**AGROCENTRO 2019**

IX Simposio de Ingeniería Agrícola

**Título**

Integración de modelos matemáticos para la racionalización del complejo cosecha-transporte de la caña de azúcar.

***Title***

*Integration of mathematical models to the rationalization of the harvest-transportation complex of the sugar cane*

**Nombre y Apellidos1, Nombre y Apellidos2, …**

MsC. Yanara Rodríguez López[[1]](#footnote-1).

Ing. Claudia Cruz Arredondo:[[2]](#footnote-2)

DrC Yanoy Morejón Mesa. [[3]](#footnote-3)

**Resumen:**

La presente investigación se realizó en la Unidad Empresarial de Base “Héctor Molina Riaño”, con el objetivo de determinar la conformación racional de los medios que intervienen en el proceso cosecha-transporte de la caña de azúcar mediante la integración de varios modelos matemáticos: Teoría de Cola (estados simples y en cascada) y la Programación Lineal y se determinó la estabilidad del complejo aplicando la Cadena de Márkov. Para esto se partió de la evaluación de los índices tecnológicos, económicos y de explotación de los elementos que conforman la brigada de cosecha, transporte y recepción de la caña de azúcar cosechando en campos con en un rendimiento agrícola de 22,08 t/ha. Se determinó con el empleo de la Teoría de Cola, que la cantidad racional de conjuntos de transporte para una distancia de 18 km utilizando dos (2) cosechadora es de tres (3) medios de transporte con un costo mínimo por paradas de 62,22 peso/h, cuya conformación fue validada con el empleo de la teoría de colas en cascadas agregando la existencia de 4 autobasculantes en el sistema. Con la aplicación de la Programación Lineal se determinó que se necesita uno (1) medio de transporte para serviciar a dos (2) cosechadoras teniendo un costo mínimo de 129,71 peso. Con la utilización del modelo de Cadenas de Márkov se determinó que la conformación más estable fue la propuesta por la Teoría de Colas con una probabilidad de transición de 73,54% y de no transición de 20,46% para una afectación económica de 17,23 peso/h.

***Abstract:***

*The present investigation was carried out in the Base Business Unit "Héctor Molina Riaño", with the objective of determining the rational conformation of the media involved in the harvest-transport process of the sugarcane through the integration of the mathematical models: of Tail theory (simple and cascaded states) and Linear Programming. The stability of the complex was determined by applying the Márkov Chain; This is part of the evaluation of the technological, economic and exploitation indexes of the elements that make up the harvest, transport and reception brigade of the sugarcane harvesting in fields with an agricultural yield of 22.08 t / ha. It was determined with the use of the Theory of Tail, that the rational amount of transport sets for a distance of 18 km using two (2) harvester is three (3) means of transport with a minimum cost per stop of 62.22 peso / h, whose conformation was validated with the use of the theory of tails in cascades adding the existence of 4 autobasculantes in the system. With the application of Linear Programming it was determined that one (1) means of transportation is needed to service two (2) harvesters with a minimum cost of 129.71 peso. With the use of the Márkov Chains model it was determined that the most stable conformation was that proposed by the Theory of Tails with a probability of transition of 73.54% and non-transition of 20.46% for an economic impact of 17, 23 peso / h.*

Palabras Claves: Teoría De Cola, Cadenas De Márkov, Programación Lineal

*Keywords: Tail Theory, Markov Chains, Linear Programming*

**1. Introducción**

La caña de azúcar es un cultivo de gran importancia a nivel mundial ya que constituye la principal fuente de azúcar en el mundo. Los mayores productores de azúcar son Brasil, China, Unión Europea (UE) e India, mientras que los principales países exportadores de azúcar son Brasil, Tailandia, Australia, India y Guatemala. Entre los mayores importadores de azúcar se encuentra la UE, Rusia, Estados Unidos (EE.UU), Indonesia y China, mercado que ha mostrado importantes aumentos en su consumo (Amú, 2010, Fernández y Álvarez, 1988; Fernández y Delgado, 1989; Ortiz 2003).

