

Linear Programming: Tool for Agricultural Development

Andrea Nicolle Flores Zuniga, Ingeniería Industrial y de Sistemas¹, Paola Michelle Pascua Cantarero, Magíster en Educación con Énfasis en Docencia Universitaria²

^{1,2}Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC), Honduras, andreaflores17@unitec.edu, paola.pascua@unitec.edu.hn

Abstract– The current investigation proposed to design a crop rotation plan based on organic farms that improves farm income through linear programming. To carry out the investigation, the problem was defined in the farms in Mata de Plátano, El Paraiso, Honduras where they lack agricultural training and knowledge; the operations on their farms do not provide competent utility or productivity and affects their income.

To accomplish the objective surveys were made to know about the resources that the farms in Mata de Plátano already had. Also, a documentary review was prepared to define all the principles of crop rotation that the mathematical model must follow. Subsequently, the mathematical model was developed through Solver Excel and finally its operation was validated by comparing the results with farm's current practices.

In conclusion, the investigation was carried out successfully. The mathematical model followed all the principles of crop rotation, the constraints from the current available resources, found the optimal solution to increase farms production and it was validated that the model generates more profits than the current method.

Keywords-- crop rotation, linear programming, operations research, organic farms, optimization

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

Programación Lineal: Herramienta Para El Desarrollo Agrícola

Andrea Nicolle Flores Zuniga, Ingeniería Industrial y de Sistemas¹, Paola Michelle Pascua Cantarero, Magíster en Educación con Énfasis en Docencia Universitaria²

^{1,2}Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC), Honduras, andreaflor17@unitec.edu, paola.pascua@unitec.edu.hn

Abstracto- La presente investigación se propuso diseñar un plan de rotación de cultivos basado en fincas orgánicas que mejore los ingresos de las fincas a través de programación lineal. Para llevar a cabo la investigación se definió el problema en las fincas en Mata de Plátano, El Paraíso donde carecen de formación y conocimiento agrícola por lo que las operaciones en sus fincas no brindan una utilidad ni productividad competente.

Para lograr el objetivo se realizaron encuestas para conocer los recursos con los que las fincas ya contaban, también, se elaboró una revisión documental para definir todos los principios de rotación de cultivos que el modelo matemático debe seguir. Se elaboró el modelo matemático a través de Solver Excel y se procedió a validar el funcionamiento de este.

El modelo matemático se logró elaborar a partir de la información recolectada por las encuestas a las fincas y también se informaron todos los principios de la rotación de cultivos a partir de la revisión documental. Se encontró la solución óptima maximizando las utilidades de las fincas y se validó que el modelo genera 48% más utilidades que el método actual.

Palabras Clave-- rotación de cultivos, programación lineal, investigación de operaciones, fincas orgánicas, optimización

I. INTRODUCCIÓN

El Banco Mundial en la sección de agricultura y alimentos mencionó que para un desarrollo mundial es necesario que cada país tenga sistemas alimentarios sólidos, sostenibles e inclusivos. También, que el progreso agrícola es entre dos y cuatro veces más eficaz que otros rubros para incrementar los ingresos de la población que vive en pobreza. Según el análisis del 2016, el 65% de los adultos pobres que trabajan, laboran en el sector agrícola. [1]

En América Latina, la situación de los agricultores es similar. Organismos como Comisión Económica para América Latina y el Caribe y la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación, reconocieron que durante la crisis del 2007-2008 la pobreza se redujo en países que experimentaron un crecimiento en el sector agrícola. Sin embargo, en esta región gran parte de los agricultores son asalariados y no cuentan con sus propias tierras. [10]

Es importante conocer de distintas prácticas agrícolas, como el método de rotación de cultivos que ha demostrado generar mayor productividad. El Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo ubicado en México, elaboró un experimento con la rotación de trigo, maíz, garbanzo y sorgo; como resultado todas las rotaciones tuvieron un aumento en producción, siendo la más alta 1,207 kg/ha más que si se hubiese cultivado de forma monótona. [13]

Con relación a lo anterior, la Universidad de Costa Rica, Jorge Boirivant elaboró un modelo matemático de programación lineal en rotación de cultivos. En su modelo utilizó ocho cultivos y la programación se lleva a cabo a lo largo de un año. La investigación obtuvo un plan óptimo de producción desde un punto de vista financiero, es decir, consideró los rangos de precio de las actividades, evaluó costos de sustitución de cultivos e identificó el mejor uso de recursos. [2]

