

# 8.



*La Calidad Académica,  
un compromiso institucional*



## Modelo para asignación de máquinas cosechadoras a cultivos de arroz

Puentes, Jorge Armando,  
Arango, Carlos Alberto y  
Orejuela, Juan Pablo  
(2019) Modelo para  
asignación de máquinas  
cosechadoras a cultivos  
de arroz.  
Criterio Libre, 17 (30)  
pp. 213-229  
ISSN 1900-0642

*Jorge Armando Puentes  
Carlos Alberto Arango  
Juan Pablo Orejuela*



# MODELO PARA ASIGNACIÓN DE MÁQUINAS COSECHADORAS A CULTIVOS DE ARROZ

MODEL FOR ALLOCATION OF HARVESTING MACHINES TO RICE CROPS

MODELO PARA ALOCAÇÃO DE MÁQUINAS DE COLHEITA A CULTURAS DE ARROZ

MODÈLE D'ATTRIBUTION DE MACHINES DE RÉCOLTE À DES CULTURES DE RIZ

JORGE ARMANDO PUENTES

CARLOS ALBERTO ARANGO

JUAN PABLO OREJUELA

## RESUMEN

En Colombia las pequeñas plantaciones de arroz deben asociarse con otras cercanas para diluir los costos fijos de cosecha. Estas asociaciones contratan con terceros las máquinas combinadas que son las encargadas de hacer la siega, la trilla y la limpieza del grano. En la búsqueda de la eficiencia se debe gestionar de manera centralizada el proceso de programación de las fechas en que cada cultivo será atendido por las máquinas combinadas, considerando las diferentes eficiencias de las máquinas, las condiciones del terreno y los sobrecostos por violar las ventanas de tiempo asociadas al tiempo de cosecha de los cultivos. En tal sentido, el presente trabajo desarrolla una propuesta de gestión para abordar la problemática descrita, basada en un modelo de programación lineal entero, el cual minimiza los costos de la

\* Artículo de investigación realizado en el marco del Proyecto de Investigación titulado, Gestión de operaciones en el agro industrial del arroz.

\*\* Ing. Industrial, Corporación Universitaria del Caribe, Colombia. e-mail: jorge.puentes@cecar.edu.co, Maestría en curso, en ingeniería industrial, Instituto Tecnológico de Celaya, Guanajuato, México

\*\*\* Ph.D., Profesor Asistente. Departamento: Administración y organizaciones. Universidad del Valle, Colombia, Calle 4B No 36-00; edificio 124 oficina: 304, Cali, Valle del Cauca, Colombia, e-mail: carlos.arango@correounivalle.edu.co Grupo de Investigación: Negocios Internacionales y Comercio Exterior.

\*\*\*\* M.Sc., Profesor tiempo completo. Escuela de Ingeniería Industrial. Universidad del Valle, Colombia, calle 13 No 100-00; edificio 357 oficina: 2007-3, Cali, Valle del Cauca, Colombia, e-mail: juan.orejuela@correounivalle.edu.co Grupo de Investigación: Logística y Producción.

cosecha que se realiza a tiempo y los costos por cosechar los cultivos en momentos prematuros o anticipados. El modelo fue validado en una de las asociaciones, en donde se obtuvieron resultados que reducen en 7,04% el costo total de asignación de maquinaria.

**PALABRAS CLAVE:**

asignación de maquinaria, cosecha de arroz, gestión de operaciones, modelación matemática.

**CLASIFICACIÓN JEL:**

L23, M11, C61, D24.

**ABSTRACT**

In Colombia, the small rice plantations must be associated with nearby ones to decrease the fixed costs of harvesting. These associations contract with third parties the mowing, threshing and cleaning combined machines of the grain. In the search for efficiency, the process of scheduling the dates in which each crop will be served by the combined machines must be managed in a centralized manner, taking into account the different machines efficiencies, the conditions of the land and the cost overruns for violating the windows time associated with the harvest time of the crops. In this sense, this article develops a solution to address the described problem, based on a whole linear programming model which minimizes the overall harvest costs and the costs of harvesting the crops in premature or anticipated moments. The model was validated in one of the associations, which showed results that minimize the total cost of machinery allocation by 7.04%.

**Keywords:** allocation of machinery, management of operations, mathematical modeling, rice harvest.

**JEL classification:** L23, M11, C61, D24.

**RESUMO**

Na Colômbia, as pequenas plantações de arroz devem se associar com as próximas para diluir os custos fixos da colheita. Estas associações contratam com terceiros as máquinas combinadas que estão encarregadas de cortar, debulhar e limpar o grão. Na busca pela eficiência, o processo de agendamento das datas em que cada cultura será atendida pelas máquinas combinadas deve ser gerenciado de forma centralizada, considerando as diferentes eficiências da máquina, as condições do terreno e os custos excedentes por violar as janelas de tempo associado ao tempo de colheita das culturas. Neste sentido, este trabalho desenvolve uma proposta de gestão

para abordar o problema descrito, baseado em um modelo de programação linear que minimiza os custos da colheita que é feita em tempo e os custos de colheita das culturas em momentos prematuros ou antecipados. O modelo foi validado em uma das associações, onde foram obtidos resultados que reduzem o custo total de alocação de maquinário em 7,04%.

**Palavras-chave:** alocação de maquinaria, colheita de arroz, gerenciamento de operações, modelagem matemática.

**Classificação JEL:** L23, M11, C61, D24.

## RÉSUMÉ

En Colombie, les petites rizières doivent s'associer aux plantations voisines pour diluer les coûts fixes de la récolte. Ces associations sous-traitent à des tiers les machines combinées chargées de la tonte, du battage et du nettoyage du grain. Dans la recherche de l'efficacité, le processus de planification des dates auxquelles chaque machine sera desservie par les machines combinées doit être géré de manière centralisée, en tenant compte des différences d'efficacité entre les machines, les conditions du terrain et les dépassements de coûts pour violation des fenêtres de temps associé au moment de la récolte des cultures. En ce sens, ce travail développe une proposition de gestion pour résoudre le problème décrit, basée sur un modèle de programmation linéaire, qui minimise les coûts de la récolte effectuée à temps et les coûts de la récolte prématurée. Le modèle a été validé dans l'une des associations où des résultats ont été obtenus, ce qui a permis de réduire le coût total de l'attribution de machines en 7,04%.