En Cuba constituye un cultivo priorizado por lo cual constituye un eslabón fundamental en la agricultura. Desde la zafra 2001-2002 ha sufrido una gran disminución tanto en las áreas dedicadas a su cultivo, sus niveles de producción como de su rendimiento (Matos e Iglesias, 2012 y Rodríguez et al, 2015). Por lo anterior planteado se ha intensificado la investigación científica, en este sector, en busca de optimizar su producción, disminuyendo los costos y aumentando los rendimientos, para así obtener mayores ganancias

Hoy son varios los factores que limitan el trabajo del complejo mecanizado cosecha–transporte–recepción de la caña de azúcar, estos inciden negativamente en la posibilidad de incrementar la productividad del mismo utilizando el transporte por camiones (Matos, et al, 2012; 2014). En busca de aumentar la producción se viene trabajando hace varios años en la optimización del proceso cosecha-transporte de la caña de azúcar. Para esto se han estudiado las principales afectaciones en el proceso y se han identificado entre ellas los tiempos de esperas ocurridos en las diferentes partes del ciclo productivo y la conformación ideal del complejo cosecha-transporte en dependencia del rendimiento agrícola presente en el campo. Por lo cual surge la necesidad de investigar la composición racional del complejo cosecha-transporte de la caña de azúcar mediante la integración de modelos matemáticos, con el propósito de lograr una mayor estabilidad y obtener ventajas económicas en el mismo.

En correspondencia con lo planteado, la presente investigación tiene como objeto de estudio: el complejo cosecha-transporte de la caña de azúcar. Teniéndose como problema científico: Deficiente organización del complejo de máquinas que intervienen en el proceso de cosecha-transporte de la caña de azúcar, lo cual propicia elevadas pérdidas económicas y de tiempo productivo. Para la solución del problema científico planteado se formula la siguiente Hipótesis: A través de la integración de modelos matemáticos es posible racionalizar la estructura del complejo cosecha-transporte de la caña de azúcar, propiciando un efecto económico y tecnológico positivo. A partir de la problemática a resolver se establece el siguiente objetivo general: Determinar la estructura racional del complejo cosecha-transporte de la caña de azúcar mediante la Programación Lineal, Teoría de Cola (estaciones simples y múltiples) y el modelo de Márkov.

**2. Metodología**

Teoría de cola para una estación única de servicio.

Este método de cálculo para la organización en flujo de la producción es clásico, y presenta la posibilidad de obtener una misma magnitud de la productividad de cualquier conjunto componente del flujo, durante el período de tiempo observado. Como se conoce que el trabajo de la mayoría de los conjuntos agrícolas es cíclico y la productividad es constante en iguales condiciones de producción, es posible predeterminar el tiempo de cada ciclo (Bini, et al, 2005; Hermanns, 2002, Kijima, 1997). Por ejemplo, el tiempo de recorrido de los medios de transporte y el tiempo de entrega del producto durante su recepción.

Económicamente es conveniente que la relación entre la cantidad de cosechadoras y los medios de transporte durante el proceso cosecha, sea la mínima necesaria [Ramírez et al, 1993]. Este criterio se logra con la función objetivo:

, peso/h (1)

donde**:**

Cpc, Cpt - costo horario por paradas de la cosechadora y de los medios de transporte, peso/h;  número medio de servidores (medios de transporte) que llegan o entran al sistema de servicio masivo o sistema de espera en una unidad de tiempo, h-1; Tiempo medio de espera de cada solicitud de la cosechadora, h; Cantidad de medios de transporte para el serviciaje de un grupo de cosechadoras; Pcola-probabilidad de que una unidad arribe al sistema y tenga que esperar o sea la probabilidad de que exista una cola tanto de los medios de transporte por las cosechadoras, como de las cosechadoras por los medios de transporte.

Es posible determinar la probabilidad de que dos o más entradas (cosechadoras) soliciten servicio al mismo tiempo mediante la siguiente expresión:



 (2)

donde**:**

C- cantidad de cosechadoras que intervienen en el proceso.

 (3)

donde**:**

Cantidad de medios de transporte que existen en dicho eslabón (canales de servicio existentes en el sistema).

La probabilidad de que exista una cola tanto de los medios de transporte por las cosechadoras, como de las cosechadoras por los medios de transporte, se determina de la siguiente manera:



 (4)

Teoría de cola para estaciones consecutivas o de cascadas.

