

Modelo de asignación de cosechadoras a cultivos de arroz en la asociación Asoprotisagua, ubicada
en Guaranda, Sucre

Jorge Armando Puentes Márquez
Martín Enrique Borré Barreto



Corporación Universitaria del Caribe – CECAR
Facultad de Ciencias Básicas, Ingenierías y Arquitectura
Programa de Ingeniería Industrial
Sincelejo
2016

Modelo de asignación de cosechadoras a cultivos de arroz en la asociación Asoprotisagua, ubicada
en Guaranda, Sucre

Jorge Armando Puentes Márquez
Martín Enrique Borré Barreto

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Industrial

Asesores

Carlos Alberto Arango Pastrana
PhD. Organización industrial y gestión de empresas

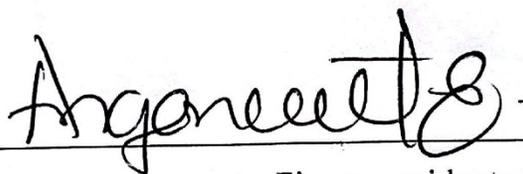
Juan Pablo Orejuela Cabrera
M.Sc. en Ingeniería Industrial.

Corporación Universitaria del Caribe
Facultad de Ciencias Básicas, Ingenierías y Arquitectura
Programa de Ingeniería Industrial

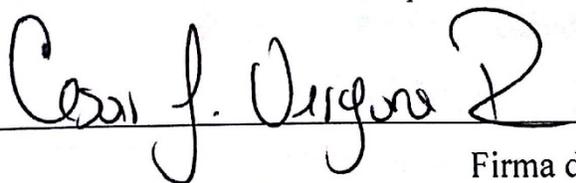
Sincelejo

2016

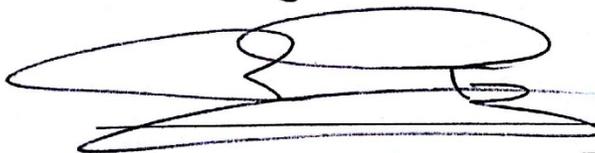
Nota de Aceptación



Firma presidente del jurado



Firma del jurado



Firma del jurado

Sincelejo, Sucre. 12 de agosto de 2016.

Agradecimientos

A nuestros padres, por su constante, total e incondicional apoyo a lo largo de todo nuestro proceso educativo, enseñándonos que este continuará constantemente a través de los años sin importar cuan longevos seamos.

A todos y cada uno de nuestros maestros, por sus invaluable contribuciones en nuestra formación académica y profesional. Entre ellos, al profesor Juan Pablo Orejuela por sus inmensos aportes y guías en relación a la presente investigación y en especial, al profesor Carlos Arango Pastrana por todo su comprometimiento, apoyo y dedicación, la cual permitió sin duda alguna, la formación de mejores profesionales.

Índice general

Resumen.....	10
Abstract.....	11
Introducción	12
1. Reseña histórica de la agricultura	14
1.1 Principales avances	14
1.2 La agricultura mecanizada	16
1.2.1 Administración de la maquinaria agrícola.....	17
2. El cultivo de arroz.....	19
2.1 Sistemas de producción.....	19
2.1.1 Sistema de producción de arroz manual o tradicional.....	20
2.1.2 Sistema de producción de arroz mecanizado.....	20
2.1.2.1 Arroz de riego.....	20
2.1.2.2 Arroz seco.....	21
3. Sistema de Producción de Arroz en Asoprotisagua.....	23
3.1 Planeación de la Producción	23
3.1.1 Determinación de las condiciones del terreno.....	23
3.1.2 Establecimiento de la época de siembra.....	24
3.1.3 Determinación de la variedad a sembrar.....	24
3.1.4 Pruebas de germinación.....	24
3.2 Actividades propias del cultivo.....	25
3.2.1 Preparación del suelo.....	25
3.2.2 Siembra.....	25
3.2.3 Control de enfermedades, malezas e insectos.....	26
3.2.4 Fertilización.....	26
3.3 Cosecha mecanizada	27
3.3.1 Actividades postcosecha.....	28

4. Revisión bibliográfica.....	30
5. Programación lineal en la investigación de operaciones	32
5.1 Fases de la Investigación de Operaciones.....	32
5.2 Clasificación de los modelos de la Investigación de Operaciones	33
5.3 Programación Lineal.....	34
5.4 Programación lineal entera	35
5.4.1 Programación lineal entera mixta.	35
6. Metodología aplicada.....	36
6.1 Consideraciones	36
6.2 Notación y variables	39
6.3 Parámetros empleados	40
6.4 Definición de la función objetivo	41
6.5 Determinación de las restricciones	41
6.6 Cálculo de parámetros en Excel.....	44
6.7 Valores de parámetros.....	45
6.8 Estado previo a la aplicación del modelo	50
6.8.1 Asignaciones previas al modelo.....	50
6.8.2 Sobrecostos por asignación.....	51
7. Resultados	53
7.1 Nueva asignación.....	53
7.2 Sobrecostos de nueva asignación.....	56
7.3 Comparativa de sobrecostos por asignación	57
8. Conclusiones	59
Referencias bibliográficas.....	60
Anexos	64

Índice de figuras

Figura 1. Combinada Jhon Deere Serie T. Fuente: Deere.es	12
Figura 2. Pintura del Antiguo Egipto mostrando la trilla del trigo. Fuente: Solivárez, 2006.	14
Figura 3. Tractor de ruedas cubiertas con madera. Fuente: Alvarado Chávez, 2004.....	16
Figura 4. Agricultura de precisión. Fuente: viarural.cl	17
Figura 5. Arroz de riego en Colombia por departamentos. Fuente: Anuario Estad. Agropecuario 2011. ...	21
Figura 6. Arroz secano en Colombia por departamentos. Fuente: Anuario Estad. Agropecuario 2011. ...	22
Figura 7. Sistema de asignación de maquinaria en Asoprotisagua.	28
Figura 8. Expresión canónica de un modelo de PL. Fuente: Hernández, 2007.	34
Figura 9. Expresión canónica de un modelo de PL entera. Fuente: Hernández, 2007.....	35
Figura 10. Expresión canónica de un modelo de PL entera mixta. Fuente: Hernández, 2007.....	35
Figura 11. Comportamiento de los sobrecostos a través del tiempo.	37
Figura 12. Tamaño de cultivos de la asociación.	46
Figura 13. Asignación realizada por las directivas de Asoprotisagua antes de implementar modelo.	51
Figura 14. Sobrecostos por cultivos antes de aplicar modelo.	51
Figura 15. Asignación de máquinas a cultivos después de implementar modelo.	54
Figura 16. Segmentos de tiempo k asignados a cada máquina.	56
Figura 17. Sobrecostos por cultivo después de aplicar modelo.	56
Figura 18. Costos totales de asignación antes y después de modelo.....	57
Figura 19. Sobrecostos totales de asignación antes y después de modelo.	58

Índice de tablas

Tabla 1. Datos de productores, tamaño de cultivos y variedades cultivadas.	45
Tabla 2. Características de la maquinaria.	47
Tabla 3. Tiempos de procesamiento TPij.....	47
Tabla 4. Costos de recolección sin sobrecostos Cij	48
Tabla 5. Máximas asignaciones permitidas por fuera de segmentos de tiempo adecuados MAFVij.	49
Tabla 6. Definición de ventanas de tiempo para el total de cultivos.....	49
Tabla 7. Asignación de trabajos a M1 en detalle.	54
Tabla 8. Asignación de trabajos a M2 en detalle.	55
Tabla 9. Asignación de trabajos a M3 en detalle	55

Índice de anexos

Anexo 1. Asignación de trabajos a M1..... 64

Anexo 2. Asignación de trabajos a M2..... 64

Anexo 3. Asignación de trabajos a M3..... 64

Resumen

Asoprotisagua, es una asociación compuesta por productores de arroz que tienen cultivos aledaños entre sí. En dicha asociación se siembran diferentes variedades de semillas que originan diversos tipos de cultivos, los cuales presentan diferentes rendimientos por hectárea dependiendo del tipo de semilla utilizada. Así mismo, presentan diferentes ventanas de tiempo para ser cosechados.

Para el proceso de cosecha son contratadas a un tercero las máquinas combinadas, estas realizan la siega, trilla y limpieza del grano. La asociación en la búsqueda de minimizar los costos de operación contrata las combinadas de manera centralizada y debe programar la fecha en qué cada cultivo será atendido, teniendo en cuenta, las diferentes eficiencias de las máquinas, las condiciones del terreno, y los sobrecostos por violar las ventanas de tiempo con determinada máquina.

El presente trabajo desarrolla una propuesta de solución basada en un modelo matemático para abordar la problemática descrita.

Palabras clave: programación lineal, optimización, asignación, cosecha mecanizada, arroz.

Abstract

Asoprotisagua, is an association composed of rice producers who own neighboring crops. In this association different variety of seeds are sown, that create various types of crops, which shows different crop yield per hectare depending on the sort of seed used. Similarly, this process shows different time windows to be cultivated.

For the harvesting process, the combined machines are contracted from a third party. Those machines perform mowing, threshing and rice grain cleaning. Asoprotisagua, in search of minimizing the operating costs, hires the combined machines in a centralized manner and must schedule the date on which each crop will be assisted, taking into consideration: different efficiencies of the machines, setup times depending on the land condition, the variety grown and the cost overrun for violating time windows.

The current research develops a solution proposal based on a mathematical model to address the problematic described.

Key words: linear programming, optimization, allocation, mechanized harvest, rice.

Introducción

La Asociación de Pequeños Productores de Tierrasanta - Guaranda (Asoprotisagua), es una organización ubicada en el departamento de Sucre, conformada por 16 agricultores propietarios de cultivos aledaños entre sí, los cuales tienen como principal actividad económica la producción y venta de arroz paddy. Para esto, cuentan con más de 200 hectáreas de terreno disponible para la siembra, las cuales son cosechadas mediante combinadas, máquinas que realizan la siega, trilla y limpieza del grano, depositándolo al final del proceso, en sacos para su posterior almacenamiento y distribución (De Lucia & Assennato, 1993).



Figura 1. Combinada Jhon Deere Serie T. Fuente: Deere.es

En el proceso de cosecha, es común encontrar cuellos de botella por concepto de falta de mano de obra, materiales o equipos. No obstante, estos también se presentan por una ineficiente gestión de recursos (Cortés, Álvarez, & González, 2009), lo cual conlleva muchas veces a incurrir en sobrecostos debido a deficiencias en la planeación estratégica (Serna, 2015).

Asoprotisagua no es ajena a estos problemas, en esta no existen estrategias que permitan asignar a los cultivos la maquinaria adecuada en el momento oportuno, situación que conlleva en numerosas ocasiones a que no se cosechen el total de hectáreas sembradas y que muchos cultivos se cosechen por fuera de su periodo adecuado de recolecta, lo cual hace necesario, la utilización de un sistema de programación de trabajos teniendo en cuenta las particularidades de la asociación (Miranda, Castells, Fernández, Santos, & Iglesias, 2013).

La recolección inoportuna del cultivo, provoca pérdidas en las propiedades organolépticas del grano, lo cual repercute en su rendimiento económico (Fedearroz, 2014) (Miranda, Iglesias, Ribert, Santos, & Castells, 2011) (Miranda, Iglesias, Ribert, Santos, & Castells, 2011) (Sánchez & Meneses, 2012). Por otro lado, cuando se excede el tiempo de recolección, los agricultores obtienen aún menos rendimiento económico debido a que el grano pierde humedad en exceso, como consecuencia de ello, este se vuelve frágil y ligero, afectando esto, el peso del grano y consecuentemente la utilidad de este (Fedearroz, 2014).

La maquinaria, la cual es 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, 2013). El costo de las máquinas se calcula con base a un costo fijo cobrado 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.

Teniendo como referencia la anterior información, el objetivo de este estudio fue desarrollar un modelo de optimización para la asignación de cosechadoras a los diferentes tipos de cultivos de arroz de la Asociación de Pequeños Productores de arroz de Tierra Santa, Sucre.

