURE 1. Costs for stops and probability of transition of the system.
 FIGURA 1. Costos por paradas y probabilidad de transición del sistema.

As observed in Figure 1, in all cases, when the cascade Queue Theory Method is used, the highest probability of transition is obtained in the entire system, that is, the cycle is more likely to be maintained, being The most stable conformations are those offered by this method for fields of 75 and 90 t/ha (53,78 and 51,29%, respectively) and in which the losses due to system shutdowns are lower.

When analyzing the conformation of the harvest-transport-reception brigade that was used in the real process, with which each mathematical model throws (Figure 2), it can be seen that in the fields of 65 t/ha the difference lies in that with the Queue Theory Method for single stations aims to increase the number of external means of transport to 3 while using the Queue Theory Method in cascades it is proposed to increase the number of internal means of transport from two to four. In the fields of 65 t/ha of estimated agricultural yield, it is proposed with all methods to double the number of aggregates of external transport, the same happens in the fields of 75 t/ha using the Queue Theory when using the Linear Programming Methods and Queue Theory for single service stations. In these fields with the last two related agricultural yields, it is proposed to double the number of aggregates of internal transports when used to form the brigade, the Queue Theory Method in cascades.

As it can be seen in Figure 2, when working in all fields, using the cascading Queue Theory Method, it is proposed to increase the reception centers from one to three, which would decrease transport cycle times and times waiting by

Como se observa en la Figura 1, 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.

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 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 3 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 empleando teoría de colas al utilizar los métodos de programación lineal y teoría de colas para estaciones únicas de servicio. En estos 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.

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 aumentar los centros de recepción de uno a tres, los que disminuiría los tiempos de ciclo del transporte y los tiempos

external means of transport in the field, helping to reduce costs for system stops.

pos de espera por medios de transporte externos en el campo, contribuyendo a disminuir los costos por paradas del sistema.

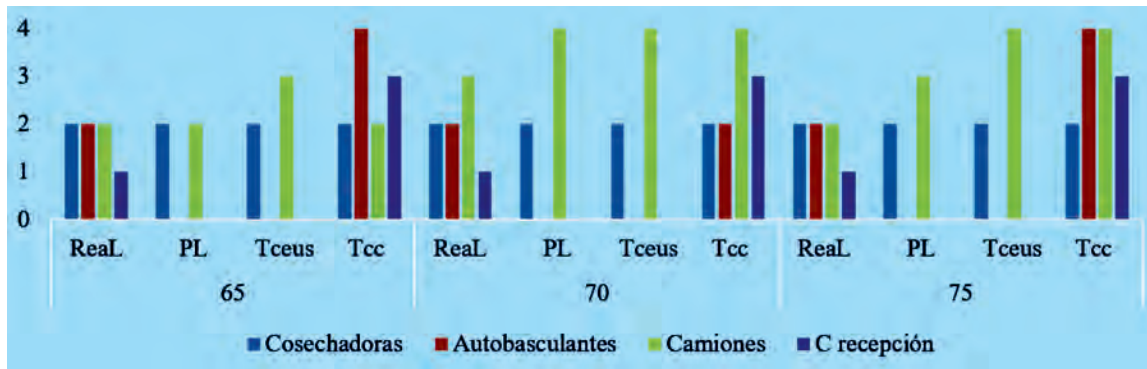


FIGURE 2. Formation of the real brigade and that obtained by mathematical methods
 FIGURA 2. Conformación de la brigada real y la obtenida por los métodos matemáticos.

Likewise, when comparing the stop costs that were obtained experimentally, with those obtained by integrating the mathematical methods Linear Programming, single-station Queuing Theory and cascade Queuing Theory with the Markov Chain Method, it can be seen that the difference oscillates between 17,34 and 44,86 peso/h, decreasing the costs for stops calculated between 27,89 and 68,31% with respect to those obtained experimentally

Así mismo, al analizar los costos por paradas que se obtuvieron experimentalmente, con los obtenidos integrando los métodos matemáticos programación lineal, teoría de cola de estaciones únicas y teoría de colas en cascadas con el método de cadenas de Márkov 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

In order to know what percent, the costs for shutdowns decrease, if the conformations of the proposed brigades are established, the Figure 3 must be observed. In fields of 65 t/ha the decrease would be 46,48% (37,69 peso/h). In the fields of 70 and 75 t/ha, it decreases by 42,19 and 44,86 peso/h, which represents 47,60 and 36,19% of the costs for shutdowns of the system obtained experimentally.