Por el sistema tradicional de cálculo se puede obtener la cantidad de medios de transporte, pero es imposible determinar la cantidad media de cosechadoras en cola para ser serviciadas, y la duración media del tiempo de espera de los medios de transporte. Por esta causa evaluar las pérdidas por las paradas de las cosechadoras no es posible por una u otra comparación cuantitativa del eslabón de transporte; por lo que el complejo cosecha–transporte se subordina a un proceso de servicio masivo. Para esto se calculan las siguientes probabilidades:

Probabilidad de que no halla unidades en el sistema**.**

$P\_{o}=\frac{1-ρ}{(1-ρ)^{M+1}}$ . (5)

Probabilidad de que haya n unidades en el sistema**.**

$P\_{n}=\frac{(1-ρ)}{(1-ρ)^{M+1}}∙ρ^{n}=Po∙ρ^{n}$ para n =1, 2.....M (6)

Número medio de unidades en el sistema.

$L=\frac{ρ}{1-ρ}-\frac{(M+1)∙ρ^{M+1}}{(1-ρ)^{M+1}}$ (7)

Número medio de unidades en la cola**.**

$L\_{q}=L-(1-P\_{0})$ (8)

Tiempo medio de estancia de una unidad en el sistema**.**

$W=\frac{L}{\overbar{λ}}$ ; h (9)

donde**:**

$\overbar{λ}=λ×\left(1\mp P\_{M}\right)$ (10)

PM: probabilidad de que un cliente arribe al sistema y no se pueda incorporar.

Tiempo medio de estancia de una unidad en la cola.

$W\_{q}=\frac{Lq}{\overbar{λ}}$ ; h (11)

donde**:**

Lq: Número medio de unidades en la cola.

Probabilidad de que una unidad acuda al sistema y tenga que esperar**.**

$P\left(t>0\right)=\sum\_{n=1}^{M-1}P\_{n}$ (12)

Fracción de clientes potenciales que se pierden. Probabilidad de que 1 cliente arribe al sistema y no se pueda incorporar.

$P\_{M}=1\mp \sum\_{n=0}^{M-1}Pn=Po∙ρ^{M}$ (13)

## Metodología para la determinación de la racionalización de los medios que intervienen en el proceso cosecha–transporte con el empleo de la Programación Lineal.

La programación lineal es un procedimiento o algoritmo matemático mediante el cual se resuelve un problema indeterminado, formulado a través de un sistema de inecuaciones lineales, optimizando la función objetivo, también lineal.

1. Primeras restricciones para asegurar el cumplimiento del volumen total de trabajo, para todos los períodos.

 k=1…K (14)

donde:

i - índice del tipo de transporte; j - índice del tipo de remolque;k - índice de la labor de transporte; t - índice de la distancia de transportación; b k - volumen dado de trabajo; I -Cantidad de medios de transporte (KAMAZ); J - Cantidad de remolques; T - Distancia de transportación.

1. El segundo grupo de restricciones, para determinar la cantidad racional de medios de transporte a utilizar en la brigada de cosecha:

 i=1…I (15)

donde**:**

Wt– productividad del medio de transporte, t/h; Tc - tiempo de ciclo de transportación; h; Q- Volumen de producción, t; K - Cantidad de ciclos de transportación a realizar.

Esta restricción incluye a todos conjuntos de transporte para determinar la cantidad necesaria de los mismos.

1. Es necesario incluir una restricción para que la cantidad de cosechadoras sea igual a uno.
2. Condición de no negatividad.

 (16)

La función objetivo en este modelo se describe de la siguiente forma:

MIN Z =  (17)

donde:

Cexp – Costos de explotación por tonelada cosechada y transportada con el medio de transporte (i) KAMAZ con remolque *(*j) en la transportación, donde se incluyen los costos por salario, combustible y lubricantes.

, peso/h (18)

donde:

Costos Fijos (Cf). Son aquellos que no dependen del uso de la maquinaria y están conformadas por la depreciación (Cd). La misma se determina de la siguiente manera:

**Modelo de Márkov para racionalización de la brigada cosecha - transporte.**

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 tiempode una manera probabilística, lo cual no es más que una sucesión de observaciones y los valores de estas no se pueden predecir exactamente. Para dicho modelo se tiene en cuenta que los estados que forman el proceso son: caña de azúcar en cosecha Ec, caña de azúcar en transporte E**t** y caña de azúcar en el centro de recepción Er y la cantidad de medios de transporte necesarios se obtiene por el método determinista y se combina con los criterios de probabilidad de transición provenientes de la matriz elaborada (Ching, et al, 2006; Sánchez-Brenes. et al, 2015).