**Mots clés:** allocation de machines, gestion des opérations, modélisation mathématique, récolte de riz.

**Classification JEL:** L23, M11, C61, D24.

## 1. INTRODUCCIÓN

La pequeñas agroindustrias en Colombia deben realizar procesos de asociación para poder mitigar los costos fijos de algunos de sus procesos y mejorar la gestión de sus operaciones, en especial en el subsector arrocero los costos de maquinaria para cosecha son altos y, tal como lo plantea Serna (2008), en el proceso de cosecha no solo se presentan cuellos de botella por falta de mano de obra, materiales o equipos, sino que también ocurren problemas ocasionados por una ineficiente gestión de recursos (Cortés, Álvarez & González, 2009)(Cortés et al. 2009), lo cual conlleva muchas veces a incurrir en sobrecostos debido a deficiencias en la planeación (Serna, 2008)(Serna, 2008).

Por lo general las pequeñas agroindustrias del arroz no tienen metodologías formales que permitan asignar a los cultivos la maquinaria adecuada en el momento oportuno (Guzmán, Tirado, Hernández & Cortés, 2018), lo que puede ocasionar que en numerosas ocasiones no se cosechen el total de hectáreas sembradas o que muchos cultivos se cosechen por fuera de su período adecuado de recolecta o se incrementen los costos por tonelada.

La recolección inoportuna del cultivo provoca pérdidas en las propiedades organolépticas del grano, lo cual repercute en su rendimiento económico (Fedearroz, 2014; Miranda et al., 2011; Sánchez & Meneses, 2012)(Fedearroz, 2014; Miranda et al. 2011; Sánchez & Meneses, 2012). Cuando se excede el tiempo de recolección, los agricultores obtienen el menor de los rendimientos debido a que el grano pierde humedad en exceso, y como consecuencia de ello se vuelve frágil y ligero. Lo que afecta el peso del grano y la utilidad del producido (Fedearroz, 2014)(Fedearroz, 2014).

La maquinaria, alquilada por un tercero a la asociación, difiere en cuanto a sus capacidades y eficiencias, constituyendo esto un factor importante para la gestión de las mismas (Furian, Schlosser, Giacomini, Lampert & Machado, 2013)(Furian et al. 2013). El costo de las máquinas se calcula con base en un costo fijo por hectárea y un costo variable dependiente del número de bultos de arroz cosechado en determinado cultivo. No obstante, si el cultivo es cosechado por fuera de su ventana de tiempo, se incurre en un sobre costo que será directamente proporcional a la diferencia de tiempo que exista entre el día de recolección escogido y el último o primer día adecuado para cosechar determinado cultivo, es decir, los límites de la ventana de tiempo del cultivo.

Las asociaciones brindan la posibilidad de gestionar algunas de las complejidades anteriores de manera conjunta y de obtener beneficios por escala. Sin embargo, muchas de ellas igualmente adolecen de estrategias estructuradas para tratar con dichas complejidades. Por otro

lado, las particularidades que cada una presenta hacen necesario el desarrollo de herramientas y metodologías formales para la programación de sus actividades según sus propios requerimientos (Miranda, Castells, Fernández, Santos & Iglesias, 2013)(Miranda et al. 2013).

Teniendo como referencia la anterior información, el objetivo de este artículo se centra en desarrollar un modelo de optimización que permita resolver el problema de la asignación de cosechadoras a los diferentes tipos de cultivos de arroz para asociaciones de pequeños cultivadores, buscando con ello reducir los costos asociados a la cosecha en las ventanas de tiempo y los costos que se generan por cosechar por fuera de ellas.

De manera explícita el problema que se busca resolver es el incremento de los costos de asignación de maquinaria para cosecha y las pérdidas producidas por cosechar por fuera de las ventanas de tiempo apropiadas para tal fin. Este problema se aborda en el contexto de pequeñas agroindustrias de arroz que se asocian para combatir tales costos, buscando de manera centralizada una mejor eficiencia en las maquinarias en todos los cultivos de la asociación.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 COORDINACIÓN DE INSTITUCIONES PARA LA COSECHA

Las asociaciones de pequeñas plantaciones de arroz facilitan la gestión conjunta de problemas, lo cual representa una gran ventaja ya que les permite obtener algunos beneficios por volumen y por aumento en el rango de gestión. En la literatura encontramos diferentes casos de coordinación para diversos sectores agrícolas. Por ejemplo, (Burer, Jones & Lowe, 2008) examinan las prácticas contractuales entre proveedores y minoristas en la industria de semillas agrícolas.

Por su parte, (Pande, 2006) use of the mechanized technology increases output but leaves some population groups worse off. We show that the distributional implications of choosing the mechanized technology restrict the possibility of Pareto-improving coordination by an elected policy-maker, even when we allow for income redistribution. (c examinan la política de la coordinación de la actividad económica liderada por el gobierno en un modelo simple de dos sectores en el cual la elección de la tecnología agrícola por parte de los individuos afecta la industrialización. Además, (Dorward, Kydd & Poulton, 2005) realizan un análisis de las políticas de coordinación del desarrollo para la pequeña agricultura africana.

(Gebresenbet & Ljungberg, 2001) hacen la coordinación y optimización de rutas de transporte de productos agrícolas para atenuar el impacto ambiental. El objetivo principal de su trabajo es mapear el flujo de materiales e investigar las posibilidades del transporte coordinado de productos agrícolas y medios de producción agrícolas, con el apoyo de la tecnología de la información.

## 2.2 TIEMPO OPORTUNO DE COSECHA

La recolección oportuna de un cultivo independientemente de su tipo es una consideración importante dentro de la logística de recolección de la cosecha (Fedearroz, 2014; Miranda et al., 2011; Sánchez & Meneses, 2012) (Fedearroz, 2014; Miranda et al. 2011; Sánchez & Meneses, 2012). Diversos autores han orientado sus investigaciones en la obtención de un tiempo ideal de cosecha para diferentes tipos de alimentos.

Para el caso de la uva (Olego et al., 2016) reaching its highest value just before veraison. Objective criteria for choosing the optimal harvest time require chemical or physicochemical measurements; the determination of malic acid concentration is one of these. The main aim of this work was to develop a predictive model to determine the malic acid concentration in grapes at harvest time as an alternative to commonly used methods, such as HPLC and enzymatic analysis.

Methods and Results: The red grape cultivar *Vitis vinifera* L. Tempranillo was used in this study. Of the 11 predictive parameters measured, titratable acidity (TA) desarrollan un modelo predictivo de regresión múltiple para determinar el momento óptimo de cosecha, tomando como base la determinación de la concentración de ácido málico en uvas en el momento de la cosecha como una alternativa a los métodos comúnmente utilizados.