El Banco Interamericano de Desarrollo realizó un análisis de políticas agropecuarias en Honduras. Este estudio reveló que el sector agrícola representó en el mismo año al 28.3% de la población económicamente activa que practica mayormente agricultura tradicional, es decir, cultivos básicos. Se expuso sobre el Plan 2020 con el fin de activar la economía a través pilares, siendo uno el sector agrícola y esperando un aumento de USD 700 millones en el producto interno bruto. [5]

Según el Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola (FIDA) su grupo objetivo para el plan de acción en Honduras son los pequeños y medianos productores agrícolas que viven en una situación de pobreza junto con sus familias y que tienen un acceso limitado, por ejemplo, a infraestructura, educación, asistencia técnica, a comercializar en mejores mercados, entre otros. [9]

En su informe también incluyó la distribución de los agricultores en Honduras, el 70,6% de los productores son propietarios de 5 hectáreas o menos. El plan de estrategia (2020-2025) de FIDA se centró en problemáticas como la baja productividad, falta de diversificación y la disminución del valor añadido que son los mayores causantes de la pobreza rural. [9]

Por todo lo anteriormente mencionado el objetivo de esta investigación fue diseñar un plan de rotación de cultivos en base a fincas orgánicas que mejore los ingresos de las fincas en Finca Las Colinas, Mata de Plátano a través de un modelo matemático de programación lineal.

II. METODOLOGÍA

A. Enfoque

El enfoque cuantitativo se caracteriza por ser objetivo y por seguir un proceso riguroso, es decir, no se puede saltar de una etapa a otra. También, se basa en la recolección de datos por lo que sus resultados son netamente numéricos. El análisis de las investigaciones cuantitativas se basa en investigaciones previas y los resultados provienen de una interpretación de como encajan con el conocimiento que ya existe. [11]

El enfoque de esta investigación es cuantitativo, los resultados que se presentan es un incremento de los ingresos de una finca que son completamente numéricos. Igualmente, la base proviene de estudios previos y los resultados de como ese conocimiento se acopla a los datos obtenidos.

a. Alcance

El alcance de esta investigación fue analítica-correlacional. El objetivo de este alcance es encontrar explicaciones a través del estudio de sus variables, sin que exista alguna manipulación en las mismas. Este tipo de investigación informa en qué medida la alteración de una variable afecta las demás. [5]

Siendo ese el caso, en esta investigación el alcance es correlacional ya que los ingresos de la finca dependen directamente de la rotación de cultivos, es decir, entre más siembro de un cultivo en específico los ingresos van a depender más del rendimiento que ese cultivo produce.

B. Variables de investigación

Para llevar a cabo la investigación se definieron las siguientes variables que posteriormente fueron utilizadas para la construcción del modelo matemático.

- i. Cultivo: Los cultivos específicos que forman parte del plan de rotación en sus nombres comerciales.
- ii. Disponibilidad de terreno: La cantidad de terreno que tiene disponible para cosechar el agricultor en hectáreas.
- iii. Capital disponible: La cantidad de dinero en lempiras que cada finca tiene disponible para invertir.
- iv. Costos de producción: Los costos de producción de cada cultivo en lempiras por hectárea.
- v. Ingresos de producción: Los posibles ingresos por la producción de cada cultivo por hectárea.
- vi. Rendimiento: El rendimiento financiero por cada cultivo por hectárea.
- vii. Periodo siembra-cosecha: La cantidad de meses que tarda cada cultivo desde su siembra hasta su cosecha.
- viii. Rendimiento total: El rendimiento total generado por el terreno disponible según los cultivos utilizados.
- ix. Periodo de tiempo: El periodo de tiempo en años que va a durar el plan de rotación.

C. Técnicas e instrumentos aplicados

a. Instrumentos

Encuestas: Se aplicaron encuestas para conocer los recursos y conocimientos de cada finca.

Revisión documental: Revisión de fichas técnicas de cada cultivo seleccionado, de manuales de rotación de cultivos y de estrategias en fincas orgánicas.

b. Técnicas

Estadística simple: Se utilizó estadística simple para generar gráficos y tablas de las encuestas recibidas.

Programación lineal: Solución del modelo matemático a través de Solver Excel.

D. Población y Muestra

La población total para la investigación fue de 15 fincas en Mata de Plátano ubicadas en un mismo sector y anexadas a Finca las Colinas. Para obtener la muestra se utilizó muestreo probabilístico por muestreo aleatorio simple. Como resultado se obtuvo una muestra de 14 fincas utilizando un nivel de confianza del 96%.