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 tabla de Poisson (Yesin y Sevostyanov, 2014), para esto se tienen las observaciones realizadas a la cola de los camiones en el central y se determina la esperanza matemática para la cosecha $λ$c y el transporte $λ$t (expresión 41 y 42).

Para la cosecha se determina a partir del coeficiente de disponibilidad técnica de la misma:

$λ\_{c}=n\_{c}\*k\_{d\_{c}}$ (19)

donde:

$n\_{c}$- número de cosechadoras;

Para el transporte se tiene en cuenta además de la disponibilidad técnica de los mismos:

$λ\_{t}=n\_{t}\*k\_{dt}$ (20)

donde:

$n\_{t}$- número de camiones;

Teniendo $λ$c,$λ$t, y K (número de camiones a observar) para la cosechadora y el transportese pueden determinar las probabilidades de transición a través de las tabla de Poisson .

Para determinar la probabilidad de transición (Pt) y no transición (Pnt) del central se hicieron 15 observaciones que se promediaron determinando el número de camiones en espera para entregar el producto (ncer) y el total de camiones en el centro de recepción (ntr);

$P\_{nt}≡\frac{n\_{cer}}{n\_{tr}}$ (21)

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

$P\_{t=}1-P\_{nt}$ (22)

Mediante lo antes expuesto se puede determinar la matriz de transición de un estado a otro:

$\begin{matrix}E\_{c}\\E\_{t}\\E\_{r}\end{matrix}\begin{array}{c}\begin{matrix}E\_{c}&E\_{t}&E\_{r}\end{matrix}\\\left(\begin{matrix}P\_{nt}&P\_{t}&0\\0&P\_{nt}&P\_{t}\\P\_{t}&0&P\_{nt}\end{matrix}\right)\end{array}$ (23)

Basado en el análisis anteriormente realizado se puede obtener una estimación de la afectación económica por la rotura del ciclo Cpet a parir 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.

$C\_{pet=}\left(C\_{pc}\*P\_{ntc}\right)+\left(C\_{pt}\*P\_{nt\_{t}}\right)+\left(C\_{pcr}\*P\_{nt\_{r}}\right);peso/h$ (24)

donde:

Cpc, pt y Pcr- costo por parada en la cosecha, transporte y centro de recepción del central respectivamente; peso/h

**3. Resultados y discusión**

**Determinación de la composición racional de los medios que intervienen en el proceso cosecha–transporte con el empleo de la Teoría de Cola.**

Para realizar la conformación racional del complejo de los medios de transporte se tomó como referencia una brigada de cosecha conformada por dos cosechadoras Case IH A 8800 y una disponibilidad de cinco (5) camiones HOWO SINOTRUK cada uno con dos remolques. La distancia de transportación del campo en cosecha al Central es de 18 km, compartido en 12 km por terraplén y 6 km por viales asfaltados, y el rendimiento agrícola fue de 22,8 t/ha.

Para realizar la determinación de la conformación racional de los medios de transporte en el proceso de cosecha-transporte se utiliza como criterio económico el mínimo costo de la suma por paradas de la cosechadora y los medios de transporte, para lo cual se emplea la Teoría de Colas.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos:

Como se mencionó anteriormente la cosechadora en tiempo de explotación logró una productividad (W07) de 23,69 t/h en campos con rendimiento agrícola de 22,8 t/ha. Para obtener el tiempo de llenado del medio de transporte se parte del tiempo de llenado del autobasculante (tllab), y considerando que la cantidad de estos que se necesita para llenar el medio de transporte es de 6, el tiempo de llenado del medio de transporte es 2,66 h. En la transportación se determinó el tiempo de ciclo obteniéndose un valor de 4,94 h, debido principalmente a las condiciones de camino, el bajo rendimiento del campo, lo cual influye directamente con el tiempo de llenado del medio de transporte.

El número de medios de transporte requerido es 2,44 tomándose tres (3) medios de transporte según el método de cálculo utilizado para las condiciones de transportación por terraplén y asfalto desde el campo en cosecha hasta el central, teniendo en cuenta los distintos elementos que conforman el tiempo de ciclo de transportación. El tiempo medio de llenado del autobasculante para este rendimiento agrícola es igual a 0,21 h. Por lo que se tiene que en una hora el canal puede satisfacer 4,76 conjuntos de transporte.

La capacidad del canal de servicio en una hora  es de 0,48.