(Lindemann-Zutz, Fricke & Stuetzel, 2016) presentan un modelo para la planificación del corte y la optimización de la recolección de la cantidad exacta de cabezas de brócoli aprovechables por fecha de cosecha. (Brotons, Manera, Conesa & Porras, 2015) realizan un estudio para maximizar los beneficios obtenidos por los productores de limón en función del tiempo de cosecha de la fruta.

(Ramburan, 2014) cultivar choice, and time of harvest in frost-prone environments is lacking. This study aimed to (i) estudiar el rendimiento y la capacidad de retoño de cultivos de prueba en comparación con estándares comerciales, identifica el momento óptimo de cosecha para maximizar los rendimientos de azúcar, investiga las diferencias de cultivos en el deterioro del rendimiento post-congelación, y obtuvo información sobre las futuras estrategias de prueba de multi-molienda con fines de reproducción.

(Arancibia et al., 2014) and because of the availability and convenience of processed products. The sweetpotato processing industry is expanding and supplying more sweetpotato products than ever before. Unlike the medium-sized roots (U.S. no. 1) investigaron el aumento de rendimiento y las proporciones de grado en respuesta al espaciamiento de la planta de camote y la extensión del período de crecimiento para mejorar la rentabilidad del sistema de producción.

(Ghaffariyan, Naghdi, Ghajar & Nikooy, 2013) skidding with cable wheeled skidder, loading with grapple hydraulic loader and trucking of logs within a cut-to-length harvesting method. The continuous time study method was applied to collect data for felling, skidding, loading and a transpor-

tation model. Multiple regression analysis via SPSS software was applied to develop the time models. Felling time was found to be highly dependent on diameter at breast height. Skidding distance, winching distance, slope of the trail and piece volume were significant variables for the skidding time prediction model. The loading time model was developed considering piece volume. Transportation distance and load volume were used as independent variables in modeling the transportation time. The net production of felling was estimated at 12 trees/h (56.65 m<sup>3</sup> hicieron modelos de predicción de tiempo y evaluaron los costos del método de cosecha de corte a medida (CTL) en un bosque montañoso. (Maqsood & Shehzad, 2013) optimizaron la entrada de nitrógeno y tiempo de cosecha para maximizar el rendimiento del maíz.

(Zheng et al., 2012) determinaron la condición de sombra óptima y el mejor tiempo de cosecha para plantas de *Dendrobium Candidum* basados en el intercambio de gases foliares, alcaloides y contenido de polisacáridos. (Munoz, Avila, Salvo & Huirican, 2012) which offers the least variation in date predictions, and heat units have been used to estimate the start of harvesting in various crops. The problem is that the farmer needs to know the number of days and not the number of heat units that are needed until the harvest can begin. It is proposed that the daily maximum and minimum temperature time series be modelled through regression models with errors correlated using a sine curve. Using the requirements reported by Carlson and Hancock (1991) usaron modelos de regresión de series temporales con errores correlacionados para la predicción de la fecha de inicio de la cosecha.

(Razali, Ismail, Ramli, Sulaiman & Harun, 2011) namely hue, using the analysis software that was developed at their research laboratory. Regression analysis of polynomial 2<sup>nd</sup> crearon un modelo de predicción para estimar el tiempo óptimo de cosecha de los racimos de fruta fresca de palma aceitera. (Kaack & Pedersen, 2011) and then at 1.5/1.5% O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> for the remaining storage period; and (3 hicieron un modelo para

establecer el tiempo de cosecha óptimo para el almacenamiento a largo plazo de manzanas 'Elstar' y 'Aroma' (*Malus domestica*) con baja concentración de oxígeno.

(Steger-Mate et al., 2010) Kantorjanosi 3 optimizaron el tiempo de cosecha de los cultivos de cerezo con base en los parámetros de calidad como los contenidos de antocianina, polifenol y vitamina C, así como el contenido de materia seca soluble en agua de las frutas.

### 2.3 ASIGNACIÓN DE EQUIPO PARA COSECHA

La asignación oportuna de maquinaria y equipos a los diferentes cultivos ha sido tratada por (Frisk, Flisberg, Rönnqvist & Andersson, 2016), quienes hicieron una programación detallada de los equipos de cosecha y el uso adecuado de los recursos de recolección y transporte. En el caso del trigo (MacMillan & Burrow, 1982) diseñaron una simulación computacional para la selección y la gestión de la maquinaria.

Por su parte (Zhu, Yan & Wang, 2015) produjeron un método de modelado con algoritmo genético mejorado para la programación de las operaciones de cosecha para los propietarios de maquinaria en una situación con múltiples cultivos, varios tipos de cultivos y con restricciones de ventana de tiempo para maximizar la eficiencia de la utilización de recursos.

De manera específica, en los cultivos de cereales se encuentran investigaciones alrededor del momento en que se debe realizar la cosecha para garantizar su máximo rendimiento y la asignación de los equipos adecuados teniendo en cuenta las características de la cosecha; en este sentido (Kim, Park, Gwon, Khan & Kim, 2015) investigan el efecto de la etapa de cosecha de centeno sobre la productividad de nutrientes y el potencial de producción de metano con el fin de optimizar la etapa de recolección del centeno como abono verde y de esta manera maximizar la producción de nutrientes y minimizar la producción de metano en los cultivos de arroz paddy o arroz con cáscara.

(Busato, 2015) crearon un modelo de simulación para evaluar el rendimiento de la cosecha de arroz que incorpora características operativas; dicho modelo proporciona medidas de evaluación del rendimiento. (Busato & Berruto, 2016) amplían el anterior modelo de simulación para incorporar la funcionalidad de la minimización de la mano de obra en operaciones de campo a gran escala, así como la cosecha y el transporte.

Por su parte (Furian et al., 2013) efectuaron un trabajo para evaluar la eficiencia de campo y de tiempo en la operación de cosecha mecanizada en cultivos de arroz irrigado. (Lee, Kim & Kim, 2016) investigaron los cambios en la calidad del arroz del grano corto en función del momento de cosecha. En las pruebas de campo midieron el contenido de humedad (MC), la proporción de grano entero (WKR) y el rendimiento de grano (GY).

(Nalley, Dixon, Tack, Barkley & Jagadish, 2016) investigaron cuál era el contenido óptimo de humedad en la cosecha para maximizar el rendimiento del arroz en la molienda y aumentar la rentabilidad. (Siebenmorgen, Bautista & Counce, 2007) investigaron cuál era el contenido óptimo de humedad de cosecha para maximizar la calidad de molienda de cultivos de arroz de grano medio y largo. Y (Flua et al., 2006) optimizaron los parámetros de rendimiento y calidad para la variedad de arroz Cocodrie en función del tiempo de cosecha.