III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A. Conocimientos y recursos de las fincas en Finca las Colinas, Mata de Plátano

En la investigación fue importante obtener información sobre los recursos, el conocimiento y lo que acostumbran a cultivar las fincas de la muestra. Para obtener esa información se realizaron encuestas a 14 fincas del área. En la encuesta se obtuvo información demográfica, detalles del acceso a recursos financieros, técnicas de riego, los cultivos y técnicas

de fincas orgánicas. A continuación, se presentan los hallazgos principales:

- i. El 87,5% tiene educación primaria como grado máximo de escolaridad, el restante nunca asistió a la escuela.
- ii. Todas las fincas son negocios familiares y en su mayoría laboran menos de 5 personas.
- iii. Ningún agricultor ha recibido formación agrícola.
- iv. El 71,4% de las fincas posee entre 0,5 a 1,0 ha de terreno, el restante entre 1,0 y 1,5 ha.
- v. El 57,1% de las fincas tiene entre L.10,000.00 a L.20,000.00 de capital disponible, un 28,6% menos de L.10,000.00 y un pequeño porcentaje más de L.20,000.00.
- vi. Actualmente cosechan café, maíz, frijol, tomate, chile dulce, plátano, pataste y manzana. Siendo los más comunes café, maíz y frijol.
- vii. Todas las fincas riegan sus cultivos a partir de vertientes naturales que hay dentro de los terrenos.
- viii. Ninguna finca utiliza insumos agrícolas.
- ix. Ninguna finca practica rotación de cultivos.
- x. Un 35,7% de las fincas utilizan o han utilizado fertilizantes orgánicos.

Con esta información en primer lugar se confirma que en las fincas se practica agricultura tradicional basado en conocimiento empírico, ya que no han tenido acceso a educación superior ni formación agrícola. También, que se trata de una agricultura familiar en donde no hay pagos de planilla ya que la misma familia trabaja y vive de la tierra que poseen. Así mismo, que son pequeños productores con pocas hectáreas disponibles.

Gran porcentaje de las fincas poseen de L.10,000.00 o menos para cosechar por lo que esta es la cantidad de capital asignada en el modelo matemático y 1,0 ha de terreno disponible. Se reducen bastante los costos por el acceso a agua gratis de vertientes naturales que tienen las fincas.

En los cultivos de rotación se prioriza los cultivos brindados en las encuestas. Solo el café y la manzana no serán considerados, principalmente porque tienen ciclos de siembra cosecha muy largos (4 a 5 años). En el caso de la manzana solo se siembra en una de las fincas y no es un cultivo común en la región hondureña, por lo que su comercialización es complicada y el conocimiento limitado.

Por último, es importante que las fincas ya han utilizado métodos orgánicos porque da una apertura y aceptación dentro de Mata de Plátano a utilizar nuevos métodos de fincas orgánicas como lo es la rotación de cultivos.

B. Cultivos complementarios del plan de rotación de cultivos

En esta investigación fue primordial elaborar un plan de rotación de cultivos que se abstenga no solo a las restricciones financieras, pero también a las agrícolas. Para conocer esta información se elaboró una revisión documental utilizando revistas científicas, libros, manuales y hojas de datos de

planificación de rotación de cultivos de seis distintos autores que son ingenieros agrónomos con maestrías en agronomía e incluso doctores en ingeniería agrónoma latinoamericanos.

El artículo científico más importante es de la Universidad de Costa Rica del docente Jorge Alvarado Boirivant que elabora un modelo matemático en rotación de cultivos, es una referencia importante ya que se comparten muchas similitudes en terreno y clima con Honduras.

a. Principios generales de la rotación de cultivos

En la hoja técnica presentada por Appropriate Technology Transfer for Rural Areas (ATTRA) de agricultura sustentable sobre rotación de cultivos en sistemas agrícolas orgánicos resume y sintetiza los principios de una forma clara y concisa:

- i. Después de un cultivo de leguminoso debe ir un cultivo con alta demanda en nitrógeno.
- ii. Cultivos en baja demanda de nitrógeno debe ir después de cultivos de pastos.
- iii. No cultive de forma consecutiva dos cultivos de especies cercanas.
- iv. Utilice secuencias que promuevan cultivos sanos.
- v. Utilice cultivos que ayuden al control de malezas.
- vi. Intente incluir cultivos de raíz profunda.
- vii. Utilice cultivos que generan residuos de forma significativa.
- viii. Cuando utilice una amplia variedad de cultivos intente agruparlos según bloques de familia de las especies, tiempo de cultivos, tipo de cultivo, necesidades de nutrientes o por prácticas similares culturales. [6]