La densidad de solicitudes del sistema es de 4,9 > 3, por lo que el régimen de funcionamiento del sistema de servicio no es estable y el sistema no puede satisfacer las solicitudes realizadas.

La probabilidad que en el sistema no existan solicitudes de servicio, o sea todos los medios de transporte estén en espera (Po)es 0,005.

La probabilidad de que estén ocupados los conjuntos de transporte (Pc) es de 0,03.

La probabilidad de que exista una cola en el complejo cosecha-transporte (Pcola) es de 0,97.

El largo medio de la cola o cantidad de solicitudes en espera de ser satisfechas (ms) es 0,52.

El tiempo medio de espera del complejo cosecha-transporte es (tesp), es de 0,10 h.

El costo por paradas de la cosechadora y medios de transporte (S) se realizaron en el mismo orden para tres (3), cuatro (4) y cinco (5) conjuntos de transporte respectivamente los cuales se muestran en la Tabla 1

Tabla 1. Costos por paradas de la cosechadora.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| n |  | µ | x | Po | Pc | Pcola | ms | Tesp, h | S, peso/h |
| 3 | 4,76 | 0,48 | 4,9 | 0,005 | 0,03 | 0,97 | 0,52 | 0,10 | 69,22 |
| 4 | 4,76 | 0,64 | 3,7 | 0,002 | 0,05 | 0,95 | 0,8 | 0,16 | 95,89 |
| 5 | 4,76 | 0,79 | 3,01 | 0,003 | 0,06 | 0,94 | 3,5 |  0,73 | 226,4 |

En la determinación de la conformación racional y organización en flujo del proceso tecnológico cosecha-transporte de la caña de azúcar, es importante señalar el impacto económico que se produce al determinar la cantidad racional de conjuntos de transporte para dos cosechadoras, obteniéndose que por pérdidas totales por paradas (cosechadora + medio de transporte) resulta racional la asignación de tres medios de transporte con un costo de 69,22 peso/h, ya que con la conformación de cuatro medios de transporte hay una diferencia económica de 26,67 peso/h, y con la de cinco medios es de 157,18 peso/h.

Teoría de cola para estaciones consecutivas o de cascadas.

Mediante la Teoría de Cola 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 para cada subsistema (Cosecha, Transporte y Recepción).

En el subsistema Cosecha, se contaba con cuatro (4) autobasculantes (servidores) para darle servicio a dos (2) cosechadoras (clientes), donde el tiempo de llenado del autobasculante es de 0,21 h con respecto al rendimiento agrícola del campo de 22,8 t/ha.

Con cuatro autobasculantes (servidores) se tiene que en una hora el canal puede satisfacer 4,76 cosechadoras (clientes). La capacidad del canal de servicio en una hora  es de 19,04. La densidad de solicitudes del sistema (ρ) fue de 0,25.

La probabilidad de que no haya cosechadoras en el sistema (Po) fue de 0,75, y la probabilidad de que haya n cosechadoras en el sistema (Pn)dio como resultado 0,003.

El número medio de cosechadoras en el sistema (L) y en la cola (Lq) es de 0,31 y 0,06 respectivamente y el tiempo medio de estancia de una cosechadora en el sistema (W) y en la cola (Wq) es de 0,06 h 0,012 h respectivamente.

En la fracción de clientes potenciales que se pierden (Pm) se obtuvo un resultado de 0,003.

Los cálculos se realizaron en el mismo orden para dos, tres, cuatro y cinco números de servidores (autobasculantes) respectivamente los cuales se muestran en la Tabla 2. Con cuatro autobasculantes para serviciar dos cosechadoras la probabilidad de que un cliente arribe al sistema y no se pueda incorporar es de 0,003.

Tabla 2 Resultados del modelo de espera con dos estaciones en cascadas utilizando la Teoría de Cola, para cada subsistema (Cosecha, Transporte y Recepción).

