

Mejoramiento del uso de suelo en la agricultura mediante herramientas basadas en optimización

Improving land use in agriculture through optimization-based tools

Edgar Castillo¹, Oliver Delgado¹, Humberto De León¹, Luis Escartin¹, Yessica Saéz^{2,3}, Edwin Collado^{2,3*}
1Licenciatura en Ingeniería Electromecánica – Centro Regional de Azuero – Universidad Tecnológica de Panamá
2 Facultad de Ingeniería Eléctrica – Centro Regional de Azuero – Universidad Tecnológica de Panamá
3Centro de Estudios Multidisciplinario en Ciencias, Ingeniería, Tecnología–AIP (CEMCIT–AIP), Panamá

*Autor de correspondencia: edwin.collado@utp.ac.pa

RESUMEN– El uso adecuado de los recursos naturales en la agricultura representa hoy en día uno de los aspectos más importantes directamente relacionados con la seguridad alimentaria a nivel mundial. De esta necesidad surge la idea del uso de herramientas tecnológicas que permitan al productor utilizar de una manera eficiente los suelos agrícolas. Este trabajo propone el desarrollo de una herramienta basada en optimización para garantizar el uso adecuado del suelo, mientras se maximiza la ganancia del sistema de producción de alimentos. Específicamente, se considera un problema de optimización de programación lineal, donde se toman en cuenta variables tales como costo de inversión/costo por hectárea, capital inicial de inversión, área de siembra disponible, área sembrada de cada producto, y la ganancia neta por hectárea de cada producto. Los resultados obtenidos muestran que la herramienta propuesta alcanza un margen de ganancia mayor si se compara con la siembra empírica, utilizando siempre de manera eficiente el área de producción.

Palabras clave– Agricultura inteligente, manejo de suelo, Método Simplex, programación lineal, sistemas basados en optimización.

ABSTRACT– The proper use of natural resources in agriculture represents one of the most important aspects that are directly related to food security worldwide. From this need arises the idea of using technological tools that allow the producer to use agricultural soils efficiently. This work proposes the development of a tool based on optimization to guarantee the adequate use of the soil, while maximizing profits from the food production system. Specifically, a linear programming optimization problem is considered, where variables such as investment cost or cost per hectare, initial investment capital, available planting area, planted area of each product, and net profit per hectare of each product. The results obtained show that the proposed tool achieves a higher profit margin as opposed to using the seed empirically, always using the production area efficiently.

Keywords– Smart agriculture, soil management, Simplex method, linear programming, optimization-based systems.

1. Introducción

El cambio climático ha impactado de manera negativa al sector agropecuario en los últimos años, causando una reducción considerable de la producción de alimentos debido a afectaciones en el medio ambiente [1], [2]. Las variaciones no deseadas en los parámetros ambientales pueden impactar negativamente la seguridad alimentaria, las inversiones, la localización de los cultivos y actividades productivas y las familias que dependen de estas actividades [3].

En los últimos años, Panamá y otros países de la región Latinoamericana como Costa Rica, Nicaragua, Honduras y El Salvador, han presentado índices de producción y cosecha cada vez más bajos debido a problemas climáticos y el mal uso de recursos naturales, a pesar de que gran parte de sus territorios cuentan con características ambientales, hídricas y de suelo apropiadas para la producción agrícola [4]. Por ello, se ha impulsado el desarrollo de herramientas tecnológicas que ayuden a reducir los efectos del cambio climático,

Citación: E. Castillo, O. Delgado, H. De León, L. Escartin, Y. Saéz y E. Collado, “Mejoramiento del uso del suelo en la agricultura mediante herramientas basada en optimización”, *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 17, no. 2, pp. (no modificar), 2021.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 15 de septiembre de 2020. **Recibido con correcciones:** 18 de septiembre de 2020. **Aceptado:** 12 de enero de 2021.

DOI:

Copyright: 2021 E. Castillo, O. Delgado, H. De León, L. Escartin, Y. Saéz y E. Collado. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

mejorar producción de alimentos y reducir los costos de insumos y mano de obra y a una mejor toma de decisiones.