En la revisión efectuada se identificó que a pesar de que existen diferentes investigaciones asociadas a la coordinación de instituciones para la cosecha, la definición del tiempo oportuno de cosecha y la asignación de equipo para cosecha, no se identificaron investigaciones que involucren los tres elementos en el problema de cosecha de arroz. En tal sentido la presente investigación presenta un modelo matemático en la que se considera la asignación de cosechadoras a múltiples cultivos de arroz considerando ventanas de tiempo que penalizan la cosecha que se realiza por fuera de dichas ventanas.

### 3. METODOLOGÍA

Para abordar el problema identificado y de cara a lo encontrado en el marco de referencia se propuso la siguiente metodología que consta de las siguientes etapas. Presentación del problema. Representación del tiempo de cosecha. Formulación del modelo matemático, y Definición de la estrategia de solución. A continuación se presenta en detalle cada una de las etapas.

#### Etapa 1: Presentación del problema

En el problema por abordar se consideran  $M$  máquinas cosechadoras ( $i = 1, 2, \dots, I$ ) y  $J$  cultivos ( $j = 1, 2, \dots, J$ ) que pertenecen a los miembros de la asociación. Cada cultivo puede ser cosechado en algunos de los  $K$  segmentos de tiempo, expresados en horas ( $k = 1, 2, \dots, K$ ). Los tiempos de procesamiento de cada cultivo  $j$  son distintos, dependiendo de la máquina  $i$  que los coseche, esto debido a que cada máquina posee diferente capacidad de procesamiento; esto ha sido tratado por los autores Arango, Giraldo, Castrillón, Moreno, & López (2013) Arango et al. (2013); Blanco et al. (2010); Osorio et al. (2008); Osorio, Castrillon, Toro, & Orejuela, (2008)

En el problema no se consideran tiempos de transporte de un cultivo a otro debido a la cercanía de estos. Tampoco se consideran tiempos de alistamiento debido a que estos solamente representan dos (2) o tres (3) minutos, lo cual no supera siquiera 5% de un segmento de tiempo  $k$  definido como una (1) hora.

Un cultivo solamente se considerará cosechado en el momento en que sus hectáreas hayan sido cosechadas completamente. Una vez este es comenzado a ser cosechado, no se interrumpe su cosecha. Esto es tratado por los autores Arango et al. (2013); Márquez, Ávila, Gómez, & Herrera (2012).

Una máquina puede asignarse a diferentes cultivos en diferentes períodos de tiempo, pero solo puede cosechar un cultivo cada vez. Característica que es tratada de igual forma por los autores Arango et al. (2013); Márquez et al. (2012) Arango et al. (2013); Márquez et al. (2012).

Para cada cultivo se sabe cuántos segmentos de tiempo se requieren para que una máquina  $i$  realice toda la cosecha. Lo que implica que el costo de asignación depende de la máquina y del cultivo, ya que cada cultivo tiene sus propias particularidades, entre ellas la cantidad de hectáreas. Todas las máquinas se encuentran listas para cosechar cualquier cultivo desde el primer segmento de tiempo  $k$ ; estos segmentos se componen a partir de jornadas laborales de  $K$  horas por día, por lo cual  $K$  segmentos de tiempo  $k$  equivalen a un día laboral.

## Etapa 2: Representación del tiempo de cosecha

Cada cultivo tiene establecido un conjunto de períodos de tiempo en los cuales es más eficiente efectuar el proceso de cosecha; realizar la cosecha antes o después de estos períodos o ventanas de tiempo genera sobrecostos (Sánchez & Meneses, 2012). Para considerar este elemento, se ha propuesto emplear ventanas de tiempo suaves, con las que la asignación de una maquinaria  $i$  por fuera de la ventana de tiempo de un cultivo  $j$ , se permitirá. Sin embargo, estas asignaciones serán penalizadas con un sobrecosto.

De tal modo que la función objetivo definida se encarga de minimizar el costo total por concepto de asignación de maquinaria, esta suma los costos de asignar una máquina  $i$  a un cultivo  $j$ , así como también los sobrecostos en que se incurre al cosechar un cultivo  $j$  utilizando una máquina  $i$ , en  $k$  segmentos de tiempo por fuera de la ventana de tiempo del cultivo  $j$ .

De lo anterior se declaran tres (3) estados en los cuales un cultivo  $j$  puede ser cosechado: estado prematuro, estado adecuado y estado vencido. (Sánchez & Meneses, 2012), ver la figura 1 (Sánchez & Meneses, 2012).

Las ventanas de tiempo y tasas de procesamiento por cada cultivo son parámetros conocidos y determinísticos. Y teniendo presente que los cultivos pertenecen a diferentes integrantes de la asociación, se propone como estrategia para buscar equidad, garantizar que las asignaciones que se realicen por fuera de la ventana de tiempo de un cultivo  $j$  no superen 25% del total de su extensión de tierra.

## Etapa 3: Formulación del modelo matemático

Como siguiente etapa de la metodología se presenta a continuación el modelo de programación lineal entera mixta que se ha propuesto para representar el problema tratado.

Figura 1. Comportamiento de los sobrecostos a través del tiempo.



Fuente: Elaboración propia.

## Parámetros

$C_{ij}$ : El costo por período al cosechar el cultivo  $j$  utilizando la máquina  $i$ .

$CLL_{ij}$ : Sobrecosto por período en que se incurre al cosechar el cultivo  $j$  con una máquina  $i$  en un segmento de tiempo prematuro.

$CLS_{ijk}$ : Sobrecosto por período al cosechar el cultivo  $j$  con una máquina  $i$  en un segmento de tiempo vencido.

$TP_{ij}$ : Segmentos de tiempo para procesar el cultivo  $j$  con una máquina  $i$ .

$FVLI_{jk}$ : Parámetro binario que vale uno si el segmento de tiempo  $k$  se encuentra ubicado en un período prematuro. En caso contrario, vale 0.

$FVLS_{jk}$ : Parámetro binario que vale uno si el segmento de tiempo  $k$  se encuentra ubicado en un período vencido. En caso contrario, vale 0.

$MAFV_i$ : Número máximo de segmentos de tiempo asignables por fuera de la ventana de tiempo.

$EF_{ij}$ : Cantidad de hectáreas que la máquina  $i$  procesa en un cultivo  $j$  por cada segmento de tiempo  $k$ .

$H_j$ : Cantidad de hectáreas por recolectar de un cultivo  $j$ .

$D_i$ : Disponibilidad de segmentos de tiempo de cada cosechadora  $i$ .