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| n |  | µ | ρ | Po | Pn | L | Lq | W | Wq, h | PM |
| Subsistema Cosecha |
| 2 | 4,76 | 9,52 | 0,5 | 0,57 | 0,14 | 0,56 | 0,13 | 0,14 | 0,03 | 0,14 |
| 3 | 4,76 | 14,2 | 0,34 | 0,67 | 0,026 | 0,45 | 0,12 | 0,1 | 0,02 | 0,026 |
| 4 | 4,76 | 19,04 | 0,25 | 0,75 | 0,003 | 0,31 | 0,06 | 0,06 | 0,012 | 0,003 |
| 5 | 4,76 | 23,8 | 0,2 | 0,79 | 0,0002 | 0,25 | 0,04 | 0,05 | 0,01 | 0,0002 |
| Subsistema Transporte |
| 3 | 0,25 | 0,75 | 0,33 | 0,68 | 0,024 | 0,44 | 0,12 | 1,8 | 0,5 | 0,024 |
| 4 | 0,25 | 1 | 0,25 | 0,75 | 0,03 | 0,32 | 0,07 | 1,28 | 0,28 | 0,003 |
| 5 | 0,25 | 1,25 | 0,2 | 0,8 | 0,0003 | 0,25 | 0,05 | 1 | 0,2 | 0,0003 |
| 6 | 0,25 | 1,5 | 0,16 | 0,84 | 0,00001 | 0,19 | 0,03 | 0,76 | 0,12 | 0,00001 |
| Subsistema Recepción |
| 1 | 0,71 | 0,73 | 0,97 | 1 | 0,97 | 0,16 | 0,16 | 7,6 | 7,6 | 0,97 |
| 2 | 0,71 | 1,42 | 0,5 | 0,43 | 0,1 | 0,57 | 0,01 | 0,9 | 0,02 | 0,1 |
| 3 | 0,71 | 2,14 | 0,35 | 0,68 | 0,02 | 0,44 | 0,12 | 0,64 | 0,18 | 0,02 |
| 4 | 0,71 | 2,8 | 0,25 | 0,75 | 0,03 | 0,33 | 0,08 | 0,47 | 0,12 | 0,03 |
| 5 | 0,71 | 3,57 | 0,12 | 0,88 | 0,002 | 0,14 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,002 |

En el subsistema Transporte, se contaba con cinco (5) medios de transporte, pero se va a tomar tres (3) medios de transporte (servidores), pues en la conformación racional de la brigada cosecha-transporte dio como resultado que para el rendimiento del campo es más económico trabajar con esta cantidad, los cuales van a brindarle servicio a cuatro (4) autobasculantes (clientes), donde el tiempo de llenado del medio de transporte es de 4 h con respecto al rendimiento del campo de 22,8 t/ha (Medina, 2017).

## Determinación de la composición racional de los medios que intervienen en el proceso cosecha–transporte 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 QMWIN como método de solución. En el proceso se tomaron como variables de decisión la cantidad de cosechadoras necesarias en el proceso (X1) y la cantidad de medios de transportes necesarios en el proceso (X2), además de las siguientes restricciones:

R1: X2 ≤ 5

R2: X2 ≥ 1

R3: X1 = 2

R4: 22,79 X1 + 18,04 X2 ≥ 22,80

En dicho modelo de optimización se quiere minimizar los costos específicos de las variables de decisión por lo cual se obtuvo la siguiente función objetivo:

Z=9,85 X1 + 110,01 X2

Luego de la introducción del modelo matemático en el Software QMWIN se obtuvo que para el menor valor de Z, que es de 129.71 peso, se necesitan utilizar 2 cosechadoras y 1 medio de transporte

## Determinación de la estabilidad del proceso cosecha–transporte- recepción con el empleo de la cadena 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 Ec, la caña en transporte Et y la caña en recepción Er, representados en la figura 3 donde se muestran además el flujo de estos estados.

Ec

Et

Er

Para la aplicación de este modelo se determinaron las esperanzas matemáticas (λ) para el estado de caña en cosecha y en transporte 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. En el caso específico del estado de transporte se calculan los indicadores para tres variantes diferentes estas están dadas por los diferentes modelos matemáticos aplicados en la determinación del complejo cosecha-transporte de la caña de azúcar. Los resultados de lo anterior expresado se encuentran en la tabla 3 donde PL se refiere al método de programación lineal, TCes y TCc a la teoría de cola con estaciones simples y en cascada respectivamente.