Ya que el suelo representa un recurso natural crucial para un sistema de cultivo al proporcionar el ecosistema necesario para la producción de alimentos saludables, se han hecho esfuerzos para adoptar medidas de adaptación al manejo de tierras agrícolas y así apoyar al agricultor a sacarle el mejor provecho a sus recursos e inversiones. Por ejemplo, los autores en [5] proponen un mecanismo para cuantificar el uso desproporcionado del suelo con el objetivo de ayudar a los encargados de formular políticas a optimizar las decisiones de gestión cuando se enfrentan a demandas de múltiples servicios bajo disponibilidad limitada de la tierra. En [6] los autores desarrollan un modelo basado en optimización lineal para la asignación óptima de recursos de tierra y agua con el fin de maximizar los retornos anuales netos de un área ubicada en el estado de Haryana de India. Los autores en [7] estudian un enfoque basado en optimización multiobjetivo para gestionar eficientemente las tierras agrícolas, mientras se reduce efectos de cambio climático. En el trabajo presentado en [8], los autores estudian distintas técnicas existentes para la selección de variables en el manejo de suelos agrícolas. Ellos también proponen un nuevo enfoque de selección variable, denominado MPCA-SC, basado en el uso combinado de la estadística de autocorrelación espacial bivariada de Moran y MULTISPATI-PCA.

Como se observa, se han propuesto varias técnicas de optimización para el cálculo de la asignación óptima del uso de la tierra dentro de un área. Sin embargo, la mayoría de estas técnicas están destinadas a seleccionar sitios óptimos para el uso de la tierra dentro de un área. Muchas de las aplicaciones mencionadas anteriormente se han relacionado con el uso de modelos de programación lineal, que han sido eficaces para ciertos tipos de problemas. Sin embargo, las tendencias recientes en la planificación del uso de la tierra han creado la necesidad de desarrollar diferentes tipos de algoritmos.

Bajo el enfoque de que las partes interesadas buscan respuestas inmediatas a sus aportes, para poder realizar ajustes de rapidez en sus planes, el presente trabajo propone una herramienta tecnológica basada en optimización para planificar el uso adecuado del suelo disponible, mientras se maximiza la ganancia del sistema de producción de alimentos. Esta herramienta está basada

en la programación lineal [9], considerando variables importantes como los costos de producción por productos, tiempos de siembras y cosecha de cada producto, capital inicial de inversión y cantidad de veces que se siembran en un año. El objetivo de este trabajo es desarrollar una herramienta que ayude a los productores a realizar una elección apropiada de los productos a sembrar, el porcentaje del área para esta siembra y los tiempos de producción de cada producto, permitiendo obtener mayores ganancias de su terreno disponible.

El resto de este trabajo está organizado de la siguiente manera. La sección 2 describe el modelo conceptual del sistema y la formulación del problema de optimización. La sección 3 muestra el escenario de estudio planteado para validar la herramienta basada en optimización propuesta para el manejo de suelos agrícolas. La sección 4 ilustra, a través de simulaciones, la funcionalidad y los beneficios del sistema propuesto y también se presenta un resumen de los resultados junto con importantes iniciativas de investigación que se considerarán en el futuro.

2. Formulación del Problema

El uso inadecuado de los suelos se debe principalmente al desconocimiento de las características del terreno y la falta de información sobre el mercado. Entre los problemas más comunes que se pueden encontrar está que los terrenos no son aprovechados adecuadamente porque se utilizan para sembrar un solo tipo de producto durante todo el año, quedando libre parte del terreno en distintos periodos. Por este motivo, el objetivo de la herramienta propuesta es maximizar la ganancia del sistema de producción al optimizar el uso del suelo agrícola, buscando siempre la compatibilidad de diferentes cultivos que pudiesen ser sembrados simultáneamente o en diferentes épocas del año. De esta manera el productor podría escoger entre las opciones de sembrar cierto producto en su totalidad en todo el terreno o varios productos al mismo tiempo para aprovechar el suelo al máximo, siempre respetando las restricciones impuestas en el problema de optimización.

Con esto se busca brindar una solución tecnológica que permita mejorar los sistemas de producción de alimentos al considerar desde un inicio parámetros importantes como la ganancia neta por hectárea de cada producto, el costo para producir una hectárea del producto, que depende mayormente de la tecnología

utilizada, variar factores como la cantidad de hectáreas disponibles y el capital inicial con el que se cuenta para iniciar el proyecto.

La figura 1 muestra un modelo conceptual de la herramienta propuesta en este trabajo.



Figura 1. Modelo conceptual del sistema de manejo óptimo de suelo agrícola.