La síntesis de Dufour fue de gran ayuda para la investigación ya que logra enfatizar en las características más importantes para elaborar el plan de cultivo. En el modelo matemático se utilizó un plan que se desarrolla a lo largo de cuatro años, ya que no se debería de volver a rotar el mismo cultivo en mínimo dos años y también porque se tiene una amplia variedad de especies de cultivos con los que las fincas están familiarizados.

b. Selección y clasificación de cultivos por especie

En la tabla 1 se muestra la selección y clasificación final que será utilizada en el modelo matemático para el plan de rotación de cultivos. Para esta selección se tomaron en cuenta principalmente los cultivos que utilizan los agricultores de las fincas en Mata de Plátano según las encuestas y se agregó el cultivo de papa. Se escogió este cultivo ya que no se tenía contemplado ninguna especie de raíz, la zona esta familiarizada con el cultivo y son importantes en la rotación.

TABLA I
CULTIVOS SELECCIONADOS POR ESPECIE

Familias de plantas	Cultivos seleccionados
Leguminosas	Frijol
Pastos/Cereales	Maíz
Hortalizas	Chile dulce
	Pataste
	Tomate
Raíz	Papa
Cultivo en vianda	Plátano

Fuente: Elaboración propia

c. Temporada de siembra

La mayoría de los cultivos son flexibles en cuanto a la época de siembra, es decir que se puede sembrar en cualquier época del año siempre y cuando se tenga acceso a agua en verano. Por otro lado, el maíz y el frijol si tienen temporadas de siembra más marcadas. La Secretaria de Agricultura y Ganadería, elaboró una ficha técnica en donde establecen tres siembras: primera (mayo a junio), postrera (septiembre y octubre) y la tardía (noviembre, diciembre y enero). [12]

En la tabla 2 se elaboró un resumen de los meses en los que se puede sembrar cada cultivo seleccionado. Anteriormente en las encuestas se identificó que en las fincas hay acceso a vertientes de agua naturales que se mantienen llenas durante todo el año por lo que no representaría ningún problema en la siembra de verano. El maíz, frijol y plátano si poseen ciclos distintos por lo que los meses de siembra se recolectaron de fichas técnicas de investigación hondureña.

TABLA II
TEMPORADA DE SIEMBRA

Cultivo/Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
Frijol	X				X	X			X	X	X	X
Maíz					X	X	X		X	X		
Chile dulce	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Pataste	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Tomate	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Papa	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Plátano				X	X							

Fuente: Elaboración propia

d. Ciclos de rotación de los cultivos seleccionados

Se utilizaron distintos manuales de rotación para identificar el mejor orden de cultivos para rotar según cada especie seleccionada. En su mayoría se utilizaron manuales y fichas de la Fundación Hondureña de Investigación Agrícola. A partir esos criterios se elaboraron 4 propuestas de cosecha que serán utilizados para la elaboración del modelo matemático en Excel.

En la tabla 3 se muestran 4 propuestas de posibles rotaciones que se elaboraron de acorde a los cultivos seleccionados. Se decidió trabajar en un periodo de 4 años ya que era el suficiente para incluir los cultivos utilizados en Mata de Plátano y cumple con la restricción de no rotar un cultivo de nuevo por dos años o más así se logra incluir las múltiples familias de plantas en el plan.

TABLA III
PROPUESTAS DE ROTACIÓN DE CULTIVOS

Rotación	Cultivo	Rotación	Cultivo
Rotación 1	Frijol	Rotación 3	Chile
	Maiz		Tomate
	Chile		Papa
	Tomate		Patate
	Plátano		Maiz
	Papa		Frijol
Rotación 2	Patate	Rotación 4	Platano
	Chile		Frijol
	Tomate		Patate
	Papa		Maiz
	Patate		Frijol
	Maiz		Papa
Frijol	Tomate		
Plátano	Chile		

Fuente: Elaboración propia

De los cultivos, el maíz y el frijol tienen ciclos de rotación más cortos entre uno y el otro. Esto pasa principalmente por las temporadas específicas de siembra que poseen y porque son cultivos de asociación. Básicamente permite plantar maíz y frijol juntos en un mismo lote por lo que ciclos más cortos no afectan y por contrario benefician estos cultivos. En los cultivos restantes si se respetó que los ciclos de rotación no se repetirían dentro de al menos 2 años.