Variables de decisión

$X_{ijk}$ : Variable binaria que vale 1 si se asignará maquinaria  $i$  al cultivo  $j$  en un segmento de tiempo  $k$ , y cero de lo contrario.

$L_{ijk}$ : Variable binaria que vale 1 si el cultivo  $j$  es cosechado en un segmento de tiempo prematuro por la máquina  $i$ , Vale cero de lo contrario.

$U_{ijk}$ : Variable binaria que vale 1 si el cultivo  $j$  es cosechado en un segmento de tiempo vencido, por la máquina  $i$ , Vale cero de lo contrario.

$Y_{ijk}$ : Es una variable binaria que vale 1 si la máquina  $i$  inicia proceso de cosecha en el pedido de tiempo  $k$ , en el cultivo  $j$ . Y toma el valor cero de lo contrario.

Función objetivo

$$(Min)Z = \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} C_{ij} * X_{ijk} + \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} CLL_{ij} * L_{ijk} + \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} CLS_{ij} * U_{ijk}$$

(2)

Sujeta a:

- Cada máquina  $i$ , en cada segmento específico de tiempo  $k$ , solo puede ser asignada a lo máximo a un cultivo  $j$ :

$$\sum_{j \in J} X_{ijk} \leq 1 \quad \forall i, k$$

- Un cultivo  $j$ , en un período de tiempo específico  $k$ , solo puede tener asignada una sola máquina  $i$ :

$$\sum_{i \in I} X_{ijk} \leq 1 \quad \forall j, k$$

- Para cada cultivo  $j$  y para cada máquina  $i$ , garantiza que solo se asigne tiempo si la máquina  $i$  inicia en algún segmento de tiempo  $k$  en el cultivo  $j$ . También garantiza que el máximo de segmentos de tiempo asignados no supere la cantidad de segmentos necesarios:

$$\sum_{k \in K} X_{ijk} \leq TP_{ij} * \sum_{k \in K} Y_{ijk} \quad \forall i, j$$

- Cada cultivo  $j$  cosechado por una máquina  $i$  no debe tener más de  $k$  segmentos de tiempo asignados por fuera de su determinada ventana de tiempo:

$$\sum_{k \in K} (FVLI_{jk} + FVLS_{jk}) * X_{ijk} \leq MAFV_j \quad \forall i, j$$

$$FVLI_{jk} * X_{ijk} = L_{ijk} \quad \forall i, j, k$$

$$FVLS_{jk} * X_{ijk} = U_{ijk} \quad \forall i, j, k$$

- En un cultivo  $j$  solo puede iniciar una única máquina  $i$  en un único período  $k$ :

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} Y_{ijk} = 1 \quad \forall j$$

- Si una máquina  $i$  no ha comenzado a cosechar un cultivo  $j$ , el siguiente segmento de tiempo  $k$  no puede ser asignado. Una vez se inicia la cosecha, el proceso puede arrancar físicamente:

$$\sum_{k2 \in K / k2 < k} X_{ijk2} \leq TP_{ij} * \sum_{k3 \in K / k3 < k} Y_{ijk3} \quad \forall i, j, k$$

Una vez se inicia la cosecha de un cultivo  $j$  con una máquina  $i$ , se debe recolectar el cultivo de manera consecutiva a través de los  $k$  segmentos de tiempo necesarios:

$$X_{ijk-1} + Y_{ijk} \geq X_{ijk} \quad \forall i, j, k$$

Se debe satisfacer la demanda de hectáreas por cosechar de cada cultivo  $j$  con la máquina  $i$  por asignar:

$$\sum_{k \in K} X_{ijk} * EF_{ij} \geq H_j * \sum_{k \in K} Y_{ijk} \quad \forall i, j$$

- No se debe exceder el tiempo disponible de una maquinaria  $i$ :

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in J} X_{ijk} \leq D_i \quad \forall i$$

#### Etapa 4: Definición de la estrategia de solución

El modelo propuesto se abordará desde el enfoque de optimización exacta, por ello se implementará y solucionará empleando el software de optimización GAMS, tomando los parámetros requeridos para el modelo desde una hoja electrónica de Microsoft Excel, mediante la utilidad GAMS Data Exchange (GDX), para lograr facilidad y practicidad a la hora de manipular grandes volúmenes de datos.

Para la ejecución del modelo y obtención de los resultados se utilizó el software GAMS y Microsoft Excel, en este último se hicieron los cálculos de costos, tiempos de procesamiento y

demás parámetros relacionados al modelo, los cuales fueron llamados desde GAMS.

En GAMS se utilizó el solver CPLEX bajo el tipo de problema MIP (*Mixed Integer Programming*). La ejecución del modelo se realiza en un ordenador con una CPU Intel Core i5-3230M, a 2.6 GHz, con 6Gb RAM DDR3 y SO Windows 7 Ultimate x64 bits. La hoja electrónica se emplea como base de datos de los parámetros y para efectuar todos los cálculos requeridos para completar todas las entradas del modelo.

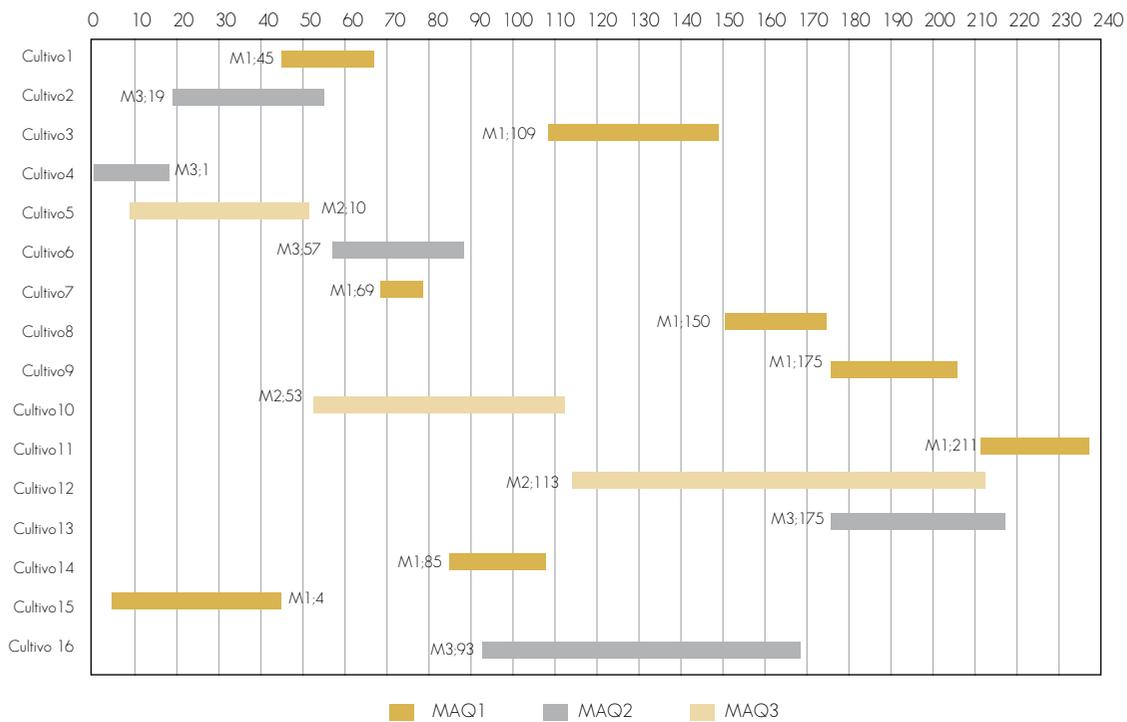
## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La metodología se validó y contrastó con la información brindada por la Asociación de Pequeños Productores de Tierra Santa - Guaranda (ASOPROTISAGUA); esta es una organización localizada en el departamento de Sucre, Colombia, conformada por 16 agricultores propietarios de cultivos aledaños entre sí, los cuales tienen como principal actividad económica la producción y venta de arroz *paddy*. Cuentan con 257 hectáreas de terreno disponible para la siembra, las cuales son cosechadas mediante combinadas que realizan la siega, trilla y limpieza del grano, depositándolo al final del proceso en sacos para su posterior almacenamiento y distribución.