Desde un inicio, el productor cuenta un acceso a información en tiempo real sobre la ganancia neta por hectárea de cada producto, el costo para producir una hectárea del producto, que depende mayormente de la tecnología utilizada, la cantidad de hectáreas disponibles, el capital inicial con el que se cuenta para el proyecto y el tipo de producto que desea producir. Con toda esta información, el productor ingresa los datos al sistema, el cual calcula, de manera rápida y eficiente, el porcentaje de suelo que debe utilizarse para cada producto durante el tiempo estipulado por el usuario. Con esto se busca brindar una solución tecnológica que permita mejorar los sistemas de producción de alimentos al considerar desde un inicio parámetros muy importantes que normalmente no son tomados en cuenta.

El sistema mencionado está diseñado basado en herramientas de optimización. Específicamente, se trata de un problema de optimización de programación lineal para optimizar el uso del suelo en sistemas de producción, mientras se maximiza su ganancia está dado por:

$$\text{Maximizar } \sum_{i=1}^N \alpha_i x_i \quad (1)$$

sujeito a:

$$\sum_{i=1}^N x_i \leq K_{\max} A_{\text{total}} \quad (1.1)$$

$$K_{\min} A_{\text{total}} \leq \sum_{i=1}^N x_i \quad (1.2)$$

$$\sum_{i=1}^N c_i x_i \leq C_{\text{total}} \quad (1.3)$$

$$0 \leq x_i \leq k_i A_{\text{total}} \quad (1.4)$$

donde:

α_i es la ganancia neta por hectárea de cada producto i .

x_i es la cantidad de suelo agrícola asignada a cada producto i .

K_{\max} es la cantidad máxima que puede utilizarse el área total de siembra durante un año.

A_{total} es el área total para la siembra durante un año.

K_{\min} es la cantidad mínima que puede utilizarse el área total de siembra durante un año.

c_i es el costo para producir una hectárea del producto i .

k_i es la cantidad que puede ser sembrado el producto i durante un año en el terreno.

C_{total} es el costo estimado al inicio del periodo.

La idea en este problema (1) es maximizar la ganancia neta total al producir todos los alimentos en el suelo disponible, mientras se satisfacen las restricciones (1.1) donde la cantidad de suelo asignado no sobrepase la cantidad total de suelo disponible durante todo el periodo, (1.2) donde la cantidad de suelo asignado sea al menos un porcentaje dado de la cantidad total de suelo disponible durante todo el periodo, (1.3) donde el costo total de producción no sobrepase el costo estimado al inicio del periodo de siempre y (1.4) donde la cantidad de suelo asignado a cada producto no sobrepase la cantidad máxima necesaria durante todo el periodo.

3. Escenario de estudio

Después definir el problema de optimización para el manejo adecuado de suelos agrícolas, el siguiente paso corresponde a la creación de un escenario basándonos en datos de producción reales. Para ello, se utilizó información brindada por la plataforma del Ministerio de Desarrollo Agropecuario de Panamá (MIDA) [10], en

donde se pueden recopilar datos acerca de los tiempos de cultivo, la inversión inicial y las ganancias netas de distintos productos, entre otros. Los valores de las variables de ganancias netas e inversiones iniciales cambian constantemente, ya que dependen de la economía del momento y de las diversas formas de producir y cosechar los productos.

Como es de esperarse podemos encontrar una gran cantidad de escenarios distintos al modificar las distintas variables que conforman el problema (1). Por simplicidad, en este trabajo se realizó una investigación cuidadosa para seleccionar los productos más representativos en Panamá y así validar el funcionamiento de la herramienta propuesta. Se seleccionaron productos de siembra básicos en la región de Azuero de Panamá, la cual es una de las de mayor producción agrícola de este país. Estos productos fueron el arroz, maíz, sorgo, y frijol. Una vez se definieron los productos, se procedió a identificar los tiempos de siembra y cosecha los mismos. Para ello, el estudio consideró la información de la Dirección Nacional de Agricultura del MIDA [10] que se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Calendario de siembra y cosecha de rubros agrícolas [10].