1. Reseña histórica de la agricultura

La agricultura es considerada una de las actividades más antiguas del mundo y una de las principales causas del surgimiento de las sociedades, a través de esta, el hombre dejó de ser nómada y comenzó a asentarse en lugares para su convivencia, es decir, comenzó a sedentarizarse y dejó solamente de poseer bienes móviles para también poseer bienes inmuebles y dedicarse a otras labores como las actividades artesanales y comerciales (Gómez L. , 2015).

Mediante la observación de su entorno, el hombre logro aumentar la eficiencia de sus cultivos, desarrollando cultivos rotativos y especializados según la zona de cosecha, época del año, entre otros factores. Los agricultores que se especializaron en determinados cultivos, no pudieron abarcar la producción de otros bienes, obligando esto el intercambio de los mismos entre agricultores y comunidades, dando paso a lo que hoy conocemos como comercio (Lopez, 2000).



Figura 2. Pintura del Antiguo Egipto mostrando la trilla del trigo. Fuente: Solivérez, 2006.

1.1 Principales avances

Las primeras plantas cultivadas datan de hace unos 10.000 años y corresponden a especies de cereales silvestres, no cultivadas actualmente (Cadena, 2011). Dicha actividad, en su comienzo estaba ligada completamente a la religiosidad, y se veía reflejado en su integración a historias y mitos en las sociedades (Rebrej & Mariani, 2015). Luego de varios años, estas actividades pasaron

de ser costumbres esporádicas a intensificarse al igual que la caza y pesca hace unos 4.000 años atrás, convirtiéndose con el paso del tiempo, en cultivos programados.

Los primeros granos cultivados en los diferentes continentes fueron el Mijo y el Sorgo en África, el Arroz en Asia, el Maíz en América y el Trigo, la Cebada y el Centeno en Europa, estos últimos, probablemente introducidos desde Asia (Cadena, 2011).

En cuanto a las herramientas utilizadas durante las primeras actividades agrícolas, eran básicamente las mismas que utilizaban para sacar raíces durante el periodo del Paleolítico y estaban construidas en materiales como piedras y madera, las cuales durante el Neolítico se fueron perfeccionando (Cadena, 2011), hasta llegar al uso de piedras afiladas y madera tallada, incluyendo el uso de huesos y sílex. Estas herramientas eran utilizadas para cavar la tierra, construir hoces para la recolección del grano e incluso se utilizaban ramas talladas para realizar el arado a mano, herramienta que se fue perfeccionando mediante la utilización de animales para el tirado, mejorando la eficiencia de la actividad agrícola (Cadena, 2011).

Luego de los avances anteriormente mencionados se produjo la introducción de los metales a la agricultura, materiales que mejoraron la eficiencia de las herramientas, disminuyendo la rudeza de los trabajos, especialmente en tareas como el arado (Cadena, 2011), a través de la construcción de herramientas para la tracción animal, hasta la mecanización de tareas como la combinación del arado y la siembra de la semilla, sistema utilizado en Mesopotamia 3000 años A.C; descubriendo a partir de ese momento, sistemas para mecanizar la siembra y la recolección de los cultivos.

Un ejemplo de mecanización de la agricultura son los sistemas de irrigación construidos por los romanos, en donde a través de nuevas técnicas de fertilización, barbecho y rotación de cultivos, hicieron de la agricultura un sector más productivo, dejando de depender en gran medida incluso de las condiciones climáticas (ASOCAE, 2016).

1.2 La agricultura mecanizada

Se considera agricultura mecanizada al proceso donde se utilizan máquinas para la realización de las labores agrícolas, aumentando la productividad y eficiencia de los procesos. (HELPE, 2015)

Actualmente, la mecanización en la agricultura ha sustituido en muchos casos diferentes trabajos que antes eran realizados por hombres o animales, como por ejemplo la trilla y arado de la tierra, representando este último la primera incursión de la mecanización en la agricultura. A partir del último siglo ha venido en aumento esta práctica, llegando en la actualidad a utilizar tractores, camiones, cosechadoras, aeroplanos, helicópteros entre otros vehículos, que gracias al avance de la tecnología se han logrado implementar (HELPE, 2015).

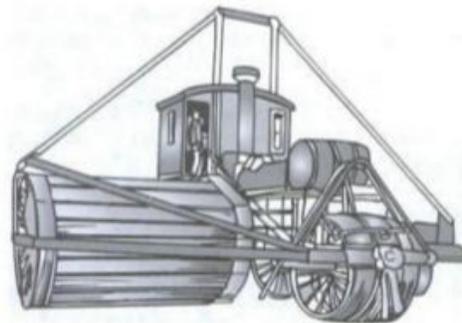


Figura 3. Tractor de ruedas cubiertas con madera. Fuente: Alvarado Chávez, 2004.

Uno de los principales avances en la mecanización de la agricultura fue la invención del motor a vapor, por medio del cual se logró la introducción del tractor, una de las máquinas más importantes tanto en la agricultura como en la ganadería, debido a que es utilizado como fuente de poder para la operación de los diferentes equipos o implementos necesarios en las labores afines.

El tractor atravesó diferentes etapas desde su introducción en el año 1858, donde fue evolucionando a través del tiempo y derivándose en otras maquinarias utilizadas actualmente como lo son las cosechadoras (Alvarado, 2004).

1.2.1 Administración de la maquinaria agrícola.

Como se mencionó anteriormente, la mecanización de la agricultura se produjo con el fin de mejorar las eficiencias y las capacidades de los cultivos, aumentando la producción y el rendimiento del trabajo empleado en estos. No obstante, algunas veces dicha mejora se ve truncada cuando el productor no cuenta con los recursos necesarios (mano de obra, tiempo, máquinas, entre otros) para obtener el máximo rendimiento de los recursos de los cuales dispone; dejando entrever no solo la importancia del mejoramiento de las herramientas utilizadas sino también la importancia de una gestión eficiente como alternativa para el aumento de la producción, el rendimiento y el crecimiento económico de los productores (Cortes, Alvarez, & González, 2009).

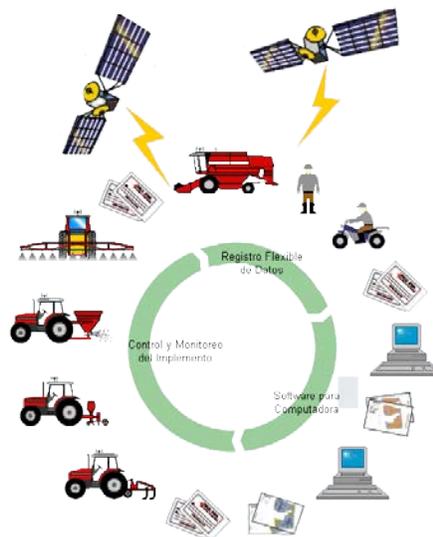


Figura 4. Agricultura de precisión. Fuente: viarural.cl

Dicho lo anterior, se considera realmente necesaria la administración o gestión de la maquinaria agrícola como herramienta para el aumento de la eficiencia y producción de los cultivos. Las actividades que esta involucra deben tomar en cuenta aspectos como la selección de la maquinaria de acuerdo con las condiciones de trabajo, características del suelo, clima, disponibilidad y posibles impactos de ésta en el medio ambiente (Alvarado, 2004). Además, de la

integración de recursos como lo son la mano de obra, tiempo y costos en los cuales se incurrirá.
(Cortes, Alvarez, & González, 2009).

2. El cultivo de arroz

El arroz, es un cereal perteneciente a las familias de las gramíneas y la mayoría de sus variedades pertenecen a la especie *Oryza Sativa*, este crece en climas con características tropicales y es uno de los granos más cultivados alrededor del mundo. Es considerado alimento básico principalmente en Asia y Latinoamérica y constituye una gran fuente de energía y proteína. Es calificado como una de las plantas más antiguas, por lo que es difícil establecer con exactitud la época en que la que el hombre comenzó su cultivo. No obstante, en la literatura china se hace mención de este en el año 3.000 AC, donde se celebraba su siembra como una importante ceremonia religiosa.

En Colombia es uno de los cultivos de ciclo corto más importantes, está presente en la canasta familiar en varias de sus regiones, siendo el principal cereal de consumo. Es sembrado en 211 municipios de 20 departamentos del país, siendo el tercer mayor producto agrícola en extensión. Este cultivo se encuentra acondicionado a la disponibilidad de variedades adaptables al clima y a las condiciones edafológicas de la zona donde este es sembrado, sin mencionar el manejo que se le dé al cultivo. En varias de las regiones colombianas el arroz es el cultivo predominante, como por ejemplo en la Orinoquia, donde se produce cerca del 30% del arroz paddy de la producción nacional, siendo el arroz paddy (arroz con cascarilla) la materia prima arrocera del país, teniendo como principal producto el arroz blanco. (Fedearroz, 2014)

2.1 Sistemas de producción

En Colombia el cultivo de arroz se realiza mediante dos sistemas de producción, el principal es el arroz mecanizado, el cual se produce en su mayoría para la comercialización y el sistema de producción manual o tradicional el cual se realiza la mayoría de las veces para consumo propio. El primero se clasifica o subdivide en dos, el de riego y el secano siendo el secano el más

utilizado por los pequeños productores, debido a la disminución en los costos con respecto al arroz de riego (Aramendiz, Espitia, & Cardona, 2011).

2.1.1 Sistema de producción de arroz manual o tradicional.

Es conocido coloquialmente como “cultivo a chuzo” y por lo general, se realiza en áreas pequeñas siendo su principal destino el autoconsumo. Este tipo de cultivo también puede ser realizado mediante semilleros en los cuales se siembra semilla y al nacer, es trasplantada a el lugar donde va a completar el resto de su etapa de crecimiento (DANE, 2013).

2.1.2 Sistema de producción de arroz mecanizado.

Este sistema de producción se divide a su vez en dos sistemas más, el de riego y el seco, los cuales difieren entre sí por el manejo del recurso hídrico que se da en cada uno de ellos (DANE, 2013), los cuales se describen a continuación:

2.1.2.1 Arroz de riego.

Este tipo de cultivo se vale de un distrito de riego el cual se encarga de hacerle llegar el agua al cultivo, posibilitando así el manejo de los periodos de siembra en cualquier momento del año. Los costos de este tipo de cultivo suelen ser mayor que el seco durante la etapa de siembra. En Colombia se utilizan dos métodos para el cultivo de arroz de riego los cuales son:

- **Inundación:** consiste en el ingreso de agua a un lote hasta determinado nivel, con el cual se forma una lámina o espejo de agua, la cual es reemplazada durante el ciclo a medida que esta es utilizada por el cultivo, se infiltra en el suelo o se evapora.
- **Riego corrido:** este sistema busca abastecer al cultivo de las cantidades de agua que necesite, de acuerdo a los requerimientos de la planta.

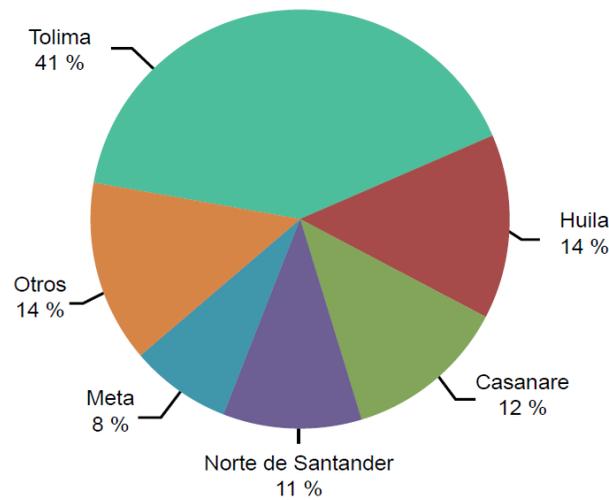


Figura 5. Arroz de riego en Colombia por departamentos. Fuente: Anuario Estad. Agropecuario 2011.

2.1.2.2 Arroz *secano*.

Este método se emplea exclusivamente con aguas lluvias, por lo que este tipo de cultivo implica una fuerte estacionalidad de las épocas de cosechas, dependientes de los ciclos de lluvias que se den, razón por la cual la producción de arroz aumenta durante el segundo semestre del año, debido a que las lluvias en el país aumentan durante estos meses. En Colombia los departamentos donde más se utiliza este sistema de cosecha son el Meta con el 38.1%, Casanare con el 34.5% y Sucre con el 11.6% (DANE, 2013).