Se tomaron en consideración los recursos y tareas vigentes en ASOPROTISAGUA, los cuales son: tres (3) máquinas, dieciséis (16) cultivos, doscientas cincuenta y siete (257) hectáreas por cosechar, y doscientos cuarenta (240) horas o segmentos de tiempo  $k$ , equivalentes a 24 días laborales.

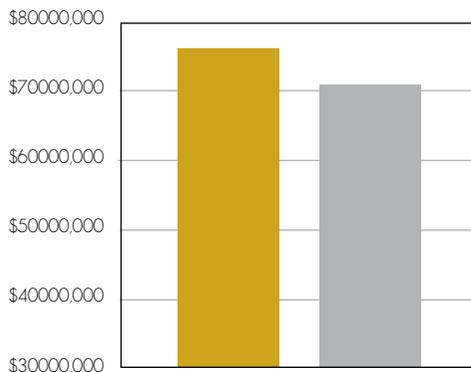
En la figura 2 se presentan los resultados obtenidos con el modelo luego de 18,12 minutos de ejecución, en la figura se presenta las 240 franjas equivalentes a 24 días y para cada uno de los 16 cultivos se presenta la máquina que le asigna

**Figura 2. Asignación de máquinas a cultivos.**



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3. Costos totales de asignación antes y después de modelo.**



Fuente: Elaboración propia.

para la cosecha y período de tiempo en que se realiza. Por ejemplo, el cultivo 5 es cosechado por la máquina 2, en el intervalo de tiempo que va desde el período 10 al período 53. Es importante resaltar que en la programación de cosecha de los cultivos tal como se presenta en la figura dos, permite identificar que todos los cultivos son

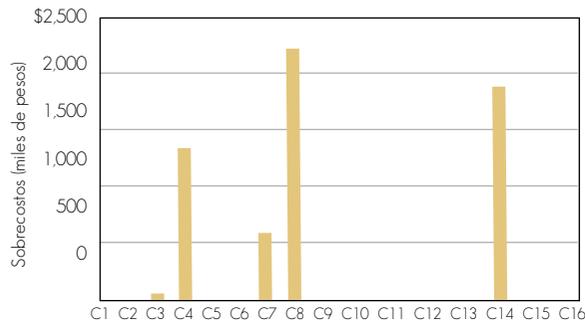
atendidos y se puede observar que dicha representación una vez obtenida es amigable y fácil de ejecutar.

En la figura 3 se pueden observar las diferencias en términos monetarios entre la asignación llevada a cabo por ASOPROTISAGUA en el mes de marzo de 2016 y la asignación llevada a cabo por el presente modelo bajo los mismos parámetros y condiciones de la asignación realizada por la asociación.

La anterior solución satisface las condiciones establecidas y permite reducir los costos de asignación en COP 5.378.272,53, lo cual representa una reducción de 7,04% en el costo total de asignación de maquinaria y en 85,73% de los costos asociados a la realización de la cosecha de arroz por fuera de las ventanas de tiempo.

Al realizar diferentes instancias variando selectivamente determinados parámetros, se encontró que permitiendo un máximo de 30% de asignaciones por fuera del período adecuado de cosecha en

**Figura 4.** Sobrecostos presentes en la asignación realizada por ASOPROTISAGUA.



Fuente: Elaboración propia.

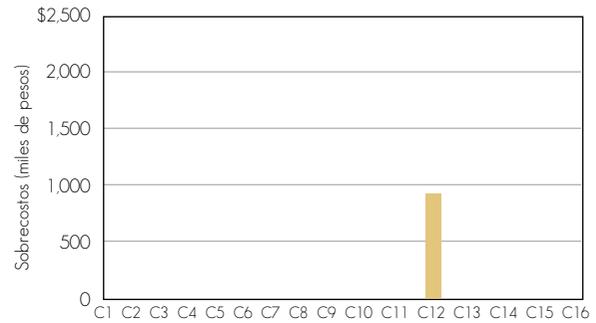
el parámetro , se llega a una mejor solución, la cual representa un ahorro adicional de COP 46.812,55.

Luego de comparar los sobrecostos presentados en la asignación llevada a cabo por la asociación, ver la figura 4, y la propuesta por el presente modelo, ver la figura 5, se observa que, con el modelo, solamente el cultivo 12 posee asignaciones con sobrecosto, ver la figura 5.

El cultivo 12 tiene un total de 22 segmentos de tiempo asignados por fuera de su período adecuado de cosecha, representando estos 22% de su área total.

Lo anterior satisface la restricción referente a la no asignación de un cultivo en más de 25% de su área por fuera del período adecuado de cosecha. De igual manera, la restricción de continuidad en las asignaciones es satisfecha junto con las restricciones de cumplimiento de hectáreas por cosechar, disponibilidad de recursos, y demás particularidades del modelo. Permitiendo esto que la asociación incurra en los menores sobrecostos posibles. Este resultado es significativo, y debe tenerse en cuenta la aplicación del modelo como eje fundamental para evitar las pérdidas.