Se utilizó una matriz binaria que consta de los ciclos de cada cultivo. En la tabla 4 se muestra una pequeña fracción del año 1 y la rotación 1. Se representa con (1) el mes en donde un cultivo estaría sembrado y con (0) en el mes donde no se siembra el cultivo. De esta forma se logró incluir en el modelo matemático los ciclos de cada rotación a lo largo de los 4 años y que al resolverlo se anule con un cero el cultivo que no le corresponde ser sembrado.

TABLA IV
FRACCIÓN DE MATRIZ BINARIA

Cultivo/Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
Frijol	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Maiz	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
Chile	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tomate	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Plátano	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Papa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Patate	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

C. Calendario de rotación de cultivos en Open Solver

Al tener claros los principios de rotación de cultivos y las cuatro propuestas de rotación se procedió a construir el modelo matemático para conocer la cantidad de tierra que se le asignaría a cada propuesta. La respuesta óptima final para el modelo elaborado se obtuvo a través de por Open Solver en Excel, a continuación, se presentan los detalles del modelo.

a. Definición de variables

Se estableció la variable de decisión como X_{ij} refiriéndose a la cantidad de tierra que se le asignará a cada cultivo i en cada mes j . El objetivo del modelo es conocer cuánta tierra se le debe asignar a cada cultivo y que su

combinación produzca la mayor utilidad respetando restricciones de cantidad de tierra, cantidad de capital disponible, y los ciclos de rotación a través de la matriz binaria.

TABLA V
NOMENCLATURA DE VARIABLES

i	Cultivos según la rotación
j	Meses
X_{ij}	Cantidad de tierra a asignar por cultivo i en mes j
C_{ij}	Costos de producción (ha)
U_{ij}	Utilidades de producción (ha)
B_{ij}	Matriz binaria de ciclos de rotación
T	Cantidad de tierra disponible
M	Cantidad de capital disponible
K	Cantidad máxima de tierra a asignar por rotación

Fuente: Elaboración propia

Se elaboró un promedio para pronosticar las ganancias por hectárea para cada cultivo según los precios más bajos y altos en el mercado hondureño. Luego se procedió con una fórmula de valor futuro para los posibles ingresos de los siguientes cuatro años al igual que los costos. La Fundación Hondureña de Investigación Agrícola provee estos precios y costos actualizados cada mes.

Se definieron las variables i (1,2,3...28) para representar los cultivos, a pesar de que solo se estén utilizando 7 especies de plantas. Se prefirió elaborar la nomenclatura como cultivo separado a lo largo de las 4 propuestas por los siguientes motivos:

- No se utilizan los 7 cultivos en todas las rotaciones por lo que se extendería la cantidad de ecuaciones por las distintas sumatorias que el modelo necesitaría.
- Se utilizaron fórmulas de valor futuro para pronosticar precios y costos de los siguientes tres años. Los costos y utilidades de un cultivo $i=1$ no es el mismo en el mes $j=1$ o $j=14$
- Cada rotación se planteó de forma única para que sea beneficioso para los cultivos seleccionados, por lo que cada ciclo de cultivo es distinto. Por ejemplo, en una rotación puede que los más convenientes fuera plantar frijol en postrera y tardía (dos ciclos de frijol), pero que en la siguiente rotación el mismo cultivo (frijol) era más conveniente solo sembrar en la tardía.
- El modelo debe de respetar la cantidad de tierra disponible por mes. Las rotaciones son distintas porque se espera que las fincas tengan distintos ciclos de producción y mantener un flujo de dinero continuo durante el año. Si se hace de forma general y se elige la rotación 1, 3 y 4 cuando los ciclos de los cultivos se traslapan no puede tener más hectáreas asignadas que las disponibles y los ciclos se manejan por mes.

En la tabla 6 se presenta el diccionario de variables en donde se puede referir a cada cultivo i en la rotación que corresponde.

TABLA VI
DICCIONARIO DE VARIABLES i

Rotación	Cultivo	i	Rotación	Cultivo	i
Rotación 1	Frijol	1	Rotación 3	Chile	15
	Maiz	2		Tomate	16
	Chile	3		Papa	17
	Tomate	4		Patate	18
	Plátano	5		Maiz	19
	Papa	6		Frijol	20
	Patate	7		Platano	21
Rotación 2	Chile	8	Rotación 4	Frijol	22
	Tomate	9		Patate	23
	Papa	10		Maiz	24
	Patate	11		Frijol	25
	Maiz	12		Papa	26
	Frijol	13		Tomate	27
	Plátano	14		Chile	28

Fuente: Elaboración propia

b. Función objetivo y restricciones

En la ecuación (1) se hace referencia a la función objetivo en donde se busca maximizar utilidades según los valores de tierra que se le asignaran a cada rotación. Se hace uso de la matriz binaria para que pueda cancelar o escoger los cultivos si corresponden ser plantados.