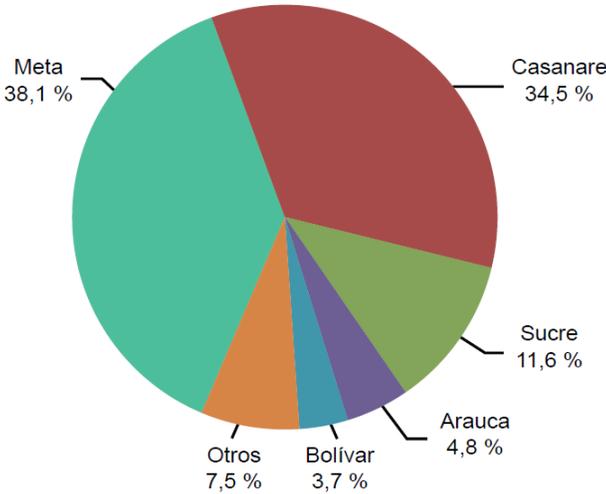


Figura 6. Arroz seco en Colombia por departamentos. Fuente: Anuario Estad. Agropecuario 2011.

3. Sistema de Producción de Arroz en Asoprotisagua

El sistema de producción utilizado en la asociación, es un sistema de producción de arroz mecanizado, el cual puede ser descrito en 4 etapas o fases de producción (Ministerio del Medio Ambiente, 2002), a continuación se describen cada una de estas etapas y sus respectivas actividades:

3.1 Planeación de la Producción

En esta etapa se definen las características del terreno donde se realizara la siembra del arroz, determinando ubicación del cultivo, época de siembra, tipo de variedad a utilizar, método de siembra y prácticas de manejo agronómico que se utilizaran en este. He aquí la importancia de la planeación para el buen desarrollo de las actividades afines a la plantación y al aumento de la producción, disminuyendo los riesgos asociados al cultivo y combinando los recursos disponibles, con el fin de asegurar la máxima producción utilizando dichos recursos (Fedearroz, 2014), los agricultores durante esta etapa, llevan a cabo las siguientes actividades:

3.1.1 Determinación de las condiciones del terreno.

Durante esta actividad, se determinan las condiciones geomorfológicas del terreno donde se realizará la siembra, con el fin de estar preparado para los posibles problemas a enfrentar, los cuales son ocasionados por desequilibrios en el ecosistema, además de los cambios de clima, la forma del terreno, la temperatura, luminosidad, entre otros. Durante esta actividad, se define el manejo que se le dará al suelo para el buen desarrollo de los cultivos y se identifican las condiciones de las fuentes de agua y la infraestructura de riego y drenaje (Ministerio del Medio Ambiente, 2002).

3.1.2 Establecimiento de la época de siembra.

Según las condiciones climáticas y de suelo determinadas anteriormente, y el estado de la infraestructura de riego o inundación del terreno, se define la época en la que se realizara la siembra del cultivo, con el fin de asegurar el nacimiento de la totalidad de las semillas, o por lo menos un gran porcentaje de estas, este rango de tiempo en la asociación, es determinado mayoritariamente según los ciclos de lluvia y los requerimientos y limitaciones de las variedades.

3.1.3 Determinación de la variedad a sembrar.

La variedad de semilla a utilizar, está definida según las condiciones morfológicas y climáticas de la zona donde se va a llevar a cabo la siembra, teniendo en cuenta el método a utilizar (siembra directa en suelos secos y fangosos, con semilla seca o pregerminada y siembra indirecta por medio de trasplante); de igual forma se tienen en cuenta características como la resistencia de la variedad a las enfermedades que se presentan en la zona de influencia del cultivo (Secretaría de Agricultura y Ganadería, 2003) y el rendimiento de las variedades disponibles, debido a que dicho rendimiento varía según la cantidad de veces que está a sido utilizada, es decir, existe un desgaste del terreno, si una semilla es utilizada durante varios ciclos de cultivo seguido.

3.1.4 Pruebas de germinación.

En algunas ocasiones, los agricultores determinan llevar a cabo pruebas de germinación de las semillas a utilizar, antes de realizar la siembra completa, esta actividad se realiza primordialmente con el fin de evitar bajas densidades de siembra (Secretaría de Agricultura y Ganadería, 2003).

3.2 Actividades propias del cultivo

Es la fase de la producción que va desde la preparación del terreno donde se va a sembrar, utilizando los métodos que se definen en la fase anterior, hasta la siembra de las semillas, la fertilización, el control de enfermedades y más, con el fin de que el cultivo se desarrolle adecuadamente. Los agricultores se deben asegurar que la planta presente una adecuada nutrición, la cual garantice el correcto desarrollo de las funciones vitales y reproductivas, ayudándola a competir por dichos nutrientes con las demás especies presentes en el terreno, obteniendo excelentes rendimientos (Fedearroz, 2014), a continuación se describen las actividades que lleva a cabo los agricultores durante esta etapa.

3.2.1 Preparación del suelo.

Esta actividad se realiza mediante la utilización de maquinaria agrícola con el fin de generar las condiciones físicas necesarias para un buen establecimiento del cultivo, destruyendo las malezas presentes e incorporando la materia orgánica al suelo, actividad que debe ser realizada con anterioridad a la época de lluvia y depende de las evaluaciones realizadas en la etapa de la planificación; durante esta etapa se debe garantizar una buena profundidad efectiva, mediante la descompactación del suelo, ayudando igualmente a incrementar la infiltración, debido a que esta se ve afectada por el uso de maquinaria pesada en los cultivos y algunas veces por el ganado (Fedearroz, 2014).

3.2.2 Siembra.

La siembra del grano en la asociación se realiza mediante dos métodos, la siembra directa y el trasplante, diferenciándose en que en el primer método se utiliza una menor cantidad de trabajo con costos igualmente menores y que consiste en la en la siembra del arroz al voleo o mediante agujeros destapados en forma de surcos en el suelo, los cuales son realizados con estacas en los

que se depositan entre 7 y 10 semillas, este método de siembra es el predominante en la asociación y en el municipio.

Por otra parte el método de trasplante consiste en la siembra de la semilla mediante agujeros, igualmente realizados con estacas en terreno donde se asegure la germinación, diferenciándose en que la cantidad de granos depositados por agujero varia de 20 a 30 granos y este es cubierto para asegurar la germinación de las plantas, que luego son separadas y sembradas a mano en el suelo de destino final, este método es comúnmente utilizado para la siembra en terrenos inundados o fangosos, por la dificultad para llevar a cabo la siembra directa.

3.2.3 Control de enfermedades, malezas e insectos.

El cultivo de arroz es propenso a presentar problemas durante la etapa de crecimiento de la planta, los cuales pueden ser producidos por factores bióticos o abióticos, que propician la aparición de enfermedades en estas; los factores bióticos están principalmente relacionados con infestaciones de malezas, hongos, bacterias, virus o insectos, que pueden afectar el desarrollo de la planta y por ende, su rendimiento (Diaz & Chaparro, 2012); los productores ante estos problemas utilizan mayoritariamente el control por agentes químicos para la eliminación de estos organismos y microorganismos. Dicho tratamiento puede impactar de diferente manera en los microorganismos encargados de la descomposición de la materia orgánica (Chaves, Ortiz, & Ortiz, 2013).

3.2.4 Fertilización.

En cuanto a la fertilización, esta se realiza con el objetivo de reponer los elementos necesarios para el buen desempeño de la planta, los cuales se ven disminuidos, cosecha tras cosecha, afectándose especialmente las reservas de Nitrógeno, Potasio y Fósforo (Heros, 2013). La principal preocupación de los productores en Asoprotisagua radica en la falta de Nitrógeno en los cultivos, esto debido a que en el cultivo de arroz, más que en otros granos cultivados, el

rendimiento se ve afectado por la eficiencia en la fertilización nitrogenada (Quirós & Ramírez, 2006), por lo que los productores de la asociación utilizan Urea como fuente de nitrógeno al suelo.

3.3 Cosecha mecanizada

El proceso de cosecha mecanizada de arroz consiste en la recolección de este mediante máquinas que se encargan de realizar el corte de la plantación (Siega), la separación del grano de su espiga o paja (Trilla) y la limpieza de este, depositándolo en sacos para su posterior almacenamiento (De Lucia & Assennato, 1993). Para el caso de la asociación, esta maquinaria difiere en cuanto a sus capacidades y eficiencias, y es alquilada por un tercero a la asociación; el costo de este proceso se calcula en base a un costo fijo por hectárea y un costo variable, dependiente del número de bultos de arroz cosechado en determinado cultivo. Cabe resaltar que el total del costo variable de recolección por bulto difiere dependiendo de la variedad que esté sembrada en determinado cultivo, puesto que ciertas variedades presentan más producción por hectárea que otras.

Estos dos componentes -máquinas y cultivos-, hacen parte del proceso de recolección o cosecha, donde la correcta asignación de las maquinas a cada uno de los cultivos existentes a lo largo de los terrenos, se transforma en un problema para los productores, al no contar con una herramienta para la toma de decisiones, de modo que incurran en los mínimos costos posibles durante el proceso de cosecha, teniendo en cuenta la eficiencia de cada máquina y el tiempo máximo de recolección utilizado por estas al cosechar cada uno de los cultivos, los tiempos de procesamiento, los días adecuados para la cosecha de cada cultivo, entre otros parámetros.

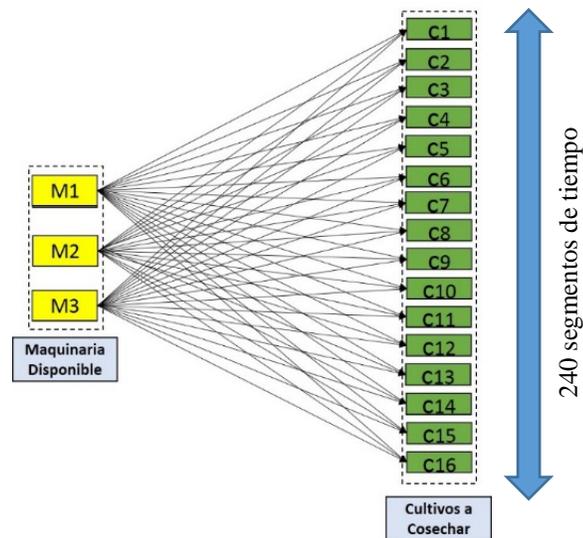


Figura 7. Sistema de asignación de maquinaria en Asoprotisagua.

La cosecha inoportuna de un cultivo provoca pérdidas en las propiedades organolépticas del grano, lo cual repercute en su rendimiento económico (Fedearroz, 2014) (Miranda, Iglesias, Ribert, Santos, & Castells, 2011) (Sánchez & Meneses, 2012).

Cuando se excede el tiempo de recolección, los agricultores obtienen aún menos rendimiento económico que al recolectar el cultivo prematuramente, debido a que el grano pierde humedad en exceso, como consecuencia de ello, este se vuelve frágil y ligero, afectando esto, el peso del grano y consecuentemente la utilidad de este al verse sometidos a penalizaciones por parte de los compradores (Fedearroz, 2014).

3.3.1 Actividades postcosecha.

El transporte de la producción a comercializar es realizado por diferentes medios y modos de transporte, los cuales van desde remolques, hasta lanchas o camiones dependiendo del lugar donde se realizará la venta, los cuales son San Marcos por vía terrestre (en camiones) o hasta Magangué por vía fluvial (en lanchas), dicho proceso depende de las condiciones para el transporte

dadas por la poca infraestructura vial en el departamento. Este transporte tiene un costo cercano a los 10mil pesos por bulto desde el corregimiento de Tierra Santa hasta el municipio donde se realizara la venta.

La venta del arroz es realizada a intermediarios ubicados en los municipios de San Marcos y/o Magangué, los cuales se encargan de realizar la compra de la producción a los productores de la asociación para posteriormente transportarla a los molinos para su análisis y determinación de condiciones de compra dependiendo de la calidad del grano. Luego de esto, las arroceras y los molinos se encargan del tratamiento y posterior almacenaje y distribución del arroz.