Rubo	Meses de siembra	Meses de cosecha
Arroz	Periodo I: abril y mayo Periodo II: junio, julio y agosto	Periodo I: agosto, septiembre, octubre Periodo II: noviembre, diciembre y enero
Maíz	Periodo I: mayo y junio Periodo II: agosto y septiembre	Periodo I: julio, agosto y septiembre Periodo II: diciembre, enero y febrero
Sorgo	septiembre, octubre y noviembre	enero, febrero y marzo
Frijol	Periodo I: abril, mayo y junio Periodo II: octubre y noviembre	Periodo I: julio, agosto y septiembre Periodo II: diciembre y enero

De esta información se pudo obtener comportamientos interesantes acerca de los tiempos de siembra y cultivo en Panamá para los productos en estudio. Como se observa, el arroz solo puede ser sembrado una vez al año, ya que ambos periodos de siembra de arroz no pueden ejecutarse simultáneamente en un solo terreno.

El sorgo es otro producto que solo puede producirse una vez al año debido a sus requerimientos de siembra y cosecha. Por el contrario, el maíz y el frijol son productos que pueden producirse dos veces al año si se programan adecuadamente las actividades de siembra y cosecha. De igual forma, también es importante considerar la compatibilidad que existe entre distintos productos para ser sembradas al mismo tiempo utilizando parte de área total disponible.

Para las variables de inversión inicial y ganancia neta por hectárea también se utilizaron datos proporcionados por MIDA [11]. El costo de producir una hectárea de algunos de estos productos varía según el método utilizado, los cuales pueden ser: método convencional con semilla importada, método convencional con semilla nacional, método convencional con semilla certificada, cero labranzas, mecanizado en seco, mecanizado con riego etc. La tabla 2 muestra un resumen, de los diferentes productos en base al método de producción empleado, de su ingreso por hectárea y su costo de producción por hectárea.

Tabla 2. Costo de producción e ingresos utilizando distintos métodos de siembra y cosecha [11]

Método de producción	Valor de producción por hectárea (\$)	Costo de producción por hectárea (\$)
Arroz		
Mecanizado en seco	392	2249
Mecanizado con riego	820	2468
Mecanizado con mina labranza	682	1904
Chuzo con tecnología	531	1000
Maíz		
Convencional Semilla Importada	357	1737
Convencional Semilla Nacional	334	1353
Convencional Semilla Certificada	205	1439
Cero Labranza Semilla Imp	358	1412
Frijol		
Aproximado	300	1000
Sorgo		
Aproximado	400	1500

En el caso del sorgo y el frijol se utilizaron valores promedios definidos por algunos productores, puesto que el MIDA no contaba con dicha información.

Por último, se definió el capital inicial con el que cuenta el productor, la cuál es una variable que depende únicamente del estado inicial del productor.

4. Simulación y resultados

Considerando la información presentada en las tablas 1 y 2, se propone el siguiente escenario para estudiar el rendimiento de la herramienta de manejo de suelo agrícola propuesta.

- Producto 1: Arroz
- Producto 2: Maíz
- Producto 3: Frijol
- Producto 4: Sorgo

Por lo tanto, el problema de optimización de programación lineal quedó planteado de la siguiente manera:

$$\text{Maximizar } \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3 + \alpha_4 x_4 \quad (2)$$

$\{x_1, x_2, x_3, x_4\}$

sujeto a:

$$0.75 A_{\text{total}} \leq x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \leq A_{\text{total}} \quad (2.1)$$

$$c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3 + c_4 x_4 \leq C_{\text{total}} \quad (2.2)$$

$$0 \leq x_1 \leq A_{\text{total}} \quad (2.3)$$

$$0 \leq x_2 \leq 0.5 A_{\text{total}} \quad (2.4)$$

$$0 \leq x_3 \leq A_{\text{total}} \quad (2.5)$$

$$0 \leq x_4 \leq 0.75 A_{\text{total}} \quad (2.6)$$

donde las variables α_i , c_i , A_{total} y C_{total} varían dependiendo el caso estudiado.

La simulación y análisis del problema propuesto en la sección anterior fue desarrollado utilizando la herramienta CVX, la cuál es un sistema de modelado basado en MATLAB para la optimización convexa. CVX convierte a MATLAB en un lenguaje de modelado, lo que permite especificar restricciones y objetivos utilizando la sintaxis de expresión estándar de MATLAB [12], [13].

En la tabla 3 se presentan varios escenarios considerados en este trabajo, obtenidos al variar la ganancia neta y la inversión por hectárea, donde se mantiene como

constante $K_{\text{min}} = 0.75$, $K_{\text{max}} = 1$, $A_{\text{total}} = 100$ hectáreas y $C_{\text{total}} = \$100,000.00$. Los datos observados se obtuvieron variando los parámetros presentados en las tablas 1 y 2.