En la ecuación (2) se presenta la restricción de tierra disponible pues por cada mes el modelo no puede asignar más tierra de la que la finca dispone independientemente de los cultivos que se escojan. La ecuación (3) es una restricción de cantidad de capital igual definida por mes ya que los gastos no deben exceder de la cantidad de dinero que la finca dispone.

$$Max = \sum_{i=1}^{28} \sum_{j=1}^{48} X_{ij} B_{ij} U_{ij} \quad (1)$$

FUNCIÓN OBJETIVO

Fuente: Elaboración propia

$$\sum_{i=1}^{28} \sum_{j=1}^{48} X_{ij} B_{ij} \leq T \quad (2)$$

RESTRICCIÓN DE TIERRA

Fuente: Elaboración propia

$$\sum_{i=1}^{28} \sum_{j=1}^{48} X_{ij} B_{ij} C_{ij} \leq M \quad (3)$$

RESTRICCIÓN DE CAPITAL DISPONIBLE

Fuente: Elaboración propia

En la ecuación (4) se restringe la cantidad de tierra a asignar por rotación y se estableció con un máximo de 0.25 ha por rotación. Se definió así ya que se recomienda que las hortalizas se manejen por parcelas y para tener diferentes ciclos activos en la finca para que las ganancias sean continuas

a lo largo del año. Se repite para las rotaciones 2 al 4 cambiando solo la variable i .

$$\sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^{48} X_{ij} B_{ij} \leq K \quad (4)$$

RESTRICCIÓN DE CANTIDAD DE TIERRA A ASIGNAR PARA ROTACIÓN 1
Fuente: Elaboración propia

En la ecuación (5) se restringe una igualdad en la cantidad de tierra a asignar, el objetivo de la rotación es que los cultivos involucrados hagan aportaciones para el siguiente cultivo a sembrar por lo que la cantidad de tierra debe ser la misma. De lo contrario se pierde el ciclo de aportación a la tierra así que en una parte del terreno estaría sin cosechar o se saltaría el método de rotación más beneficioso. Se repite para las rotaciones 2 al 4 cambiando solo la variable i .

$$\sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^{48} X_{ij} B_{ij} = \sum_{i=1}^1 \sum_{j=1}^1 X_{ij} B_{ij} \quad (5)$$

RESTRICCIÓN DE IGUALDAD DE TIERRA A ASIGNAR PARA ROTACIÓN 1
Fuente: Elaboración propia

c. Rotación de cultivos – Solver

Open Solver brindó el resultado óptimo según el modelo establecido. Solver concluyó con un calendario de rotación que consideró los posibles costos de cada cultivo ante los posibles ingresos y la forma en que estas variables interactúan con las cuatro distintas rotaciones a lo largo de cuatro años.

En la tabla 7 se muestran de forma resumida los resultados obtenidos. A la rotación 1,3,4 se asignó 0.25 ha y 0.01ha a la rotación 2. Por motivos prácticos la rotación 2 se considerará nula ya que no se puede plantar esa cantidad de terreno por el espacio que necesita cada cultivo. Esta asignación da una utilidad total de L.2,047,971.17 en los cuatro años de producción.

TABLA VII
RESULTADOS DE ASIGNACIÓN DE TIERRA (OPEN SOLVER)

Rotación	X_{ij}
Rotación 1	0.25
Rotación 2	0.01
Rotación 3	0.25
Rotación 4	0.25

Fuente: Elaboración propia

D. Validación del modelo

Después de obtener el resultado final del modelo matemático con la selección de cultivos en el calendario de rotación, Open Solver encontró una solución óptima que cumple con todas las restricciones. Sin embargo, se debe validar que la propuesta de rotación brinda un mejor beneficio que la estrategia actual de las fincas en Mata de Plátano, para eso se utilizó una tabla comparativa entre las posibles utilidades del método actual y el propuesto.

En la Fig. 1 se compara los beneficios económicos que brinda el modelo matemático ante las estrategias actuales de

las fincas. Se tomó como ejemplo la situación de una de las fincas y es muy similar a la del resto. Esta finca cultiva principalmente frijol, maíz, chile y café, para estimar los posibles ingresos se consideró que el café ya estaba en periodos de producción (es decir desde el año 4).

