

Modelo de optimización económica para la planificación de la producción y del uso del agua de riego en la agricultura urbana

Economic optimization model for planning production and use of irrigation water in urban agriculture

Yaité Pérez Mayedo¹ (yaitepm@ult.edu.cu) (<https://orcid.org/0000-0002-1979-2947>)

Maylié Almeida González² (maylie.almeidag@ug.edu.ec) (<https://orcid.org/0000-0002-8524-1908>)

Eloy González Acosta³ (eloy.gonzaleza@ug.edu.ec) (<https://orcid.org/0000-0002-6715-2741>)

Resumen

Se propone un modelo de optimización económica para la planificación de la producción (a partir del uso óptimo del agua de riego) en unidades de agricultura urbana. El modelo está sustentado en el uso de la simulación Montecarlo para la determinación de las necesidades de riego de los cultivos en la zona, para tres escenarios diferentes (año seco, medio y húmedo) y en la utilización de la Programación Lineal para la determinación de las alternativas de cultivos óptimas en el período. Se concluye con la toma de decisión en ambiente de riesgo y la elaboración de un plan agregado de producción. Es un modelo novedoso, por la inclusión de técnicas poco utilizadas en el país para la planificación de la producción, el ajuste a las condiciones particulares de la zona de estudio, la inserción en el análisis del costo del agua y el propósito de encontrar las alternativas de cultivos que maximicen la utilidad económica obtenida por metro cúbico de agua utilizado. El modelo fue sometido a criterio de expertos y calificado como Muy Relevante. También se aplicó parcialmente en la Unidad “El Tunerito” de la ciudad de Las Tunas, para la planificación de la producción del período septiembre-diciembre de 2019, donde se obtuvo una diferencia con respecto a la planificación tradicional de incremento de ganancia en \$6368,00 y de disminución del consumo de agua en 48m³.

Palabras claves: planificación de la producción, optimización, uso del agua de riego, programación lineal, simulación.

¹ Máster en Contabilidad Gerencial y Máster en Ingeniería Industrial. Profesora Auxiliar. Departamento de Ingeniería Industrial. Facultad de Ciencias Técnicas y Agropecuarias. Universidad de Las Tunas. Cuba.

² Máster en Contabilidad Gerencial. Docente investigadora. Carrera Contabilidad y Auditoría. Facultad de Ciencias Administrativas. Universidad de Guayaquil. Ecuador.

³ Máster en Contabilidad Gerencial. Docente investigador. Carrera Contabilidad y Auditoría. Facultad de Ciencias Administrativas. Universidad de Guayaquil. Ecuador.

Abstract

An economic optimization model is proposed for production planning (based on optimal use of irrigation water) in urban agricultural units. The model is based on the use of the Monte Carlo simulation to determine the irrigation needs of the crops in the area, for three different scenarios (dry, medium and wet year) and on the use of the Linear Programming to determine the alternatives of optimal crops in the period. It is concluded with the decision making in risk environment and the elaboration of an aggregated production plan. It is a novel model, due to the inclusion of techniques little used in the country for the production planning, the adjustment to the particular conditions of the study area, the insertion in the analysis of water cost and the purpose of finding the alternatives of crops that maximize the economic utility obtained by cubic meter of water used. The model was submitted to expert criteria and qualified as Very Relevant. It was also partially applied in the Unit "El Tunerito" of the city of Las Tunas, for the planning of the production of the period September-December 2019, where a difference was obtained with respect to the traditional planning of increase of profit in \$6368.00 and decrease of the water consumption in 48m³.

Key words: production planning, optimization, irrigation water use, linear programming, simulation.