Tabla 3. Escenarios para la producción de arroz, maíz, frijol y sorgo.

Producto	Ganancia neta por hectárea (\$/Ha)	Inversión por hectárea (\$/Ha)
Escenario 1		
Arroz	531	1300
Maíz	350	1312
Frijol	350	1200
Sorgo	400	1400
Escenario 2		
Arroz	350	1300
Maíz	350	1312
Frijol	350	1200
Sorgo	350	1400
Escenario 3		
Arroz	531	1250
Maíz	380	1250
Frijol	350	1250
Sorgo	400	1250
Escenario 4		
Arroz	350	1250
Maíz	350	1250
Frijol	350	1250
Sorgo	350	1250

La figura 2 muestra el resultado de la distribución óptima del suelo agrícola en el Escenario 1.

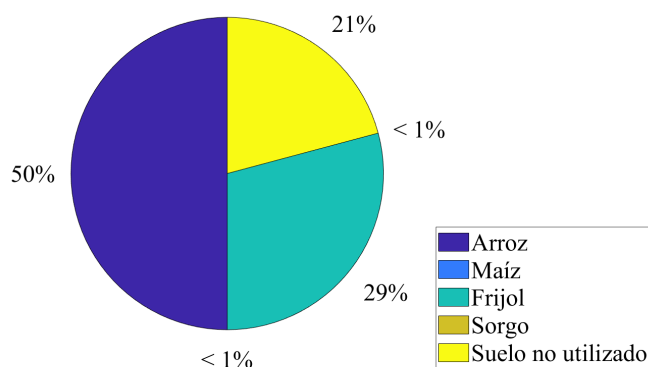


Figura 2. Gráfico de la distribución óptima del suelo agrícola en el Escenario 1 con datos de ganancia neta e inversión por hectárea aleatorios.

Se puede observar para el caso donde la ganancia neta y la inversión por hectárea son dinámicos, según datos reales del mercado productivo panameño, el sistema propuesto selecciona la mayor cantidad de suelo para los productos que presenta mayor ganancia y menor inversión por hectárea. En este escenario, el sistema asigna del área total de producción un 50% al arroz y un 29% al frijol, mientras que asigna un 21% de suelo para no ser utilizado. Esto garantiza que se obtenga la máxima ganancia para los datos considerados.

En la figura 3 se muestra el resultado de la distribución óptima del suelo agrícola en el Escenario 2. En este caso se considera una ganancia neta por hectárea uniforme para todos los productos y unos datos de inversión por hectárea son dinámicos. Para este escenario nuevamente el sistema decide producir solamente arroz y frijol, con la diferencia de que ahora la distribución del área total de producción es de 50% para el frijol y 31% para el arroz, dejando sin utilizar aproximadamente 19% del suelo. Con esto se puede observar que para este caso el sistema decide asignar el porcentaje del suelo en base a inversión por hectárea, el cual es el único dato variable.

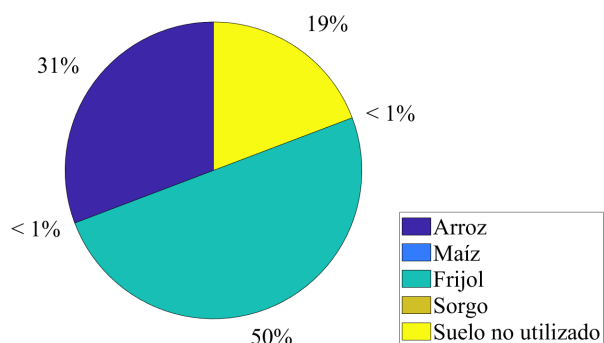


Figura 3. Gráfico de la distribución óptima del suelo agrícola en el Escenario 2 con ganancia neta por hectárea uniforme e inversión por hectárea dinámica.

En el escenario 3 se estudia el comportamiento del sistema cuando la ganancia neta por hectárea es dinámica según el mercado y la inversión por hectárea es uniforme para todos los productos. Como se observa en la figura 4, el sistema decide producir solamente arroz y sorgo, los cuales son los productos con mayor ganancia por hectárea. Específicamente, del área total se asignan 50% para el arroz y 30% para el sorgo, dejando sin utilizar aproximadamente 20% del suelo. A diferencia del escenario anterior, el sistema decide asignar el porcentaje

del suelo en base a la ganancia neta por hectárea, el cual es el único dato variable.