**Figura 5.** Sobrecostos en la asignación propuesta por el presente modelo.



Fuente: Elaboración propia.

## 5. CONCLUSIONES E INVESTIGACIONES FUTURAS

La estructura utilizada para abordar el problema permitió el desarrollo de un modelo que puede aplicarse a diferentes tipos de asociaciones de arroceros que conserven características similares. Sin embargo, es importante resaltar que si bien es cierto la implementación realizada emplea software con licencias cuyos costos podrían hacer inviable el uso del modelo, este no es una limitación real ya que la implementación podría llevarse en herramientas de código libre, que permiten además el desarrollo de una interfaz amigable para el usuario de tal modo que el trabajo en la asociación sea solo el de alimentar datos, ejecutar y tomar los resultados.

La estructura del modelo presenta una serie de restricciones que puede aplicarse a otro tipo de problemas en los que se hallen diferentes procesadores independientes entre sí, los cuales deban atender determinado número de tareas de manera consecutiva con costos que fluctúen a través del tiempo. Es decir, las restricciones aquí desarrollados y modeladas pueden ser llevadas a otros problemas de asignación y servir esto como base de referencia para futuras investigaciones.

La consideración de la estrategia busca la equidad en las asignaciones de las máquinas a cultivos en períodos por fuera de la ventana de tiempo, representa un sobrecosto en la solución global. Este costo puede evitarse retirando la política y definiendo una estrategia de asignación de costos, que a partir del costo global defina un costo por cultivo en función de las hectáreas. Es decir, establecer un mayor nivel de integración en las empresas de la asociación.

Los tiempos de ejecución del modelo fueron aceptables para los parámetros establecidos. Para un horizonte de planeación de 24 días, tiempos de ejecución de 18 minutos son despreciables. No obstante, el tiempo de ejecución mostró ser inversamente proporcional a la holgura de recursos que exista en el modelo. Además, se reconoce que para instancias más grandes se hace necesario desarrollar técnicas meta heurísticas para la solución, lo cual se propone como investigación futura.

## REFERENCIAS

- Arancibia, R. A.; Smith, C. D.; LaBonte, D. R.; Main, J. L.; Smith, T. P., & Villordon, A. Q. (2014). Optimizing Sweetpotato Production for Fresh and Processing Markets through Plant Spacing and Planting-harvest Time. *HORTTECHNOLOGY*, 24(1), 16-24.
- Arango, J. A.; Giraldo, J. A.; Castrillón, O. D.; Moreno, E., & López, M. (2013). Programación de máquinas paralelas no relacionadas con tiempos de montaje dependientes de la secuencia y entrada dinámica usando algoritmos genéticos. *Informacion Tecnologica*, 24(3), 73-84. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000300009>
- Brotos, J. M.; Manera, F. J.; Conesa, A., & Porras, I. (2015). Study on maximising profits obtained by lemon-producers based on fruit harvesting time. *ITEA-INFORMACION TECNICA ECONOMICA AGRARIA*, 111(4), 384-401.
- Burer, S.; Jones, P. C., & Lowe, T. J. (2008). Coordinating the supply chain in the agricultural seed industry. *EUROPEAN JOURNAL OF OPERATIONAL RESEARCH*, 185(1), 354-377. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.12.015>
- Busato, P. (2015). A simulation model for a rice-harvesting chain. *BIOSYSTEMS ENGINEERING*, 129, 149-159. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.09.012>
- Busato, P., & Berruto, R. (2016). Minimising manpower in rice harvesting and transportation operations. *BIOSYSTEMS ENGINEERING*, 151, 435-445. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.08.029>
- Cortés, E.; Álvarez, F., & González, H. (2009). La mecanización agrícola: Gestión, selección y administración de la maquinaria para las operaciones de campo. *CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 4(2), 151-160.
- Dorward, A.; Kydd, J., & Poulton, C. (2005). Beyond liberalisation: "Developmental coordination" policies for African smallholder agriculture. *IDS BULLETIN-INSTITUTE OF DEVELOPMENT STUDIES*, 36(2), 80+.
- Fedearroz (2014). Manejo integrado del cultivo de arroz. *Jornadas de capacitación UNALM-Agrobanco*. Bogotá D.C.: Produmedios.
- Flua, N.; Bengtson, R. J.; Schramm, R. C.; Patel, P. M.; Walker, T. H., & Lima, M. (2006). Optimization of yield and quality parameters for the Cocodrie rice variety as a function of harvest time. *APPLIED ENGINEERING IN AGRICULTURE*, 22(1), 95-99.
- Frisk, M.; Flisberg, P.; Rönnqvist, M., & Andersson, G. (2016). Detailed scheduling of harvest teams and robust use of harvest and transportation resources. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 31(7), 681-690. <https://doi.org/10.1080/02827581.2016.1206144>
- Furian, P.; Schlosser, J.; Giacomini, U.; Lampert, R., & Machado, P. (2013). Eficiência operacional na colheita mecanizada em lavouras de arroz irrigado. *Ciência Rural*, 43(3), 445-451.