Para conocer que por ciento disminuyen los costos por paradas, si se establecen las conformaciones de las brigadas propuestas se debe observar la Figura 3 En campos de 65 t/ha la disminución sería del 46,48% (37,69 peso/h). En los campos de 70 y 75 t/ha se disminuye en 42,19 y 44,86 peso/h, lo que representa el 47,60 y 36,19% de los costos por paradas del sistema obtenido experimentalmente.

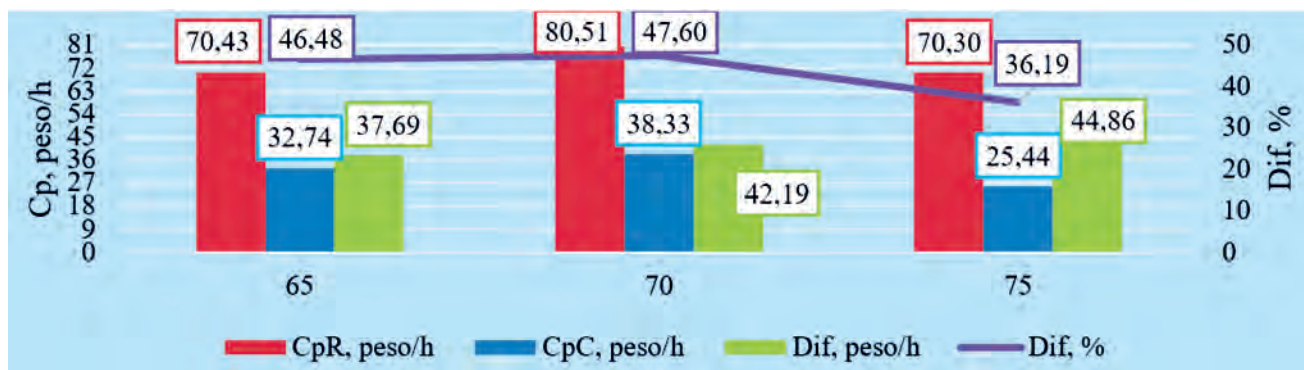


FIGURE 3. Comparison of stop costs.
 FIGURA 3. Comparación de los costos por paradas.

CONCLUSIONS

- The rational conformation of the transport harvest brigade was determined using the methods: Linear Programming, Queue Theory for a single service station and for cascade stations.
- When analyzing the stability of the compositions with the Markov Chain Model, it is found that the most stable variant is the one resulting from conforming the brigade with the cascade Queuing Theory Method when working in fields

CONCLUSIONES

- 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 la resultante de conformar la brigada con el método de teoría de colas en cascadas al trabajar en campos de 75 t/

of 75 t/ha, with two CASE IH 8800 Combine Harvesters and four BELARUS 1523 Tractors + four VTX 10000 self-balancing trailers, four HOWO SINOTRUCK aggregates + two trailers and three reception centers with a probability of 53,79% that the cycle is not interrupted and a cost per stops of 33,05 peso/h system.

- From the rationalization criteria, based on the integration of the mathematical models, it is possible to reduce the costs for shutdowns by more than 30%, observing a marked influence as the number of reception centers increases.

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.

- 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.