Proceso de planificación productiva en el contexto actual

Según diagnósticos de la Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura (FAO):

La excepcional demanda de alimentos que se proyecta para las próximas décadas, debido al crecimiento de la población mundial y al cambio previsto en los patrones de consumo, deberá hacer frente a oportunidades muy limitadas para la expansión de las tierras agrícolas y la disponibilidad finita de recursos hídricos, lo cual representa una amenaza para la seguridad alimentaria. (Steduto, Hsiao, Fereres y Raes, 2012, p. 1)

En este contexto, la actualización del modelo económico cubano prioriza encontrar nuevas vías para una mayor eficiencia en la producción de alimentos, a partir del desarrollo de una agricultura sostenible con una gestión integrada de ciencia, tecnología y medio ambiente, como se ha expresado en los Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución, aprobados en el VII Congreso del PCC en el 2016 (PCC, 2017).

Una de las medidas tomadas a tal efecto es precisamente: "continuar desarrollando el programa de autoabastecimiento alimentario municipal, apoyándose en la agricultura urbana y suburbana, aprovechando los recursos locales" (PCC, 2017, p. 31).

Sin embargo, informes recientes del Ministerio de la Agricultura en Las Tunas, (Cuba. MINAGRI, 2017) destacan la necesidad de elevar la eficiencia en el proceso de planificación productiva en las casas de cultivo semiprotegido y organopónicos de la capital provincial, lo cual ha sido corroborado mediante un diagnóstico realizado en el

año 2018 por los autores de la presente investigación, donde se detectaron, entre otras insuficiencias:

- Limitaciones en las condiciones de programación que le permitan a los decisores trabajar anticipadamente en la planificación del proceso productivo.
- Incumplimiento reiterado de planes productivos.
- La política de decisión que optimice la asignación de los recursos es limitada.
- Deficiencias en el sistema de contabilidad del agua para determinar cuánta se usa y con cuánta eficacia (en términos físicos y económicos).

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto se determinó como objetivo del presente artículo presentar un modelo de optimización económica que contribuya al perfeccionamiento de la planificación de la producción y del uso del agua de riego en áreas de agricultura urbana del municipio Las Tunas.

Modelo de optimización económica para la planificación de la producción y del uso del agua de riego en la agricultura urbana

Para cumplir el propósito del presente artículo, declarado anteriormente, se determinaron las alternativas de cultivos y las láminas de riego que dan lugar a las máximas utilidades, se optimizó la utilización de los recursos disponibles y se elaboró el plan agregado de producción más asequible para la unidad.

El modelo que se propone está conformado por cinco etapas, las cuales se explican a continuación.

Etapas 1. Caracterización de la unidad suelo-clima-cultivo-factores técnico-económicos

La primera etapa tiene como propósito recopilar la información de partida necesaria del área objeto de estudio para la aplicación de los modelos subsecuentes y con ello, caracterizar la unidad suelo-clima-cultivo-factores técnico-económicos. De la veracidad y pertinencia de estos datos depende la eficiencia de los resultados del modelo propuesto. Además, se detallan cuestiones tan importantes como la forma y las condiciones de producción, el tamaño de la unidad, la cantidad de parcelas, el tipo de suelo, el sistema de riego, la fuente de agua, la fuerza de trabajo, etc.

Como se expresó anteriormente, se incluye el análisis de series temporales de variables climáticas, a partir de datos recogidos por la estación meteorológica provincial de Las Tunas, con las que se determinan las funciones de distribución probabilísticas de la evapotranspiración de referencia (ET_o , calculada por el método Penman-Monteith, recomendado por la FAO, Allen, Pereira, Raes y Smith, 2006), así como las series de precipitaciones recogidas por el Instituto de Recursos Hidráulicos. Las distribuciones de probabilidad se obtienen mediante la realización de pruebas no paramétricas de bondad de ajuste en paquetes estadísticos. La determinación de estas distribuciones permite la realización de la simulación de los tres escenarios previstos.

Los escenarios se construyen teniendo en cuenta la variabilidad climática de la zona, como año seco, medio y húmedo, según los criterios de probabilidad mensual de lluvia (Doorenbos y Pruitt, 1975). Con este paso se le muestra especial interés a la planificación acertada de la cantidad de agua que se utilizará, que depende de las necesidades de los cultivos, en concordancia con las condiciones climáticas particulares de la zona de estudio, por la importancia de este recurso en los resultados productivos, ya que existe una alta relación agua-rendimiento- calidad. En particular, esta relación se acentúa en la agricultura urbana, donde la producción se constituye por lo general de cultivos hortícolas, que muestran marcada sensibilidad a los niveles hídricos aportados, tanto por el déficit como por el exceso (González, 2017).