Por lo que se asignó 0.5 de ha al frijol y maíz, y 0.25 al chile y café, un total de 1.5 ha, se establece que se utilizan los mismos cultivos a lo largo de 4 años. A pesar de que el modelo matemático tiene solo 0.75 ha de producción, da un resultado de L.1,054,583.72 más que el método actual.

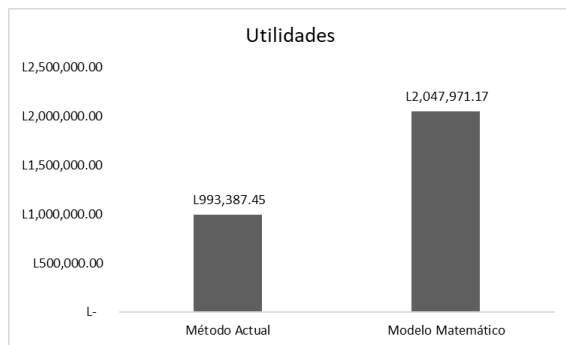


Fig. 1 Validación del modelo

Fuente: Elaboración propia

IV. CONCLUSIONES

1-. Se realizaron un total de 14 encuestas a las fincas en Mata de Plátano y a partir de esos hallazgos se definieron algunas restricciones para la construcción del modelo matemático. En esta zona todas las fincas practican agricultura familiar por lo que no deben pagar planilla, también, tienen acceso a vertientes de agua naturales y riegan por gravedad, estos dos factores disminuyen considerablemente los costos por hectárea.

Todas las fincas operan por conocimiento empírico sin ningún tipo de formación agrícola con limitaciones de terreno y capital por lo que obtienen bajo rendimiento de producción. Estas fincas tampoco utilizan insumos agrícolas ya que no tienen los recursos para adquirirlos.

El 35,7% de las fincas ha utilizado en algún momento fertilizantes orgánicos que se consideró importante por la apertura que podrán tener las fincas ante estrategias orgánicas. Por otro lado, ninguna finca practica rotación de cultivos. Y se obtuvo una lista de los cultivos sembrados en estas fincas.

2-. Los cultivos que se practican actualmente en las fincas en Mata de Plátano se utilizaron para la revisión documental. En total se integraron 7 cultivos en las propuestas de rotación, 6 de ellos seleccionados según las respuestas de las encuestas y se agregó el cultivo de papa ya que se necesita un cultivo de raíz para tener un mayor beneficio de la rotación.

Los cultivos se clasificaron según sus familias de especies con un total de 5 categorías ya que poseen propiedades, plagas y aportaciones de suelos similares, con esa agrupación se facilitó el orden de la rotación. Por último, se identificaron las

temporadas de siembra por lo que la rotación está sujeta a que no se repita de forma consecutiva la familia del cultivo por al menos dos años y se respetaron los meses de cuando debe ser sembrado.

3-. Se obtuvo un calendario de rotación de cultivos elaborado en Open Solver en donde se escogieron las rotaciones 1,3, y 4 y se le asignó $\frac{1}{4}$ de hectárea para cada rotación utilizando 0.75 ha del terreno total, a la rotación dos no se le asignó tierra y con una inversión inicial de L.10,000.00. A lo largo de 4 años se obtendría una ganancia total de L.2,047,971.17. El calendario resultó exitoso, respetando cada una de las restricciones establecidas en la investigación.

4-. Se validó el modelo matemático de Open Solver comparando las utilidades entre el método actual de la finca y el propuesto. El método actual tiene oportunidad de producir L.993,387.43 con 1.5 ha de producción, mientras que el método propuesto tiene de utilidades L.2,047,971.17 que representa un 52% más de utilidades en tan solo 0.75 ha de producción. Por lo que se pudo validar que el modelo funciona, sin embargo, podría tener un margen de error.

V. RECOMENDACIONES

A. Recomendaciones de investigación

1-. Para realizar las encuestas es necesario tener la ubicación de la muestra muy clara y marcada, como se trata de la población rural el investigador debe movilizarse a cada finca. Si el investigador no logra encontrar al administrador de cada finca es un atraso y se alarga la cantidad de días para recolectar datos y es información esencial para lograr continuar con la investigación.

2-. En la revisión documental priorizar investigaciones locales ya que se elaboran a partir de las condiciones de suelo y clima del país en donde se elabora la investigación. En el caso de Honduras la Fundación Hondureña de Investigación Agrícola tiene una amplia cantidad de manuales y fichas técnicas actualizadas hasta el 2022. También, elaborar una carpeta bibliográfica aparte solo con los recursos utilizados en la revisión documental ya que son varios.