Tabla 3 Datos para la conformación de la matriz de transición.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Ec | Et | Er |
| PL | TCes | TCc |
| $$λ\_{c}$$ | $$P\_{nt}$$ | $$P\_{t}$$ | $$λ\_{c}$$ | $$P\_{nt}$$ | $$P\_{t}$$ | $$λ\_{c}$$ | $$P\_{nt}$$ | $$P\_{t}$$ | $$λ\_{c}$$ | $$P\_{nt}$$ | $$P\_{t}$$ | $$P\_{nt}$$ | $$P\_{t}$$ |
| 1,93 | 0,2700 | 0,7300 | 0,95 | 0,3659 | 0,6341 | 2,85 | 0,2046 | 0,7354 | 2,85 | 0,2046 | 0,7354 | 0,5900 | 0,4100 |

Partiendo de los datos reflejados en la tabla 3.7 se elaboraron las diferentes matrices estocásticas. Como se puede observar en la misma los valores de la Teoría de colas en estaciones simples y en cascada coinciden ya que los valores de la cantidad de medios de transportes necesarios en estos son iguales (justificado por el bajo rendimiento agrícola que ralentiza el ciclo de transporte) por lo cual la matriz de ambos también.

Mediante los resultados obtenidos se formó la matriz de transición 25 que representa para el caso del estado de Caña en Transporte la cantidad obtenida del modelo de Teoría de Cola en estado simple y en cascada. En el estado de caña en cosecha la probabilidad de transición es de 73% y la de no transición es de 27%, siendo para caña en transporte de 20,46% la de no transición y 73,54% la de transición, en el caso de la recepción 41% la de transición y 59% la de no transición.

$\begin{matrix}E\_{c}\\E\_{t}\\E\_{r}\end{matrix}\begin{array}{c}\begin{matrix}E\_{c}& E\_{t}& E\_{r}\end{matrix}\\\left(\begin{matrix}0,2700&0,7300&0\\0&0,2046&0,7354\\0,4100&0&0,5900\end{matrix}\right)\end{array}$ (25)

Mediante los resultados obtenidos empleando la programación lineal se formó la matriz de transición 26. En el estado de caña en cosecha la probabilidad de transición es de 73% y la de no transición es de 27%, siendo para caña en transporte de 36.59% la de no transición y 62,41% la de transición, en el caso de la recepción 41% la de transición y 59% la de no transición.

$\begin{matrix}E\_{c}\\E\_{t}\\E\_{r}\end{matrix}\begin{array}{c}\begin{matrix}E\_{c}& E\_{t}& E\_{r}\end{matrix}\\\left(\begin{matrix}0,2700&0,7300&0\\0&0.3659&0.6341\\0.4100&0&0.5900\end{matrix}\right)\end{array}$ (26)

Luego de tener definidas las matrices de transición se determinó la afectación económica por rotura de los diferentes ciclos que representan las diferentes conformaciones del complejo cosecha-transporte de la caña de azúcar, los mismos se pueden observar en la tabla 4.

Tabla 4. Comparación de estabilidad y afectación económica de los modelos empleados.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Modelo matemático | nmt | $$C\_{pet }$$ |
| Programación Lineal | 1 | 20,82 |
| Teoría de cola en estado simple | 3 | 17,23 |
| Teoría de cola en estado múltiple | 3 | 17,23 |

Al comparar los resultados de transición, no transición y costo económico de los diferentes modelos se puede observar que la composición más estable es la resultante de la aplicación de la teoría de colas, tanto en estado simple como en cascadas, teniendo estos una probabilidad de transición de 73,54% y de no transición de 20,46%, al igual que el menor costo económico que fue de 17,23 peso teniendo una diferencia de la Programación Lineal de 3,59 peso.

**4. Conclusiones**

1. Con el empleo de la Teoría de Cola simple se determinó que para dos (2) cosechadoras la cantidad racional de medios de transporte es de tres (3) con un costo mínimo por paradas de 69,22 peso/h.
2. Mediante la Teoría de Cola en cascadas se obtuvo que la brigada debe estar conformada por dos (2) cosechadoras, cuatro (4) autobasculantes y tres (3) medios de transporte con un costo mínimo por paradas de 69,22 peso/h.
3. Con el empleo de la Programación Lineal la brigada debe estar conformada por dos (2) cosechadoras y uno (1) medio de transporte obteniendo una pérdida económica mínima de 129,71 peso para el volumen de producción realizado.
4. La conformación más estable empleando el modelo de Cadenas de Márkov con una probabilidad de transición de 73,54% y una de no transición de 20,46%, además de una afectación económica de 17,23 peso/h fuel la obtenida utilizando las variantes de la Teoría de Colas de dos (2) cosechadoras, cuatro (4) autobasculantes y tres (3) medios de transporte.