4. Revisión bibliográfica

Los modelos de programación matemática para la gestión de actividades o tareas, son problemas frecuentemente estudiados en la investigación de operaciones, y con mayor frecuencia en los talleres manufactureros, como el desarrollado por Larroza et al. en 2010 en su investigación “Programa óptimo de trabajo de máquinas de una industria tabacalera” (Larroza, Acosta, & Arce, 2010), donde estos presentan un modelo de asignación de tareas de m máquinas a n actividades. Este problema fue abordado como un problema de optimización utilizando programación lineal, teniendo como función objetivo, maximizar las utilidades producto del proceso de fabricación de cigarrillos.

Arango et al. en 2013, en su investigación “Programación de máquinas paralelas no relacionadas con tiempos de montaje dependientes de la secuencia y entrada dinámica usando algoritmos genéticos” (Arango, Giraldo, Castrillón, & Moreno, 2013), proponen una solución al problema de procesar n trabajos en m maquinas paralelas no relacionadas, utilizando un algoritmo genético con codificación entera donde la función objetivo se centra en la reducción del tiempo total de procesamiento *-makespan-* y el cumplimiento de las fechas de entrega.

De igual forma, Blanco et al. en 2010, en su investigación “Planning for agricultural forage harvesters and trucks: model, heuristics, and case study” (Blanco V. , Carpena, Hinojosa, & Puerto, 2010) realizan un modelo apoyado por heurísticas para la asignación de m maquinarias a un gran compendio de terrenos de cultivo de maíz forrajero, los cuales se encuentran alojados en un cluster ubicado en Ribadeo, municipio español de la provincia de Lugo.

Sánchez Becerro, en 2013, en su investigación “Algoritmos de programación dinámica con R para resolver problemas de alineamiento de secuencias” (Sanchez, 2013), analiza e implementa mejoras a algoritmos de alineamiento de secuencias, basados en técnicas de programación dinámica, utilizando algoritmos básicos de alineamiento global y mejorándolos mediante la aplicación de penalizaciones y la utilización de matrices de puntuación.

Hassin, & Uri, en 2015, en la investigación “Sequential scheduling on identical machines” (Yovel & Hassin, 2015), estudian una versión secuencial del modelo KP o “heurística de la mochila”, para la programación de n tareas en m máquinas donde afrontan el problema del precio secuencial de la anarquía para m máquinas idénticas bajo las órdenes arbitrarias y sugieren ideas sobre el caso de dos máquinas no relacionadas. Por otra parte Gómez, Escobar, & Figueroa en 2013, en su investigación “A Multi-Product Lot-Sizing Model for a Manufacturing Company” (Gómez, Escobar, & Figueroa, 2013), abordan un problema multiproducto considerando demandas, políticas de inventario, costos de pedido y búsqueda de un uso eficiente de los recursos mediante la aplicación de un modelo de programación lineal.

López, en el año 2000, en su investigación “Modelamiento de la programación de labores agrícolas mecanizadas en predios con cultivos múltiples” (Lopez, 2000), elabora un modelo heurístico para la asignación de las labores agrícolas mecanizadas y su implementación en un software que administra la información requerida, modelo perfeccionado por Moreno et al. en 2006, en su investigación “Perfeccionamiento del Modelo Adoma Mediante la Inclusión de la Ambigüedad en Algunos de sus Parámetros” (Moreno, López, & Merino, 2006), tomando en cuenta las pérdidas económicas por retraso en la ejecución de las labores, incorporando además, la incertidumbre asociada a estas pérdidas utilizando lógica difusa.

Pérez et al. En el año 2014 en su investigación “Algoritmo genético para secuenciación de pedidos en taller de mecanizado con máquinas en paralelo, recirculación y tiempos de preparación” analiza las características de un problema de secuenciación de pedidos en un taller de fabricación de piezas, con máquinas en paralelo, recirculación y tiempos de preparación independientes de la secuencia, en el cual propone un algoritmo genético para su resolución.

Lo anterior, permitió analizar desde diferentes puntos de vista cómo distintos autores han abordado el tema en mención y las diversas maneras en que lo han solucionado, sirviendo esto, como una guía metodológica.

5. Programación lineal en la investigación de operaciones

La investigación de operaciones es definida por Hamdy Taha, 2012, como “*el arte de describir y modelar el problema, y la ciencia de resolver el modelo utilizando algoritmos matemáticos precisos*” (Taha, 2012). Esta disciplina comenzó a ser utilizada en Inglaterra durante la segunda guerra mundial para la correcta gestión de materiales bélicos y estrategias de ataque y defensa, hasta llegar a las diferentes aplicaciones comerciales y científicas en las que se centra en la actualidad.

5.1 Fases de la Investigación de Operaciones

La investigación de operaciones posee varias fases a nivel metodológico, estas son:

Definición del problema: esta fase implica identificar, describir, determinar y especificar todo el conjunto de parámetros en cuanto a variables y restricciones bajo las cuales debe funcionar el modelo.

Construcción del modelo: implica transformar la definición de parámetros del problema en modelos matemáticos estándar como la programación lineal, sobre la cual se puede hallar un resultado óptimo con base al sentido que requiera el modelo, el cual puede ser maximizar una o varias variables (suelen ser utilidades), o por el contrario minimizar estas (suelen ser costos).

Solución del modelo: en esta etapa se emplean algoritmos de optimización para dar solución óptima a la situación problema identificada y formulada, lo cual posteriormente, se complementa con un análisis de sensibilidad que permitirá validar en casos aplicables, el comportamiento del modelo ante fluctuaciones de variables y parámetros del entorno.

Validación del modelo: Esta etapa comprueba si el modelo propuesto satisface las

necesidades de la situación problema, evitando sorpresas no deseadas e inconsistencias en este.

Los resultados de este análisis son evaluados mediante la comparación de cómo se debería comportar el modelo y como se está comportando, en caso de que no existan datos históricos sobre cómo se debe comportar este, se utiliza la simulación para corroborar los resultados.

Implementación de la solución: Es la etapa práctica, en la cual se transforman resultados en comprensibles instrucciones de operación que se impartirán a los actores del sistema productivo estudiado, en donde los resultados a obtener dependen en gran medida de la buena modelación que haya realizado el equipo de investigación de operaciones, de aquí la importancia de las etapas de modelación y validación de resultados.

5.2 Clasificación de los modelos de la Investigación de Operaciones

Existen diferentes maneras de clasificar los modelos utilizados en la investigación de operaciones (Izar, 1996), estos se los clasifica en:

Estocásticos y probabilísticos: Utilizan datos conocidos para la solución de los problemas, mientras que los segundos utilizan distribuciones estadísticas para predecir el comportamiento de las variables.

Dinámicos y estáticos: Para los primeros existen elementos los cuales cambian con respecto al tiempo, mientras que los modelos estáticos el tiempo no es una variable relevante.

Descriptivos y normativos: Descriptivos son aquellos que agrupan todas las técnicas de modelado que no utilizan una estructura matemática y que solo describen al modelos sin buscarle alguna solución, mientras que los modelos normativos, son aquellos en los cuales se exige el planteamiento de un problema matemático, que se ajustan a patrones que hacen factible la optimización, aunque algunas veces la estructura del modelo lo impide, caso en los que se debe

recurrir a procedimientos heurísticos o meta heurísticos que si bien no aseguran el óptimo, hace posible encontrar soluciones factibles con muy buenos resultados.

5.3 Programación Lineal

Es una herramienta matemática que tiene como objetivo principal la determinación de soluciones óptimas a problemas generalmente de tipo económicos, los cuales cuentan con recursos limitados entre diferentes actividades, donde estas compiten por ellos. Asignándoles matemáticamente cantidades fijas de estos recursos a la satisfacción de las demandas impuestas por las actividades, optimizando una o varias funciones objetivo y satisfaciendo las condiciones definidas. Es comúnmente abreviado como PL o LP por sus siglas en inglés. Sus aplicaciones en distintas áreas son muy diversas, tales como (Larroza, Acosta, & Arce, 2010):

Industria química: control de inventarios, control de horarios, control de transportes y mezclas óptimas.

Gobierno: adjudicación de contratos.

Aerolíneas comerciales: programación de vuelos.

Industria de hierro y carbono: planeación de la producción.

Comunicaciones: diseño óptimo de redes.

Agricultura: distribución de recursos.

$$\begin{aligned} \mathbf{Max} \ z &= \mathbf{cx} \\ \mathbf{s.} \ \mathbf{a} \\ \mathbf{Ax} &\leq \mathbf{b} \\ \mathbf{x} &\geq \mathbf{0} \end{aligned}$$

Figura 8. Expresión canónica de un modelo de PL. Fuente: Hernández, 2007.

5.4 Programación lineal entera

Es aquella en donde la totalidad o un subconjunto de las variables pertenecientes al modelo toman valores enteros. Este tipo de programación posee diversas aplicaciones, como lo son los problemas de asignación, ruteo de vehículos, localización de instalaciones, entre otros.

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{Max} \ z = \mathbf{cx} \\
 & \mathbf{s. a} \\
 & \mathbf{Ax} \leq \mathbf{b} \\
 & \mathbf{x} \geq \mathbf{0} \\
 & \mathbf{x} \in \mathbb{Z}^n
 \end{aligned}$$

Figura 9. Expresión canónica de un modelo de PL entera. Fuente: Hernández, 2007.

5.4.1 Programación lineal entera mixta.

Existe un tipo de programación lineal entera llamada programación lineal entero mixta, la cual tiene la particularidad de trabajar con variables tanto enteras como continuas. Este tipo de programación híbrida fue utilizada en la presente investigación debido al tipo de variables contempladas.

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{Max} \ z = \mathbf{cx} + \mathbf{uy} \\
 & \mathbf{s. a} \\
 & \mathbf{Ax} \leq \mathbf{b} \\
 & \mathbf{x} \geq \mathbf{0} \\
 & \mathbf{y} \geq \mathbf{0} \\
 & \mathbf{x} \in \mathbb{Z}^n
 \end{aligned}$$

Figura 10. Expresión canónica de un modelo de PL entera mixta. Fuente: Hernández, 2007.

6. Metodología aplicada

Para dar solución a la problemática descrita, la información necesaria para la abstracción de la situación problema, fue obtenida mediante aproximadamente de 14 visitas realizadas a la asociación Asoprotisagua y a la Arrocería Cauca Ltda., en donde a través de encuestas semiestructuradas y observaciones directas se pudo construir un modelo matemático que permitió dar solución a la problemática presentada en Asoprotisagua.

El modelo matemático fue concebido bajo el entorno de programación lineal entera mixta y resuelto con la ayuda de los softwares GAMS y Microsoft Excel. El cálculo de los parámetros del modelo –tiempos de procesamiento, costos, sobrecostos, definición de ventanas de tiempo, y demás parámetros-, fue llevado a cabo en las hojas de cálculo de Excel, donde luego estos procedieron a ser llamados desde GAMS mediante la utilidad GAMS Data eXchange (GDX), logrando con esto, facilidad y practicidad a la hora de hacer cambios en los parámetros del modelo sin necesidad de incurrir en sustanciales modificaciones en la estructura del modelo a nivel de su codificación en GAMS.

Para la aplicación del modelo y validación de los resultados se crearon diferentes instancias, las cuales fueron resueltas mediante el uso del software de programación GAMS V.23.5 a efectos de comparar los resultados obtenidos.

6.1 Consideraciones

En el modelo propuesto se consideran M máquinas ($i=1,2,\dots,I$) y C cultivos ($j=1,2,\dots,J$) que pueden ser cosechados en K segmentos de tiempo expresados en horas ($k=1,2,\dots,K$). Se emplearon ventanas de tiempo suaves, por lo cual la asignación de una maquinaria i por fuera de la ventana de tiempo de un cultivo j en k segmentos de tiempo, se permitirá. Sin embargo, estas

asignaciones serán penalizadas con un sobrecosto, el cual se encuentra ligado a la función objetivo del modelo.

Se declararon tres (3) estados en los cuales un cultivo j puede ser cosechado (Sánchez & Meneses, 2012), estos son:

Segmentos prematuros: Conjunto de segmentos de tiempo k donde se generan sobrecostos debido al alto grado de humedad del grano.

Segmentos apropiados: Conjunto de segmentos de tiempo k en los cuales no se generan sobrecostos.