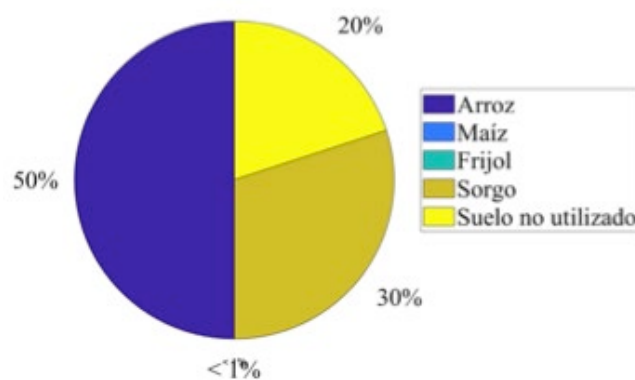


Figura 4. Gráfico de la distribución óptima del suelo agrícola en el Escenario 3 con ganancia neta por hectárea dinámica e inversión por hectárea uniforme.

En la figura 5 se presentan los resultados del escenario 4, donde ambos la ganancia neta por hectárea e inversión por hectárea son uniformes. Como se observa en la figura, para este caso el sistema decide producir los cuatro productos, asignando 12% al arroz, 28% al maíz, 12% a frijol y 28% al sorgo, dejando sin utilizar aproximadamente 20% del área total de producción. Al ser uniformes la ganancia neta por hectárea y la inversión por hectárea, el sistema decide la asignación del porcentaje de suelo en base a la cantidad que puede ser sembrado cada producto durante el periodo de producción en el terreno.

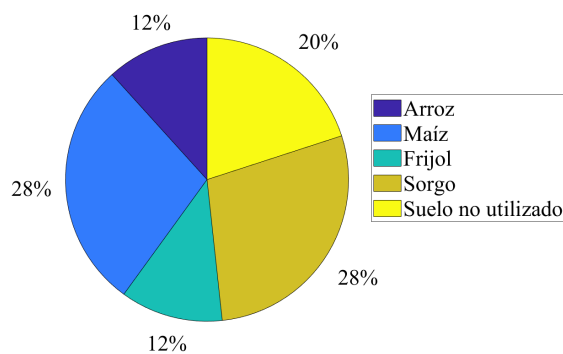


Figura 5. Gráfico de la distribución óptima del suelo agrícola en el Escenario 4 con ganancia neta por hectárea uniforme e inversión por hectárea dinámica.

Por último, la figura 6 muestra la ganancia máxima obtenida para cada escenario, donde se observa que el máximo valor fue obtenido cuando la ganancia neta por

hectárea es dinámica y la inversión por hectárea es uniforme. Es importante mencionar que la diferencia con respecto a los otros escenarios no fue muy representativa, lo cual permite brindar una flexibilidad al productor para variar escenarios según las necesidades que se presenten.

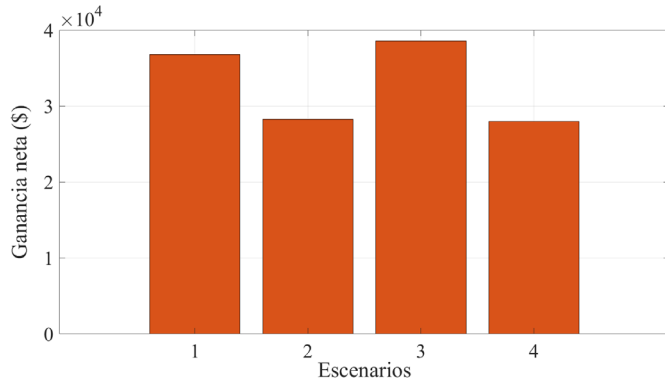


Figura 6. Ganancia máxima obtenida para cada escenario planeados y realizados.