- Gebresenbet, G., & Ljungberg, D. (2001). Coordination and route optimization of agricultural goods transport to attenuate environmental impact. *JOURNAL OF AGRICULTURAL ENGINEERING RESEARCH*, 80(4), 329-342. <https://doi.org/10.1006/jaer.2001.0746>
- Ghaffariyan, M. R.; Naghdi, R.; Ghajar, I., & Nikooy, M. (2013). Time Prediction Models and Cost Evaluation of Cut-To-Length (CTL) Harvesting Method in a Mountainous Forest. *SMALL-SCALE FORESTRY*, 12(2), 181-192. <https://doi.org/10.1007/s11842-012-9204-4>
- Guzmán, M. P.; Tirado, Y. C.; Hernández, F. J., & Cortés, I. C. Á. (2018). Seis años después seguimos avanzando hacia la competitividad. *Arroz*, 66(533), 22-34. Recuperado de: <http://www.fedearroz.com.co/noticias/noticias2.php?id=2762>
- Kaack, K., & Pedersen, H. L. (2011). Modelling of the optimum harvest time for long-term storage of 'Elstar' and 'Aroma' (*Malus domestica*) apples at low oxygen concentration. *ACTA AGRICULTURAE SCANDINAVICA SECTION B-SOIL AND PLANT SCIENCE*, 61(6), 565-572. <https://doi.org/10.1080/09064710.2010.526135>
- Kim, S. Y.; Park, C. K.; Gwon, H. S.; Khan, M. I., & Kim, P. J. (2015). Optimizing the harvesting stage of rye as a green manure to maximize nutrient production and to minimize methane production in mono-rice paddies. *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT*, 537, 441-446. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.061>
- Lee, H. J.; Kim, H., & Kim, O. W. (2016). OPTIMAL HARVEST TIMING FOR MAXIMIZING GRAIN YIELD AND WHOLE KERNEL RATIO OF SHORT-GRAIN RICE. *TRANSACTIONS OF THE ASABE*, 59(2), 745-750.
- Lindemann-Zutz, K.; Fricke, A., & Stuetzel, H. (2016). Prediction of time to harvest and its variability of broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) part II. Growth model description, parameterisation and field evaluation. *SCIENTIA HORTICULTURAE*, 200, 151-160. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.01.009>
- MacMillan, R. H., & Burrow, J. L. (1982). COMPUTER SIMULATION OF THE SELECTION AND MANAGEMENT OF WHEAT HARVESTING MACHINERY. In *National Conference Publication - Institution of Engineers, Australia* (pp. 52-56). Inst of Engineers, Australia, Barton, Aust. Recuperado de: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0020243114&partnerID=40&md5=3953d4f8683b4b07199c466e4bc89731>
- Maqsood, M., & Shehzad, M. A. (2013). OPTIMIZING NITROGEN INPUT AND HARVEST TIME TO MAXIMIZE THE MAIZE FODDER YIELD IN PUNJAB, PAKISTAN. *PAKISTAN JOURNAL OF AGRICULTURAL SCIENCES*, 50(1), 75-81.
- Márquez Delgado, J. E.; Ávila Rondón, R. L.; Gómez-Elvira González, M. Á.; Herrera Márquez, C. R.; Márquez, J.; Ávila, R., ... Herrera, C. (2012). Algoritmo genético aplicado al problema de programación en procesos tecnológicos de maquinado con ambiente Flow Shop. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 21(2), 70-75. Recuperado de: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2071-00542012000200012&script=sci\\_arttext%5Cnhttp://scielo.sld.cu/pdf/rcta/v21n2/rcta12212.pdf](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2071-00542012000200012&script=sci_arttext%5Cnhttp://scielo.sld.cu/pdf/rcta/v21n2/rcta12212.pdf)
- Miranda, A.; Castells, S.; Fernández, O.; Santos, F., & Iglesias, C. (2013). Análisis de la utilización del tiempo de turno por las cosechadoras arroz CLAAS DOMINATOR. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 22(4), 27-31.
- Miranda, A.; Iglesias, C.; Ribert, Y.; Santos, F.; Castells, S.; Miranda Caballero, A.; ... Castells Hernández, S. (2011). Determinación del contenido de impurezas durante la cosecha de arroz. *Revista de Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20(4), 53-56.
- Munoz, C.; Avila, J.; Salvo, S., & Huircan, J. I. (2012). Prediction of harvest start date in highbush blueberry using time series regression models with correlated errors. *SCIENTIA HORTICULTURAE*, 138, 165-170. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.02.023>

- Nalley, L.; Dixon, B.; Tack, J.; Barkley, A., & Jagdish, K. (2016). Optimal harvest moisture content for maximizing mid-south rice milling yields and returns. *Agronomy Journal*, 108(2), 701-712. <https://doi.org/10.2134/agronj2015.0408>
- Olego, M. A.; Alvarez, J. C.; Tobes, A.; de Paz, J. M.; Coque, J. J. R., & Garzon-Jimeno, E. (2016). Determining optimum harvest time under Mediterranean conditions: developing a new model for measuring L-malic acid concentration in red grapes. *AUSTRALIAN JOURNAL OF GRAPE AND WINE RESEARCH*, 22(2), 232-239. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12181>
- Osorio, C. J.; Castrillon, O.; Toro, J., & Orejuela, J. P. (2008). Modelo de programación jerárquica de la producción en un Job shop flexible con interrupciones y tiempos de alistamiento dependientes de la secuencia. *Revista Ingeniería E Investigación*, 28(2), 72-79.
- Pande, R. (2006). Profits and politics: Coordinating technology adoption in agriculture. *JOURNAL OF DEVELOPMENT ECONOMICS*, 81(2), 299-315. <https://doi.org/10.1016/j.deveco.2005.06.012>
- Ramburan, S. (2014). Optimizing Sugarcane Cultivar Choice and Time of Harvest for Frost-Prone Environments in South Africa. *AGRONOMY JOURNAL*, 106(6), 2035-2042. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0159>
- Razali, M. H.; Ismail, W. I. W.; Ramli, A. R.; Sulaiman, M. N., & Harun, M. H. (2011). Prediction model for estimating optimum harvesting time of oil palm fresh fruit bunches. *JOURNAL OF FOOD AGRICULTURE & ENVIRONMENT*, 9(3-4, 1), 570-575.
- Sánchez, J., & Meneses, O. (2012). *Parámetros que influyen en la calidad industrial del arroz cosechado en el municipio La Sierpe*. La Habana. Recuperado de: <http://www.eumed.net/coursecon/ecolat/cu/2012/sdmr.html>
- Serna, H. (2008). *Gerencia estratégica*. Bogotá D.C.: 3R Editores.
- Siebenmorgen, T. J.; Bautista, R. C., & Counce, P. A. (2007). Optimal harvest moisture contents for maximizing milling quality of longand medium-grain rice cultivars. *Applied Engineering in Agriculture*, 23(4), 517-527. <https://doi.org/10.13031/2013.23476>
- Steger-Mate, M.; Ficzek, G.; Kallay, E.; Bujdoso, G.; Barta, J., & Toth, M. (2010). OPTIMISING HARVEST TIME OF SOUR CHERRY CULTIVARS ON THE BASIS OF QUALITY PARAMETERS. *ACTA ALIMENTARIA*, 39(1), 59-68. <https://doi.org/10.1556/AAlim.39.2010.1.6>
- Zheng, Y.; Jiang, W.; Silva, E. N.; Mao, L.; Hannaway, D. B., & Lu, H. (2012). Optimization of shade condition and harvest time for *Dendrobium candidum* plants based on leaf gas exchange, alkaloids and polysaccharides contents. *PLANT OMICS*, 5(3), 253-260.
- Zhu, X.; Yan, R., & Wang, H. (2015). Harvesting scheduling operations for the machinery owners under multi-farmland, multi-type situation with time window-An empirical study arising in agricultural contexts in China. *INMATEH - Agricultural Engineering*, 46(2), 175-182. Recuperado de: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84941268254&partnerID=40&m-d5=4cb373296ebb587ce57ae7375698dbcc>