Segmentos vencidos: Conjunto de segmentos de tiempo k , en los cuales el sobrecosto es mayor que en segmentos prematuros debido a que el grano pierde humedad en exceso, lo cual ocasiona pérdidas por concepto del aumento de la cantidad de grano partido y el poco peso de la cosecha.

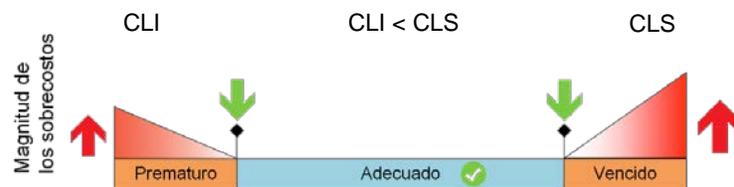


Figura 11. Comportamiento de los sobrecostos a través del tiempo.

Cabe aclarar que los sobrecostos no son constantes, estos disminuirán a medida que se acerquen a los segmentos apropiados para la cosecha y aumentarán conforme se alejen de estos, siendo la penalización mayor en los segmentos vencidos.

En este problema, además, se tienen las siguientes consideraciones:

- Todas las máquinas se encuentran listas para cosechar todos los cultivos desde el primer segmento de tiempo k , estos segmentos se componen a partir de jornadas laborales de diez (10) horas por día, por lo cual diez (10) segmentos de tiempo k , equivalen a un día laboral.
- 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, como lo es tratado por los autores (Orejuela, Osorio, Castrillón, & Toro, 2008) (Blanco V. , Carpenente, Hinojosa, & Puerto, 2010) .
- Las ventanas de tiempo y tasas de procesamiento por cada cultivo son parámetros conocidos y determinísticos. (Arango, Giraldo, Castrillón, & Moreno, 2013)
- 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 no superan el 5% de un segmento de tiempo k definido en horas (3 minutos).
- 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 (Márquez, Ávila, Gómez, & Herrera, 2012). (Arango, Giraldo, Castrillón, & Moreno, 2013)
- Una máquina puede cosechar varios cultivos, pero una máquina solo puede cosechar un cultivo a la vez. Característica que es tratada de igual forma por (Márquez, Ávila, Gómez, & Herrera, 2012) y (Arango, Giraldo, Castrillón, & Moreno, 2013).
- El tercero al cual se alquila la maquinaria, no cobra por días de alquiler, este cobra por hectáreas y bultos cosechados, retirando de manera autónoma la maquinaria cuando no hay más cultivos a cosechar.

- Las asignaciones que se realicen por fuera de la ventana de tiempo de un cultivo j no deben exceder el 25% del total de su extensión de tierra.

6.2 Notación y variables

A continuación, se detallan los subíndices y variables contempladas en el modelo desarrollado:

i : Subíndice que representa a las cosechadoras.

$i: \{1, \dots, I\}$

j : Subíndice que representa a los cultivos.

$j: \{1, \dots, J\}$

k : Subíndice que representa los segmentos de tiempo que se disponen a lo largo del proceso de cosecha.

$k: \{1, \dots, K\}$

X_{ijk} : Es la variable de decisión, la cual es binaria y representa la asignación de la maquinaria i a un cultivo j en un segmento de tiempo k .

Y_{ijk} : Variable binaria que representa en cuál segmento de tiempo k inicia una máquina i en un cultivo j .

L_{ijk} : Representa las asignaciones con sobrecosto que sufre un cultivo j , si este es cosechado por una máquina i en un segmento de tiempo k prematuro.

U_{ijk} : Representa las asignaciones con sobrecosto que sufre un cultivo j , si este es cosechado por una máquina i en un segmento de tiempo k vencido.

6.3 Parámetros empleados

I : Número total de cosechadoras disponibles.

J : Cantidad total de cultivos a cosechar.

K : Número total de segmentos de tiempo disponibles.

C_{ij} : Costo de cosechar el cultivo j utilizando la máquina i .

CLL_{ijk} : Sobrecosto en el que se incurre al cosechar un cultivo j con una máquina i en un segmento de tiempo k por debajo del límite inferior de su ventana de tiempo (segmentos prematuros).

CLS_{ijk} : Sobrecosto en el que se incurre al cosechar un cultivo j con una máquina i en un segmento de tiempo k por encima del límite superior de su ventana de tiempo (segmentos vencidos).

$FVLL_{ijk}$: Parámetro empleado para controlar el número de asignaciones que se hacen por debajo del límite inferior de cada ventana de tiempo perteneciente a un cultivo j , teniendo una celda valor de uno (1) cuando el segmento de tiempo k este dentro de los segmentos prematuros, y cero, en caso contrario.

$FVLS_{ijk}$: Parámetro empleado para controlar el número de asignaciones que se hacen por encima del límite superior de cada ventana de tiempo perteneciente a un cultivo j , teniendo una celda valor de uno (1) cuando el segmento de tiempo k esté dentro de los segmentos vencidos, y cero, en caso contrario.

D_i : Disponibilidad de turnos de cada cosechadora i .

H_j : Cantidad de hectáreas a recolectar de cada cultivo j .

EF_{ij} : Capacidad de procesamiento de hectáreas de una máquina i en un cultivo j en un segmento de tiempo k .

TP_{ij} : Segmentos de tiempo k necesarios para procesar un cultivo j con una máquina i .

$MAFV_{ij}$: Número máximo de segmentos de tiempo asignables por fuera de la ventana de tiempo

de un cultivo j utilizando la maquina i.

6.4 Definición de la función objetivo

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

La función objetivo definida es la siguiente:

$$(Min) Z = \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} C_{ij} * X_{ijk} + \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} CLI_{ijk} * L_{ijk} + \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} CLS_{ijk} * U_{ijk} \quad (1)$$

6.5 Determinación de las restricciones

La función objetivo anteriormente planteada, se encuentra sujeta a las siguientes restricciones, la cuales permiten representar condiciones propias del tipo de problema tratado y de igual manera, las respectivas particularidades de la asociación:

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

$$\sum_{j \in J} X_{ijk} \leq 1 \quad \forall_{i,k} \quad (2)$$

- Sólo puede ser asignada una máquina i a un cultivo j , en un segmento de tiempo k :

$$\sum_{i \in I} X_{ijk} \leq 1 \quad \forall_{j,k} \quad (3)$$

- Cada cultivo j debe ser cosechado únicamente por una maquina i en k segmentos de tiempo:

$$\sum_{k \in K} X_{ijk} \leq TP_{ij} * \sum_{k \in K} Y_{ijk} \quad \forall_{i,j} \quad (4)$$

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

$$\sum_{k \in K} (FVLI_{ijk} + FVLS_{ijk}) * X_{ijk} \leq MAFV_{ij} \quad \forall_{i,j} \quad (5)$$

- L_{ijk} deberá tomar valor de uno cuando un cultivo j sea cosechado en un segmento de tiempo k prematuro:

$$FVLI_{ijk} * X_{ijk} = L_{ijk} \quad \forall_{ijk} \quad (6)$$

- U_{ijk} deberá tomar valor de uno cuando un cultivo j sea cosechado en un segmento de tiempo k por encima del límite superior de su ventana de tiempo:

$$FVLS_{ijk} * X_{ijk} = U_{ijk} \quad \forall_{ijk} \quad (7)$$

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

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} Y_{ijk} = 1 \quad \forall_j \quad (8)$$

- Si una máquina i no ha comenzado a cosechar un cultivo j, el siguiente segmento de tiempo k no puede ser asignado:

$$\sum_{k2 \in K / k2 < k} X_{ijk2} \leq TP_{ij} * \sum_{k3 \in K / k3 < k} Y_{ijk3} \quad \forall_{i,j,k} \quad (9)$$

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

$$X_{ijk-1} + Y_{ijk} \geq X_{ijk} \quad \forall_{i,j,k} \quad (10)$$

- La demanda de hectáreas a de cada cultivo debe ser totalmente satisfecha:

$$\sum_{k \in K} X_{ijk} * EF_{ij} \geq H_j * \sum_{k \in K} Y_{ijk} \quad \forall_{i,j} \quad (11)$$

- No se debe exceder el número de segmentos de tiempo disponibles de una máquina i:

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in J} X_{ijk} \leq D_i \quad \forall_i \quad (12)$$

6.6 Cálculo de parámetros en Excel

Algunos de los parámetros previamente declarados fueron producto de operaciones matemáticas que involucran diversos factores. A continuación se describe la forma en la cual fue calculado cada uno de estos:

$$CLI_{ijk} = \frac{(DD*0.6)*(CP)*BultosCultivo*PrecioBulto}{TP_{ij}} \quad (13)$$

Donde:

DD: Días de diferencia entre determinado segmento de tiempo *k* prematuro y el límite inferior de un cultivo *j*.

BultosCultivo: Número de bultos extraíbles de determinado cultivo *j* teniendo en cuenta la variedad de semilla cultivada en este.

PrecioBulto: Precio normal de un bulto de arroz sin penalizaciones por humedad.

CP: Coeficiente de penalización manejado por la Arrocerca Cauca Ltda., a la cual se le es vendido el producido. $CP = \frac{1,33}{100}$

$$CLS_{ijk} = \frac{(DD*0.996)*(CP)*BultosCultivo*PrecioBulto}{TP_{ij}} \quad (14)$$

$$TP_{ij} = \frac{H_j}{TRD_i} * 10 \quad (15)$$

Donde:

TRD_i, es la tasa de recolección de hectáreas por día laboral de cada máquina *i*.

$$MAFV_{ij} = TP_{ij} * 0.25 \quad (16)$$

6.7 Valores de parámetros

A continuación, se expresan los valores de algunos de los parámetros empleados para la construcción del modelo (se excluyen los que representan tablas de grandes dimensiones como el caso de $FVLI_{ijk}$, CLI_{ijk} y semejantes previamente explicados):

Datos sobre productores y cultivos:

Tabla 1.

Datos de productores, tamaño de cultivos y variedades cultivadas.

Productor	Variedad	Cultivo	Ha sembradas
1	Mocori	C1	11
2	Mocori	C2	15
3	Fedearroz 473	C3	19
4	LB 440	C4	7
5	Fedearroz 2000	C5	15
6	Fedearroz 473	C6	13
7	Sica	C7	5
8	LB 440	C8	11
9	Mocori	C9	15
10	LB 440	C10	21
11	Sica	C11	13
12	Fedearroz 2000	C12	35
13	Mocori	C13	17
14	Mocori	C14	11
15	Fedearroz 473	C15	19
16	Sica	C16	30
TOTAL			257

En la anterior tabla se pueden observar las variedades de semilla sembradas por los productores para sus cultivos, cabe resaltar que cada variedad posee distintos rendimiento de bultos recolectados por hectárea sembrada; así mismo se puede evidenciar que la variedad más utilizada por los productores de Asoprotisagua para sus cultivos es la Mocori con 5 terrenos sembrados. Por otro lado, la menos utilizada fue la LB 440 con solo dos cultivos sembrados con dicha variedad.

Tamaño de cultivos en Ha:

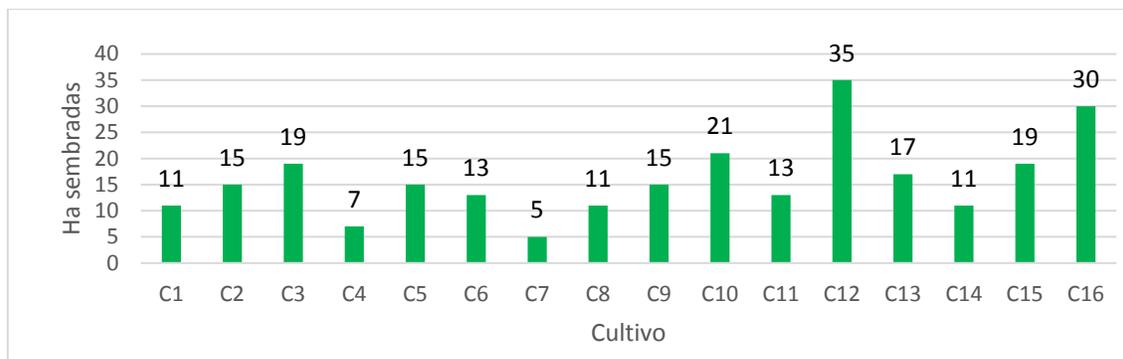


Figura 12. Tamaño de cultivos de la asociación.