REFERENCES

- BUFFA, E.S.: *Operations management: problems and models*, Ed. Ediciones Revolucionarias, La Habana, Cuba, 1968, ISBN: 0-471-11867-2.
- CHING, W.K.; NG, K.M.: *Markov Chains: Models, Algorithms and Applications*, Ed. Springer US, Nueva York, USA, 2006, ISBN: 978-1-4614-6312-2.
- COOPER, R.: "Introduction to Queuing Theory", En: *ACM'81 conference, 1981*, Ed. Elsevier North Holland, vol. 1, New York, USA, pp. 119-122, 1981.
- ESCUADERO, L.F.: *Aplicaciones de la teoría de colas*, Ed. Deusto., Bilbao, España, 259 p., 1972.
- FONOLLOSA, G.J.B.; SALLÁN, J.M.; SUÑÉ, A.: *Métodos cuantitativos de organización industrial II*, Ed. Ediciones UPC, e-book ed., España, 2002, ISBN: 84-8301-794-6.
- GIRALDO, F.: "Cosecha, alce y transporte", *Cenicaña*, 1995, ISSN: 0120-0178.
- HERMANN, H.: "Interactive Markov Chains", En: *Interactive Markov Chains*, Ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Germany, pp. 125-146, 2002, 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. Cambridge: Chapman & Hall, 1st edición ed., Cambridge, USA, 84-122 p., 1997, ISBN: 0 412 60660 7.
- KIJIMA, M.: *Markov processes for stochastic modeling*, Ed. Springer, USA, 2013, ISBN: 1-4899-3132-5.
- KLEINROCK, L.: *Queuing System*, Ed. Wiley, vol. 1: Theory, New York, USA, 1975, ISBN: 0030-364.
- MARTÍNEZ, L.; MATOS, R.N.; PÉREZ, de A.R.L.; MADRUGA, M.Y.: "Optimización del proceso Cosecha-Transporte-Recepción de la caña de azúcar", *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 5(3), 2012, ISSN: 2227-1899.
- MATOS, R.N.; IGLESIAS, C.C.: "Modelo económico-matemático para la organización racional de los medios técnicos en la cosecha-transporte-recepción de la caña de azúcar", *Revista de Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 21(3): 49-54, 2012, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054.
- MEDHI, J.: *Stochastic Models in Queueing Theory*, Ed. Elsevier, Academic Press, San Diego, USA, 2002, ISBN: 0-12-487462-2.
- MOREJÓN, M.Y.; IGLESIAS, C.; DOMÍNGUEZ, G.: "Evaluación de los medios de transporte utilizados en el proceso cosecha-transporte del arroz en el Complejo Agroindustrial "Los Palacios"", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 21(3): 45-48, 2012.
- MOSKOWITZ, H.; WRIGHT, G.P.: *Investigación de Operaciones*, Ed. Prentice Hall Hispanoamericana S.A., México, 1991, ISBN: 2218-3639.
- PRAWDA, J.: *Métodos y modelos de investigación de operaciones II. Modelos Estocásticos*, Ed. Editorial Limusa S.A. De C.V, 1.ª ed., México D. F., 1988, ISBN: 968-18-1247-6.
- RODRIGUEZ, L.Y.; MOREJÓN, M.Y.; SOSA, G.D.M.; MARTÍNEZ, B.O.: "Modelación matemática del complejo cosecha-transporte de la caña de azúcar para su racionalización", *Revista de Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 24(5): 42-48, 2016, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054.
- SADLEIR, C.D.: "Use of the transportation method of linear programming in production planning: A case study", *Journal of the Operational Research Society*, 21(4): 393-402, 1970, ISSN: 0160-5682.
- SUÁREZ, P.C.; RODRÍGUEZ, H.; MÁRQUEZ, L.K.: "Determinación y análisis de los principales índices de explotación de las cosechadoras de caña CAMECO", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 15(4): 69-73, 2006, ISSN: 1010-2760.
- WOLFF, R.W.: *Stochastic Models and the Theory of Queues*, Ed. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA, 1989, ISBN: 978-0-12-487462-6.
- YESIN, K.S.; SEVOSTYANOV, A.: "Logistics of Grain Transportation: Program Exploitation for Calculation of Optimum Number of Vehicles.", *Bulletin of PNU*, 32(1), 2014, ISSN: 1996-3440.

Yanara Rodríguez-López, Prof. Auxiliar, Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, San José de Las Lajas, Mayabeque, Cuba, e-mail: yanita@unah.edu.cu

Yanoy Morejón-Mesa, Prof. Titular, Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, San José de Las Lajas, Mayabeque, Cuba, e-mail: yymm@unah.edu.cu

Claudia Cruz-Arredondo, Profesora, Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, San José de Las Lajas, Mayabeque, Cuba, e-mail: yanita@unah.edu.cu

Orlando Martínez-Bao, Prof. Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, San José de Las Lajas, Mayabeque, Cuba, e-mail: ombao@unah.edu.cu

The authors of this work declare no conflict of interests.

This item is under license Reconocimiento-NoComercial de Creative Commons 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0).

The mention of trademarks of specific equipment, instruments or materials is for identification purposes, there being no promotional commitment in relation to them, neither by the authors nor by the publisher.