3-. Al elaborar el modelo matemático asegurarse de tener toda la información necesaria de forma clara y ordenada para facilitar la construcción del modelo. Así mismo, se recomienda instalar Open Solver ya que será necesario si el modelo excede de 200 variables y 100 restricciones, a parte es mejor utilizarlo ya que se tiene más visibilidad con una clasificación de colores para diferenciar variables de decisión y restricciones.

B. Recomendaciones para el rubro

1-. Potenciar la educación agrícola y el conocimiento técnico en las zonas rurales del país. E implementar estrategias de fincas orgánicas ya que facilita el acceso a un mantenimiento de menor costo.

2-. Ayudar a los agricultores a acceder a mercados más competentes y capacitarlos para mercados urbanos o de

exportación. Asimismo, limitar intermediarios para colaborar con el desarrollo del rubro.

<https://idp.cimmyt.org/rotacion-de-cultivos-beneficios-directos-a-la-economia-de-los-productores/>
[14] Villeda, M., & Vásquez, P. (2017). Tercera Edición. Segunda reimpresión Tegucigalpa M.D.C. febrero 2017. 36.

V. EVOLUCIÓN DEL TRABAJO ACTUAL

La investigación realizada podría tener una evolución que complemente el trabajo para ayudar la producción y los ingresos económicos de las fincas en Mata de Plátano. En una segunda fase se podría implementar una línea investigación completamente distinta como diseño de experimentos en cultivos por hidroponía.

Se conoce que en Mata de Plátano las fincas tienen limitaciones en terreno, recursos y formación. Por lo que se podría experimentar la calidad de la producción de los cultivos a través de hidroponía con estructuras artesanales ya que no tendrían el capital para financiar un proyecto muy sofisticado y costoso.

Con este método podrían tener muchas más unidades de plantas en pocos metros cuadrados y se necesitaría menos cantidad de agua. Además, facilita el mantenimiento y control ya que los cultivos no se plantan de forma extensiva si no que en bloques de forma vertical.

En el experimento se compararían los resultados con un método tradicional de cultivo en parcelas y ver si realmente cultivos hidropónicos con estructuras artesanales cumplen con los estándares de calidad como un cultivo sembrado en tierra y así acceder a mercados competentes.

REFERENCIAS

- [1] Banco Mundial. (2022, April 1). Agricultura y alimentos. World Bank. <https://www.bancomundial.org/es/topic/agriculture/overview>
- [2] Boirivant, J. A. (2009). La programación lineal aplicación de la pequeñas y medianas empresas. Reflexiones, 88(1), 4.
- [3] Cherlynka, V. (2020). Tipos De Cultivos Agrícolas: Elegir Bien Maximiza El Beneficio.
- [4] Cubas Hernández, F. (2007). Rotación de cultivos. 3.
- [5] Derlagen, C., De Salvo, C. P., Egas Yerovi, J. J., & Pierre, G. (2019). Análisis de políticas agropecuarias en Honduras. Inter-American Development Bank. <https://doi.org/10.18235/0002274>
- [6] Dufour, R. (2015). Hoja de Datos: Rotación de Cultivos en Sistemas Agrícolas Orgánicos. 4.
- [7] FHIA. (2022). Reporte Diario de Precios. http://fhia.org.hn/descargas/simpah/1.3.reporte_diario_precios_frutas_zon_al_belen.pdf
- [8] Guillermina Baena Paz. (2017). Metodología de la Investigación (3era edición).
- [9] IFAD. (2020). República de Honduras Programa sobre Oportunidades Estratégicas Nacionales (2020-2025). IFAD. <https://www.ifad.org/en/-/rep%C3%BAblica-de-honduras-programa-sobre-oportunidades-estrat%C3%A9gicas-nacionales-2020-2025->
- [10] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2012). La agricultura de América Latina ante desaceleración económica | Agro noticias: Actualidad agropecuaria de América Latina y el Caribe | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/in-action/agronoticias/detail/es/c/510886/>
- [11] Roberto Hernández Sampieri, Carlos Fernández Collado, & Pilar Baptista Lucio. (2014). Metodología de la investigación (6ta edición). McGraw Hill Education.
- [12] Secretaría de agricultura y ganadería. (2019). Guía práctica cultivo de frijol. 1.
- [13] Simon Fonteyne & Nele Verhulst. (2019). Rotación de cultivos: Beneficios directos a la economía de los productores – CIMMYT | IDP.