En la figura 12, se puede observar el número de hectáreas sembradas por cada productor. Se puede evidenciar que los cultivos con más hectáreas sembradas son el 12 y el 16 con 35 y 30 hectáreas respectivamente, y los que menos hectáreas sembraron, fueron el 4 y el 7, con 7 y 5 hectáreas sembradas respectivamente. La media de hectáreas sembradas por productores es de $\mu=15,625$ hectáreas, con una desviación estándar de $\sigma=7,7$ hectáreas y un coeficiente de variación de $CV=49,6\%$, características explicadas en la alta variación en hectáreas sembradas por los productores.

Características de la maquinaria disponible:

Tabla 2.

Características de la maquinaria.

Máquina	Referencia	Turnos disponibles	Capacidad de recolección (Ha/día 10h)	Precio/bulto	Precio/Ha
M1	John Deere 960 ('75)	240	4,74	4000	50000
M2	John Deere MD 630 ('69)	240	3,52	4000	50000
M3	New Holland C. 8040 ('82)	240	3,99	4000	50000

En cuanto a las características de la maquinaria utilizada, las cuales se describen en la tabla 2, todas tienen la misma disponibilidad en tiempo para la Asociación. No obstante, existe una diferencia entre las capacidades de recolección de la maquinaria, lo cual se convierte en un parámetro decisivo para la asignación de las máquinas a los cultivos como se podrá evidenciar en el próximo capítulo, debido a que a pesar que todas las máquinas tienen un mismo costo de recolección por bulto cosechado y por hectárea, estas capacidades afectan los costos de recolección por hora de los cultivos, como lo veremos más adelante.

Tiempos de procesamiento:

Tabla 3.

Tiempos de procesamiento TPij.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16
M1	24	32	41	15	32	28	11	24	32	45	28	74	36	24	41	64
M2	32	43	54	20	43	37	15	32	43	60	37	100	49	32	54	86
M3	28	38	48	18	38	33	13	28	38	53	33	88	43	28	48	76

En la tabla 3, podemos observar los tiempos de procesamiento de los cultivos con relación a la maquinaria disponible. En esta tabla se pueden evidenciar diferencias entre el tiempo de procesamiento de un cultivo dependiendo de la máquina utilizada para recolectar este, diferencia que se explica en las capacidades de recolección de cada máquina. Ver tabla 2.

Costos de recolectar un cultivo j con una máquina i en instante de tiempo k (COP):

Tabla 4.

Costos de recolección sin sobrecostos C_{ij}

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
M1	160416,67	164062,50	115853,66	135333,33	98437,50	116071,43	108181,82	132916,67
M2	120312,50	122093,02	87962,96	101500,00	73255,81	87837,84	79333,33	99687,50
M3	137500,00	138157,89	98958,33	112777,78	82894,74	98484,85	91538,46	113928,57

	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16
M1	164062,50	135333,33	110500,00	99324,32	165277,78	160416,67	115853,66	111562,50
M2	122093,02	101500,00	83621,62	73500,00	121428,57	120312,50	87962,96	83023,26
M3	138157,89	114905,66	93757,58	83522,73	138372,09	137500,00	98958,33	93947,37

El costo de recolección sin sobrecosto de un cultivo, como se mencionó en capítulos anteriores, se calcula con base a un costo variable, dependiente del número de bultos cosechados, más un costo fijo por hectárea cosechada. No obstante como se puede observar en las tablas 4 y 5, el costo de cosecha en un segmento de tiempo k , es decir el costo de recolección por hora de un cultivo, difiere igualmente según la maquinaria utilizada para su recolección, lo cual se explica en la diferencia en las capacidades de recolección de la maquinaria.

Máximas asignaciones permitidas por fuera de segmentos de tiempo adecuados:

Tabla 5.

Máximas asignaciones permitidas por fuera de segmentos de tiempo adecuados MAFVij.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16
M1	6	8	10	4	8	7	3	6	8	11	7	19	9	6	10	16
M2	8	11	14	5	11	9	4	8	11	15	9	25	12	8	14	22
M3	7	10	12	5	10	8	3	7	10	13	8	22	11	7	12	19

Este parámetro se empleó en el modelo, con el objetivo de evitar que este castigara a los productores con menos hectáreas cultivadas y asigna su cultivo completo por fuera de los segmentos de tiempo adecuados para su recolección y así, cargara los sobrecostos a pocos cultivos pero afectando completamente a estos productores.

Definición de límites de ventanas de tiempo:

Tabla 6.

Definición de ventanas de tiempo para el total de cultivos.

Cultivo	Rango prematuro		Rango Apropiado		Rango vencido	
	Inicio	Final	Inicio	Final	Inicio	Final
C1	0	20	21	170	171	240
C2	0	0	1	70	71	240
C3	0	40	41	190	191	240
C4	0	0	1	50	51	240
C5	0	0	1	90	91	240
C6	0	0	1	110	111	240
C7	0	20	21	170	171	240
C8	0	30	31	180	181	240
C9	0	60	61	210	211	240

C10	0	0	1	130	131	240
C11	0	110	111	240	241	240
C12	0	40	41	190	191	240
C13	0	100	101	240	241	240
C14	0	0	1	140	141	240
C15	0	0	1	70	71	240
C16	0	20	21	170	171	240

En la anterior tabla, podemos observar los límites de las ventanas de tiempo para los cultivos, los cuales fueron calculados con los datos del primer periodo de cosecha del año 2016, el cual fue en el mes de Junio. Estos límites fueron calculados según el criterio de los productores de Asoprotisagua, los cuales, mediante su experiencia han logrado identificar un periodo de 15 días adecuados para la recolección de los cultivo. En promedio inician el día 105 a partir de la siembra y finaliza el día 120, variando este, según las condiciones de humedad del ambiente y del grano.

6.8 Estado previo a la aplicación del modelo

En el primer periodo de cosecha del año 2016, se tomaron registros completos de la asignación realizada por parte de las directivas de Asoprotisagua. A continuación, se presentan los datos recolectados, los cuales se basan en los parámetros previamente mencionados.

6.8.1 Asignaciones previas al modelo.

En el siguiente diagrama de Gantt se encuentra representado el arreglo de asignaciones que tuvo lugar en el primer periodo de cosecha del año 2016:

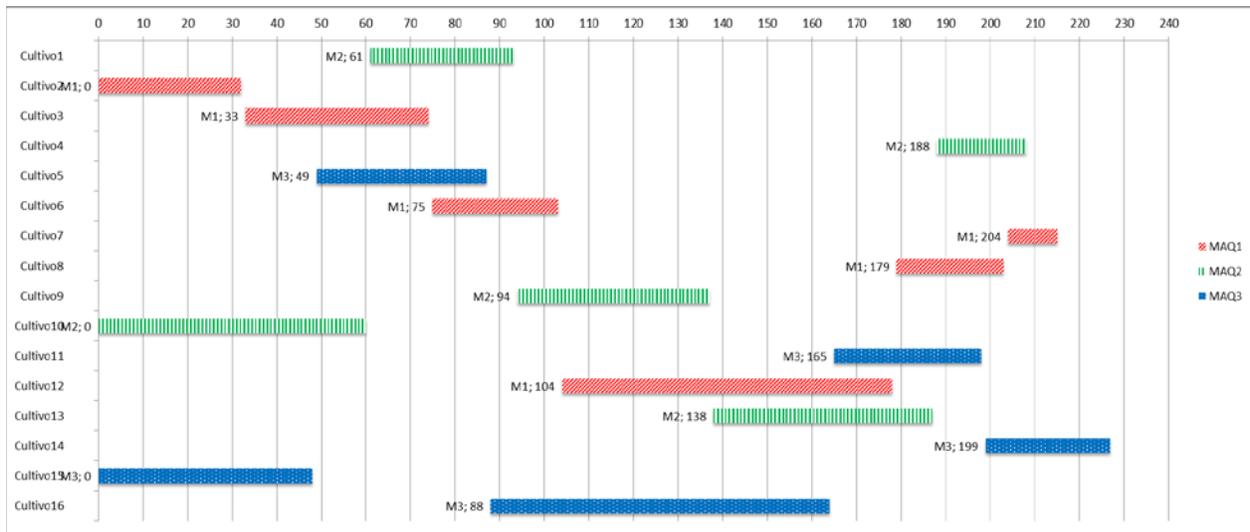


Figura 13. Asignación realizada por las directivas de Asoprotisagua antes de implementar modelo.

En la figura 13, se puede observar la asignación realizada por los productores de la asociación antes de implementar el modelo, dicha asignación es realizada según la evolución en la humedad de los cultivos, la mayoría de las veces impulsada por el interés de los productores a que su cultivo sea cosechado la más rápido posible, haciendo que los costos totales de la recolección de los cultivos aumente debido a los sobrecostos generados por las penalizaciones impuestas a estos debido a la calidad del arroz.

6.8.2 Sobrecostos por asignación.

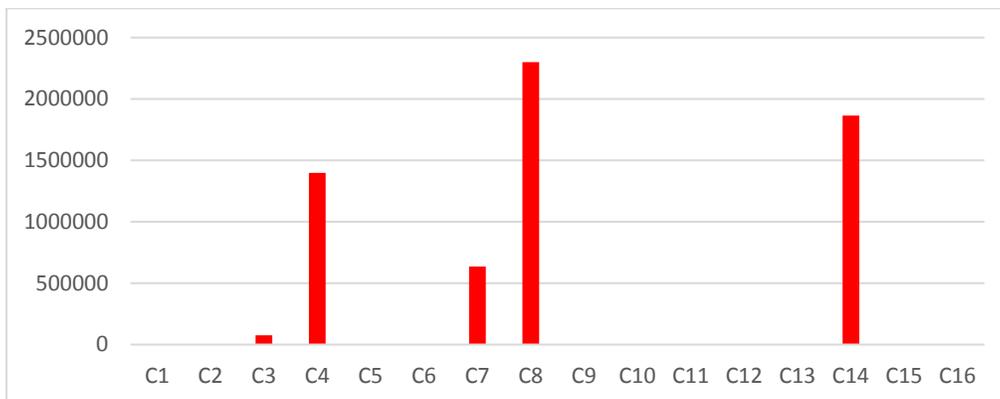


Figura 14. Sobrecostos por cultivos antes de aplicar modelo.

En términos de sobrecostos, la anterior asignación representó un total de 6.273.232,09 COP para la asociación.

Como se pudo evidenciar en las anteriores ilustraciones, existe un gran número de cultivos que sufren sobrecostos. Esta situación se pretende solucionar mediante el modelo matemático propuesto, la programación de este es mostrada en el siguiente apartado.

7. Resultados

Para la ejecución del modelo y obtención de los resultados se utilizaron los 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 mediante la utilidad GAMS Data eXchange (GDX), logrando con esto, facilidad y practicidad a la hora de hacer cambios en los parámetros del modelo sin incurrir en grandes cambios a nivel de su codificación en GAMS.

Se tomaron en consideración los recursos y tareas existentes en Asoprotisagua, los cuales son: tres (3) máquinas, dieciséis (16) cultivos que representan 257 hectáreas a cultivar, y doscientos cuarenta (240) horas, equivalentes a 24 días laborales.