Con la caracterización de la unidad objeto de estudio se está en condiciones de pasar a la segunda etapa.

Etapas 2. Obtención de las láminas de riego y los rendimientos estimados por cultivos en cada escenario

Mediante la simulación de escenarios, y a partir del submodelo propuesto en la figura 1, se obtienen las láminas netas medias de riego para la evapotranspiración del cultivo sin restricciones hídricas (ET_m) y para distintos déficits de riego, las láminas brutas medias, de acuerdo con la eficiencia del sistema y los rendimientos medios estimados de los cultivos en cada caso, así como la relación rendimiento-lámina bruta de riego, que es conocida como la eficiencia del uso del agua de riego.

Se propone el cálculo de la evapotranspiración del cultivo sin restricciones hídricas (ET_m) mediante la relación de la ET_o con el coeficiente de cultivo (k_c) en cada momento de su ciclo como se sugiere por la FAO en la *Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos de los años (2002 y 2006)*. Para el cálculo de la precipitación efectiva (P_e), se propone el método USDA, Soil Conservation Service (Pacheco, Alonso, Pujol y Camejo, 1995).

Para establecer la programación de riegos, se utiliza el método del balance hídrico simplificado en el conjunto suelo-planta-atmósfera, a través de la metodología establecida por la Norma Cubana 48-16 para el cálculo del régimen de riego por proyecto (Pacheco, Alonso, Pujol y Camejo, 1995). Este submodelo se representa en la figura 1 en forma de diagrama de flujo.