5. Conclusiones

Las actividades agrícolas en muchas partes del mundo se realizan utilizando métodos tradicionales y empíricos, principalmente debido a la falta de tecnologías aplicadas en este sector. El uso de soluciones tecnológicas para la distribución adecuada de suelos a la hora de producir alimentos está tomando cada vez más interés, tanto por el sector agrícola como el sector de ciencia y tecnología. En este trabajo se propuso un sistema basado en optimización de programación lineal para mejorar el uso del suelo agrícola disponible, considerando siempre la ganancia neta y la inversión requerida de cada producto. Los resultados presentados demuestran que el sistema propuesto distribuye adecuadamente la utilización del suelo para distintos escenarios estudiados, garantizando siempre obtener la mayor ganancia y utilizar la mayor cantidad de terreno posible.

Sin duda la herramienta propuesta en este trabajo ayudará al productor a utilizar mejor el suelo disponible, garantizando siempre obtener la mayor ganancia posible. Una de sus principales ventajas es que es un sistema programable que permite variar distintos parámetros presentes en todo proceso de producción de alimentos sin importar el número de productos.

Como trabajo futuro se está trabajando en incluir más variables al problema de optimización para hacer que este se ajuste lo mejor posible a las necesidades reales de los productores de alimentos.

AGRADECIMIENTOS

Autor 6 y Autor 1 reconocen el apoyo del Sistema Nacional de Investigación (SNI) de Panamá al proporcionar financiamiento parcial para la publicación de este manuscrito a través de los contratos por subsidios económicos No. 200-2017 y No. 82-2019, respectivamente.

REFERENCIAS

- [1] M. A. Altieri y C. I. Nicholls, «Cambio climático y agricultura campesina: impactos y respuestas adaptativas,» *LEISA revista de agroecología*, vol. 14, pp. 5-8, 2009.
- [2] G. Nelson, J. Koo, R. Robertson, T. Sulser, T. Zhu, C. Ringler, S. Msangi y e. al., «Cambio climático: el impacto en la agricultura y los costos de adaptación. Política alimentaria. Informe,» Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias, Washington, EUA, 2009.
- [3] A. G. Rodríguez, T. T. López, L. E. Meza y A. M. Loboguerrero, «Innovaciones institucionales y en políticas sobre agricultura y cambio climático: evidencia en América Latina y el Caribe,» Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Santiago, Chile, 2015.
- [4] E. Collado, A. Fossatti y Y. Sáez, «Smart farming: A potential solution towards a modern and sustainable agriculture in Panama,» *AIMS Agriculture and Food*, vol. 4, n° 2, pp. 266-284, 2018.
- [5] H. Setälä, R. D. Bardgett, K. Birkhofer, M. Brady, L. Byrne, P. D. Rüter, F. D. Vries, C. Gardi, K. Hedlund, L. H. L y S. Hotes, «Urban and agricultural soils: conflicts and trade-offs in the optimization of ecosystem services,» *Urban ecosystems*, vol. 17, n° 1, pp. 239-253, 2014.
- [6] A. S. Panda y S. Nath, «Development and application of an optimization model for the maximization of net agricultural return,» *Agricultural water management*, vol. 115, pp. 267-275, 2012.
- [7] T. Klein, A. Holzkämper, P. Calanca, R. Seppelt y J. Fuhrer, «Adapting agricultural land management to climate change: a regional multi-objective optimization approach,» *Landscape ecology*, vol. 28, n° 10, pp. 2029-2047, 2013.
- [8] A. Gavioli, E. d. Souza, C. Bazzi, L. C. Guedes y K. Schenatto, «Optimization of management zone delineation by using spatial principal components,» *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 127, pp. 302-310, 2016.
- [9] S. Boyd, S. Boyd y L. Vanderberghe, *Convex Optimization*, Cambridge university press, 2004.
- [10] Ministerio de Desarrollo Agropecuario (MIDA) de Panamá, «Calendario,» [En línea]. Available: <https://www.mida.gob.pa/upload/documentos/calendariosiembra%5B1%5D.pdf>. [Último acceso: 13 Marzo 2020].

- [11] Dirección de Agricultura, «Ministerio de Desarrollo Agropecuario de Panamá,» 2018. [En línea]. Available: https://www.mida.gob.pa/direcciones/direcciones_nacionales/direcci-n-de-agricultura/costos-de-producci-n-2018.html. [Último acceso: 23 04 2020].
- [12] S. Boyd y Y. Y. Michael Grant, «Disciplined convex programming,» de *Global Optimization*, Bosto, MA, Springer, 2006, pp. 155-210.
- [13] M. Grant, S. Boyd y Y. Ye, «CVX: Matlab Software for Disciplined Convex Programming,» 2009. [En línea].