El modelo fue ejecutado en un ordenador con las siguientes características: CPU Intel Core i5-3230M 2.6 Ghz, 6Gb de memoria RAM DDR3 y sistema operativo Windows 7 Ultimate x64 bits. Se utilizó el solver CPLEX bajo el tipo de problema MIP *-Mixed integer programming-*, donde luego de 18,12 minutos de ejecución y 2.738.325 iteraciones, se llegó a un costo total de asignación de COP 71'028.959,56 representado por la siguiente figura:

7.1 Nueva asignación

Luego de ejecutar el modelo propuesto, se corroboró el cumplimiento de las restricciones planteadas, obteniendo el siguiente diagrama de Gantt donde se puede apreciar de manera global el nuevo plan de asignaciones que permitirá minimizar los costos del proceso de cosecha mecanizada:

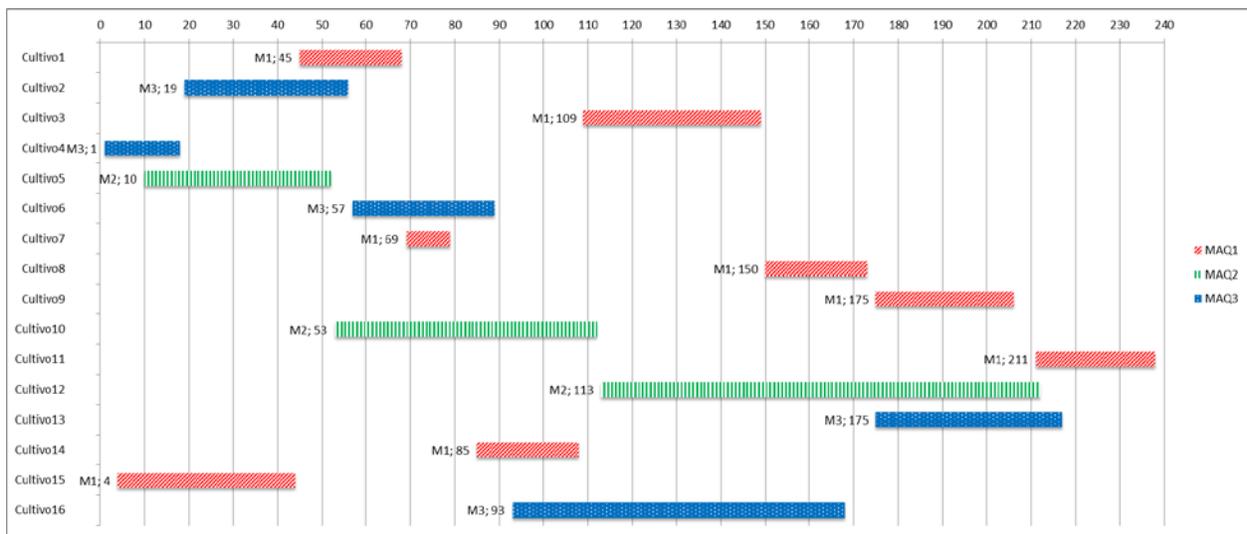


Figura 15. Asignación de máquinas a cultivos después de implementar modelo.

En la asignación realizada por el modelo planteado, se puede evidenciar algunos tiempos de ocio de la maquinaria al terminar de cosechar un cultivo y comenzar otro, dicho tiempo de ocio se puede utilizar en el mantenimiento y los arreglos necesarios para que las maquinas realicen el proceso de cosecha eficientemente, o seguir realizando las respectivas operaciones de mantenimiento después de finalizar su día laboral, como lo han venido haciendo anteriormente.

A continuación, se detalla el plan de trabajo de cada máquina con el fin de dar a conocer en detalle su programación:

Tabla 7.

Asignación de trabajos a M1 en detalle.

NOMBRE DEL CULTIVO	K INICIO	K FINAL	DURACIÓN (HR)
Cultivo1	45	68	23
Cultivo3	109	149	40
Cultivo7	69	79	10
Cultivo8	150	173	23

Cultivo9	175	206	31
Cultivo11	211	238	27
Cultivo14	85	108	23
Cultivo15	4	44	40

Tabla 8.

Asignación de trabajos a M2 en detalle.

NOMBRE DEL CULTIVO	K INICIO	K FINAL	DURACIÓN (HR)
Cultivo5	10	52	42
Cultivo10	53	112	59
Cultivo12	113	212	99

Tabla 9.

Asignación de trabajos a M3 en detalle

NOMBRE DEL CULTIVO	K INICIO	K FINAL	DURACIÓN (HR)
Cultivo2	19	56	37
Cultivo4	1	18	17
Cultivo6	57	89	32
Cultivo13	175	217	42
Cultivo16	93	168	75

El siguiente gráfico, se ilustran los niveles de utilización de la maquinaria en función del total de segmentos de tiempo k asignados a cada combinada en todo el periodo de cosecha:

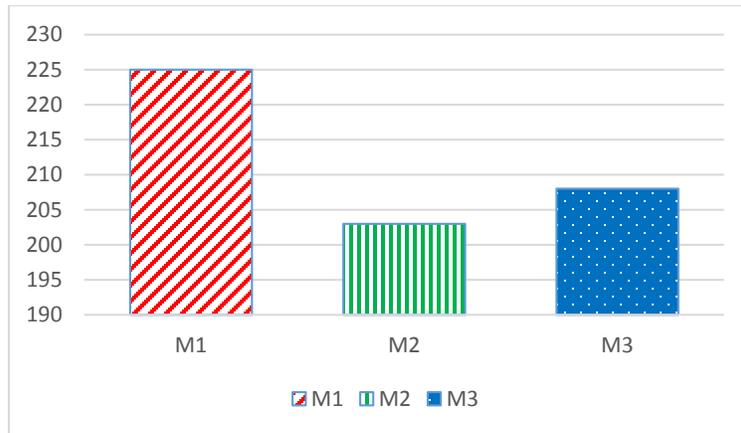


Figura 16. Segmentos de tiempo k asignados a cada máquina.

Se puede observar en una relación directamente proporcional entre en número de segmentos de tiempo k asignados a una maquinaria y la capacidad de recolección de esta.

7.2 Sobrecostos de nueva asignación

Luego de aplicar el modelo propuesto, se obtuvieron los siguientes sobrecostos por cultivo:

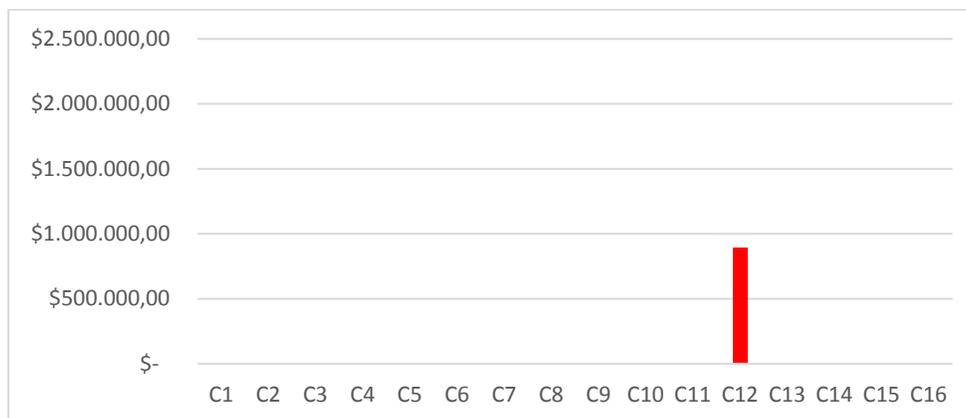


Figura 17. Sobrecostos por cultivo después de aplicar modelo.

En la asignación realizada por el modelo planteado, se puede observar que solo se asignó un cultivo en segmentos de tiempo con sobrecostos. Ver figura 1. Esta asignación pudo haber sido realizada por motivo de ser el cultivo con mayor número de hectáreas cosechadas y con el fin de que el modelo cumpliera con la restricción en el porcentaje de asignaciones por fuera de la ventana de tiempo de los cultivos.

7.3 Comparativa de sobrecostos por asignación

Con la nueva asignación, únicamente el cultivo 12 posee asignaciones con sobrecosto, este tiene un total de 22 segmentos de tiempo asignados por fuera de su periodo adecuado de cosecha, representando estos un 22% del total del cultivo 12. Lo anterior satisface la restricción referente a la no asignación de un cultivo por más del 25% de su extensión total de terreno. De igual manera, la restricción de cumplimiento de hectáreas a cosechar en cada cultivo es satisfecha junto con la restricción de disponibilidad del recurso maquinaria y demás condiciones del modelo.

En las siguientes figuras, se pueden observar las diferencias entre la asignación llevada a cabo por Asoprotisagua en el mes de marzo de 2016, y la asignación llevada a cabo mediante el presente modelo bajo los mismos parámetros en términos de costos totales y sobrecostos respectivamente:

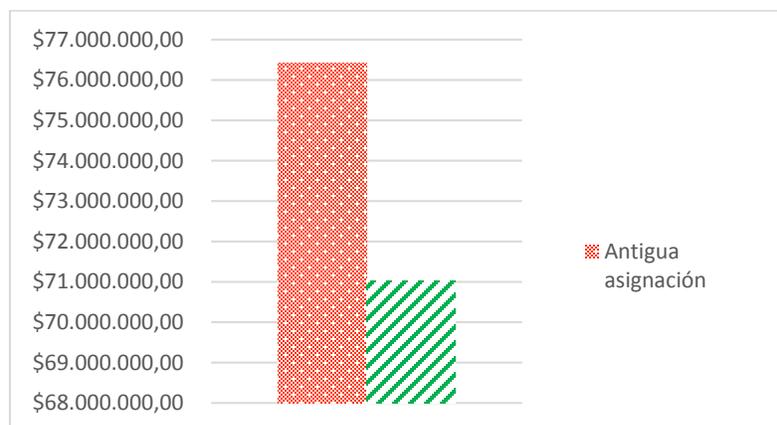


Figura 18. Costos totales de asignación antes y después de modelo.

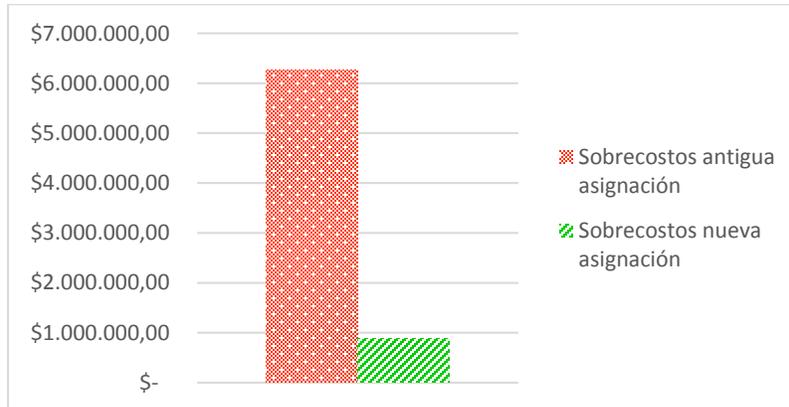


Figura 19. Sobrecostos totales de asignación antes y después de modelo.

La anterior solución satisface las condiciones establecidas y permite minimizar los costos totales de asignación en 5.378.272,53 COP. Sin embargo, al realizar diferentes instancias variando ligera y selectivamente determinados parámetros, se encontró que permitiendo un máximo de 30% de asignaciones por fuera del periodo adecuado de cosecha, se llega a una mejor solución, la cual trae menores costos para la asociación. No obstante, la implementación de la nueva alternativa que genera un ahorro adicional de \$ 46.812,55, por ser una violación a políticas internas de la asociación, no es considerada una solución viable.

Lo anterior demuestra que el modelo funciona satisfactoriamente, y permite hacer una asignación de la maquinaria de manera que se incurra en los menores sobrecostos posibles, respetando también, políticas internas de la asociación.

8. Conclusiones

Con respecto a los resultados obtenidos del modelo, es posible concluir que este brinda una solución satisfactoria para el problema planteado, minimizando en 7,04% el costo total de asignación de maquinaria, y en 85,73% los sobrecostos para el proceso de cosecha de arroz, realizando una correcta asignación de la maquinaria teniendo en cuenta políticas internas de la asociación y las particularidades de cada cultivo a través del tiempo. En donde visualizando la utilización del recurso maquinaria, se concluye que se puede prescindir de las máquinas 2 y 3 desde el día de cosecha número 22.

Los tiempos de ejecución del modelo fueron aceptables para los parámetros establecidos. No obstante, el tiempo de ejecución se mostró inversamente proporcional a la holgura de recursos que exista en el modelo, llevando más de 48 horas la solución de instancias con ventanas de tiempo más estrechas y mayor extensión de hectáreas. Lo anterior hace que para este tipo de instancias, el problema a tratar se convierta en uno de tipo NP, y requiera de mayores recursos computacionales para obtener soluciones en tiempos aceptables.

Cabe destacar que la integración de las hojas de cálculo de Microsoft Excel con GAMS, brindó la posibilidad de manipular grandes volúmenes de datos de forma rápida y sencilla sin necesidad de cambiar cada uno de los datos que componen cada parámetro desde la sintaxis de GAMS.