**5. Referencias bibliográficas**

1. Aguilera, O y 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. Publisher: Grin Verlag (Aug. 5 2013) ISBN-10: 365646779X; ISBN-13: 978-3656467793
2. Amu, L. G. Logística de cosecha. Evaluación de tiempos y movimientos. Indicadores y control. Revista Tecnicaña No.26. 25-30pp. ISSN: 0123-0409. Colombia. 2010.
3. Bini, D., Latouche G.; Meini. B. Numerical Methods for Structured Markov Chains, Oxford University Press, Inc. ISBN: 0198527683 Nueva York. 2005.
4. Ching, W. K. y M. K. Ng: Markov Chains: Models, Algorithms and Applications, Publisher Springer US, Nueva York, 2006. ISBN: 978-1-4614-6312-2
5. Fernández, A. y Álvarez, E. Determinación de los principales indicadores de fiabilidad de la cosechadora de caña KTP-1. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias. ISSN: 2071-0054. Cuba. Vol.1, No 3. pp. 57-60. 1988.
6. Fernández, A. y Delgado, N. Análisis del trabajo del parque de tractores en función del número de roturas imprevistas. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, ISSN: 2071-0054. Cuba. Vol.2, No. 1 pp. 27-32. 1989.
7. Hermanns H. Interactive Markov Chains. Publisher: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Series Volume: 2428. ISBN: 978-3-540-45804-3. Series ISSN: 0302-9743. 217 p; pp 125-146. Berlin 2002
8. Kijima, Masaaki. Markov Processes for Stochastic Modeling (1st edición). Cambridge: Chapman & Hall. ISBN 0 412 60660 7. 194 p; pp84-122. Cambridge, 1997
9. Matos, N., Iglesias C. Modelo económico–matemático para la organización racional de los medios técnicos en la cosecha–transporte-recepción de la caña de azúcar. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias. Vol.21. No.3. ISSN: 2071-0054. Cuba. 2012a.
10. Matos, N. et al. Optimización del proceso cosecha – transporte – recepción de la caña de azúcar. Revista Cubana de Ciencias Informáticas (RCCI). ISSN:1994-1536 Vol. 5. No. 3.2012b.
11. Matos, N. et al. Organización racional del complejo de máquinas en la cosecha-transporte - recepción de la caña de azúcar en la Empresa Azucarera “ARGENTINA”. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias. Vol.23. No.2. Cuba.2014. ISSN: 2071-0054.
12. Ortiz, J. Las máquinas agrícolas y su aplicación. Monografías, Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (España). Edición: reimpresa; Editor: Mundi-Prensa, 2003. ISBN: 8484761177, 9788484761174. N.º de páginas: 526. pp: 247-295
13. Rodríguez López, Y., Morejón Mesa, Y., Sosa Guerra, D.M.; Martínez Bao, O. Modelación matemática del complejo cosecha-transporte de la caña de azúcar para su racionalización. RCTA. Vol. 24. No. Especial. 2015. ISSN: 2071-0054.
14. Sánchez-Brenes. et al. Aplicación de Cadenas de Markov en un proceso de producción de plantas in vitro. Tecnología en Marcha. Vol. 29, Nº 1. 2015, enero-marzo. Pág 74-82. ISSN 0379-3982
15. Shkiliova, L., Suárez, C e Iglesias, C. Fiabilidad de los complejos tecnológicos. RCTA, Vol.9, No 3 y 4, pp. 23-29. UNAH. La Habana, Cuba. 2000. ISSN: 2071-0054.
16. Yesin, K.S.; Sevostyanov A.L. Logistics of Grain Transportation: Program Exploitation for Calculation of Optimum Number of Vehicles. Ecology and Transport. HERALD PNU. № 1 (32). 2014. ISSN 1996-3440. [En línea] 2014. Disponible en <http://pnu.edu.ru/media/vestnik/articles-2014/117-124> [Consulta: 10 de diciembre 2017]. 2017.
1. : Departamento de Ingeniería Agrícola en la Universidad Agraria de la Habana (UNAH).Cuba yanita@unah.edu.cu. [↑](#footnote-ref-1)
2. Universidad Agraria de la Habana (UNAH). Cuba claudiaca@unah.edu.cu. [↑](#footnote-ref-2)
3. Centro de Mecanización Agropecuaria (UNAH). Cuba. ymm@unah.edu.cu . [↑](#footnote-ref-3)