La estructura utilizada para abordar el problema, convierte al modelo desarrollado en uno de carácter general que puede ser aplicado a otro tipo de problemas en los que se tengan diferentes procesadores independientes entre sí, los cuales deban atender determinado número de tareas de manera consecutiva con costos que fluctúen a través del tiempo. Sirviendo esto, como base de referencia para futuras investigaciones.

Referencias bibliográficas

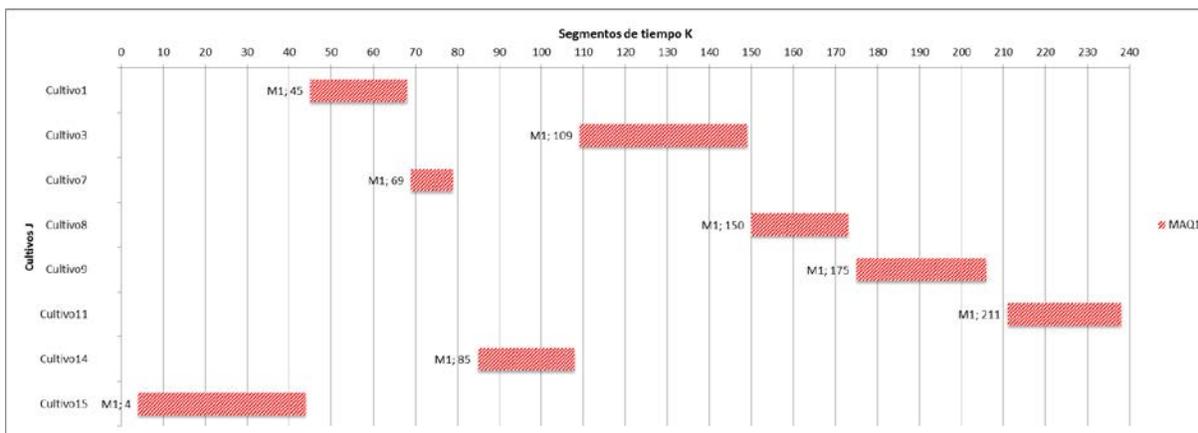
- Alvarado Boirivant, J. (2009). La Programación Lineal Aplicación de las Pequeñas y Medianas Empresas . *Reflexiones*, 89-105.
- Alvarado Boirivant, J. (2011). El Análisis Post-Optimal en Programación Lineal Aplicada a la Agricultura. *Reflexiones*, 161 - 173.
- Alvarado, A. (2004). *Maquinaria y mecanización agrícola*. San Jose de Costa Rica: Editorial Universidad Estatal a Distancia.
- Aramendiz, H., Espitia, M., & Cardona, C. (2011). Adaptación del arroz riego (*Oryza sativa* L.) en el Caribe colombiano. *Acta Agrónomica*, 1(60), 1-12.
- Arango, J., Giraldo, J., Castrillón, O., & Moreno, E. (2013). Programación de Máquinas paralelas no relacionadas con tiempos de montaje dependientes de la secuencia y entrada dinámica usando algoritmos genéticos. *Inf. Tecnol*, 24(3), 73-84.
- ASOCAE. (3 de Julio de 2016). *Asociación Española para la Cultura, el Arte y la Educación*. Obtenido de Naturaeduca: http://www.natureduca.com/agro_indice.php
- Blanco, V., Carpena, L., Hinojosa, Y., & Puerto, J. (2010). Planning for agricultural forage harvesters and trucks: Model, Heuristics, and case study. *Networks Spat. Econ.*, 10(3), 321-342.
- Blanco, V., Carpena, L., Hinojosa, Y., & Puerto, J. (2010). Planning for Agricultural Forage Harvesters and Trucks: Model, Heuristics, and Case Study. *Netw Spat Econ*(20), 321-343.
- Cadena, G. (2011). Ingeniería y Agro. *Revista de Ingeniería*, 70-87.
- Chaves, G., Ortiz, M., & Ortiz, L. (2013). Efecto de la aplicación de agroquímicos en un cultivo de arroz sobre los microorganismos del suelo. *Acta Agronómica*, 66-72.
- Cortes, E., Alvarez, F., & González, H. (2009). La mecanización agrícola: gestión, selección y administración de la maquinaria para las operaciones de campo. *CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 151 - 160.
- 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.

- DANE. (2013). *Boletín mensual Insumos y factores asociados a la producción agropecuaria*. Bogotá: DANE.
- De Lucia, M., & Assennato, D. (1993). *La ingeniería en el desarrollo - Manejo y tratamiento de granos poscosecha*. Roma: FAO. Recuperado el 21 de 7 de 2016, de www.fao.org/docrep/x5041s/x5041S02.htm
- Diaz, C., & Chaparro, A. (2012). Metodos y usos agrícolas de la ingeniería genética aplicada al cultivo del arroz. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 179-195.
- Fedearroz. (2014). *Manejo integrado del cultivo de arroz: Produmedios*. Bogotá: Federación Nacional de Arroceros .
- Furian, P., & Schlosser, J. (2013). Eficiência operacional na colheita mecanizada em lavouras de arroz irrigado. *Ciência Rural*, 43(3), 445-451.
- Gómez, J., Escobar, J., & Figueroa, Á. (2013). A Multi-Product Lot-Sizing Model for a Manufacturing Company. *Ing. Investig. y Tecnol*, 14(3), 413-419.
- Gómez, L. (27 de 05 de 2015). *Repositorio Institucional UMNG*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10654/6434>
- HELPEES. (2015). *Recursos*. Obtenido de Helpes.EU: <http://www9.helpes.eu/01146133/AgriculturaMecanizada>
- Heros, E. (2013). *Manejo integrado del cultivo de arroz*. Rioja - San Martin: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2010). *Introducción a la Investigación de Operaciones*. Mexico: Mc Graw Hill.
- Izar, J. (1996). *Fundamentos de investigación de operaciones para la administración*. UASLP.
- Larroza, A., Acosta, A., & Arce, A. (2010). Programa Optimo de Trabajo de Maquinas de una Industria Tabacalera.
- Lopez, M. (2000). *Modelamiento de la programación de labores agrícolas mecanizadas en predios con cultivos múltiples*. Santiago: Universidad de Concepción.
- Márquez, J., Ávila, R., Gómez, M., & 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.

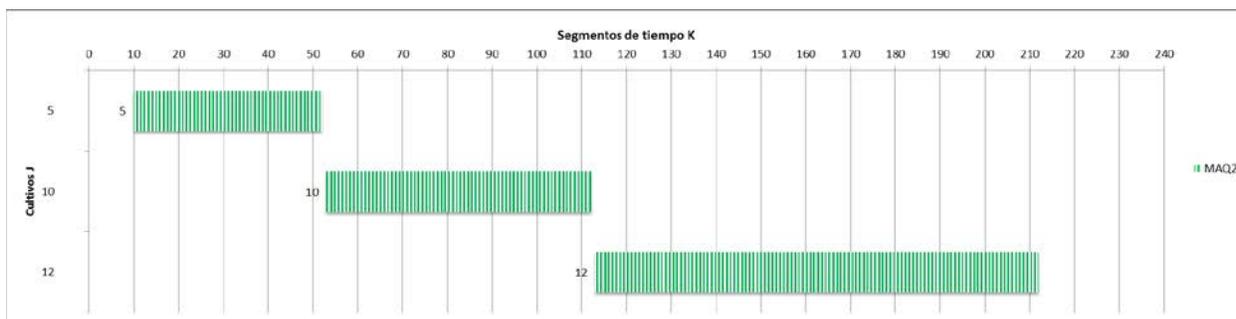
- Ministerio del Medio Ambiente. (2002). *Guía ambiental para el subsector arrocero*. Sociedad de Agricultores de Colombia.
- Miranda Caballero, A., Castells Hernández, S., Fernández Abreu, O., Santos González, F., & Iglesias Coronell, C. (2013). Análisis de la utilización del tiempo de turno por las cosechadoras arroz CLAAS DOMINATOR. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 22(4), 27-31.
- Miranda, A., Castells, S., Fernández, O., Santos, F., & Iglesias, C. (2013). Análisis de la utilización del tiempo de turno por las cosechadoras arroz Class Dominator. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 22(4), 27-31.
- Miranda, A., Iglesias, C. E., Ribert, Y., Santos, F., & Castells, S. (2011). Determinación del contenido de impurezas durante la cosecha de arroz. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20(4), 53-56.
- Moreno, E., López, M., & Merino, G. (2006). Perfeccionamiento del Modelo Adoma Mediante la Inclusión de la Ambigüedad en Algunos de sus Parámetros. *Agric. Técnica*, 66(2), 185-195.
- Moya Navarro, M. J. (1998). *Investigación de Operaciones - La Programación Lineal*. San Jose de Costa Rica: Editorial Universidad Estatal a Distancia .
- Orejuela, J., Osorio, J., Castrillón, O., & Toro, J. (2008). Modelo de programación jerárquica de la producción en un Job shop flexible con interrupciones y tiempos de alistamiento dependientes de la secuencia. *Ingeniería e Investigación*, 28(2), 72-79.
- Quirós, R., & Ramírez, C. (2006). Evaluación financiera de la fertilización nitrogenada del cultivo de arroz en siembra directa sobre rastrojos. *Agronomía Costarricense*, 75-85.
- Rebrej, M., & Mariani, F. (2015). Agricultura, religiosidad y tiempo: su articulación en la cosmovisión maya. *Historia y Sociedad*, 153-170.
- Sánchez, D., Bedoya, C., Valderrama, A., & Suárez, J. (2015). Desempeño agronomico de dos variedades de arroz en la amazonia colombiana. *Ingenierías & Amazonas*, 6(1).
- Sánchez, J., & Meneses, O. (2012). Parámetros que influyen en la calidad industrial del arroz cosechado en el municipio La Sierpe. *Observatorio de la Economía Latinoamericana*, 10(163).

- Sanchez, O. (2013). Algoritmos de programación dinámica con R para resolver problemas de alineamiento de secuencias,”. *Investig. Oper.*
- Secretaria de Agricultura y Ganaderia. (2003). *Manual técnico para el cultivo de arroz*. Comayagua: SAG.
- Serna, H. (2015). *Planeación y gestión estratégica: teoría-metodología*. Bogotá: Legis Editores SA.
- Taha, H. (2012). *Investigación de Operaciones*. México: Pearson.
- Yovel, R., & Hassin, R. (2015). Sequential scheduling on identical machines. *Oper. Res. Lett*, 43(5), 530-533.
- Zalazar, B. (2012). *E-Resources, Training and Technology*. Recuperado el 01 de 09 de 2015, de Ingeniería Industrial Online: <http://www.ingenieriaindustrialonline.com>

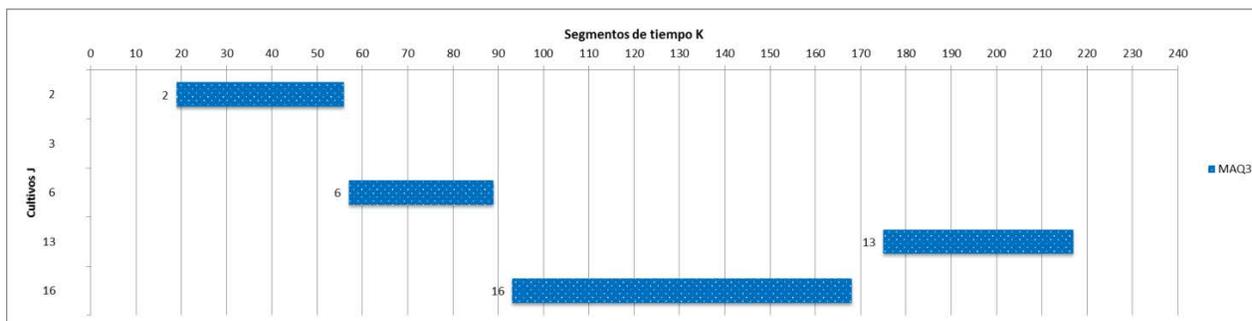
Anexos



Anexo 1. Asignación de trabajos a M1.



Anexo 2. Asignación de trabajos a M2.



Anexo 3. Asignación de trabajos a M3.