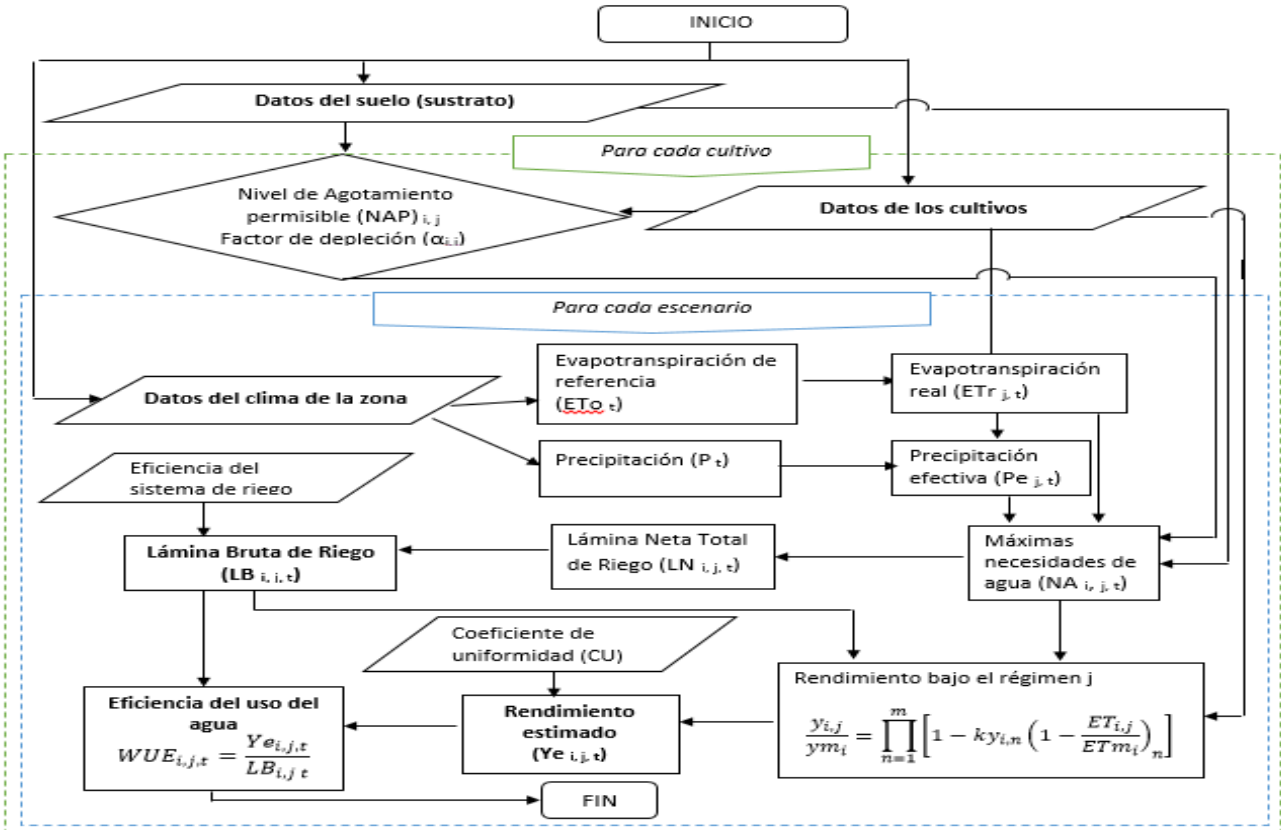


Figura 1. Diagrama de flujos para la obtención de las láminas de riego y rendimientos estimados por cultivo en cada escenario (Submodelo 1). Fuente: Elaboración de los autores.

Se realizarán las simulaciones del balance diario, para la determinación de las láminas netas de riego por cultivo en cada uno de los escenarios previstos. Una vez realizadas las simulaciones se obtendrán para cada cultivo, además de la norma total de riego, datos de interés como el coeficiente de aprovechamiento de la lluvia, la evapotranspiración total del ciclo y el por ciento de agua que se aportó mediante el riego para satisfacer la evapotranspiración real del cultivo.

A partir de dicho submodelo 1 se realiza, además, una estimación del rendimiento en función de las láminas netas de riego calculadas para las diferentes restricciones evapotranspirativas impuestas, al manejar relaciones de evapotranspiración (ET_r/ET_m) de acuerdo con las características fisiológicas de cada cultivo. O sea, estas variantes de riego, estarán dirigidas por el programador de riegos. Para ello, se recurre a la función multiplicativa de Stewart y otros (1977) aplicada en cada una de las etapas productivas del ciclo del cultivo.

Por otra parte, se tiene en cuenta el hecho de que los sistemas de riego se caracterizan por un cierto grado de uniformidad de reparto del agua, y que la calidad de distribución

del agua sobre la parcela afecta al cultivo implantado y, por tanto, a la producción, se propone cuantificar el efecto de la uniformidad del sistema de riego, a partir de caracterización mediante el Coeficiente de Uniformidad de Christians en medio para toda la estación de riegos (Martín-Benito, Merino, Valiente, de Juan y Álvarez, 1999).

Por último, se calcula la eficiencia del agua aplicada, al relacionar el rendimiento estimado con la lámina bruta, se obtienen cuántos kilogramos de producto se espera por cada metro cúbico de agua aplicada. Una vez con estos resultados para todos los cultivos analizados en cada uno de los escenarios previstos, se propone el uso de la modelación por programación lineal en la etapa siguiente, para determinar cuánto sembrar de cada cultivo.

Etapa 3. Obtención de alternativas de cultivos para cada escenario con un horizonte limitado

Para la obtención de las alternativas de cultivos óptimas, con el objetivo de maximizar la ganancia económica por la aplicación de cada unidad de agua aplicada, o la utilidad del agua, se elaboró un modelo de programación lineal (submodelo 2, ver figura 2) donde la variable de decisión (x_{ij}) es la cantidad de hectáreas a sembrar de cada cultivo y el régimen de riego a que debe ser sometido (Boirivant, 2011; Chapman, 2006; Taha, 2012; Vásquez, Cárdenas, Carrillo y Rosero, 2015).

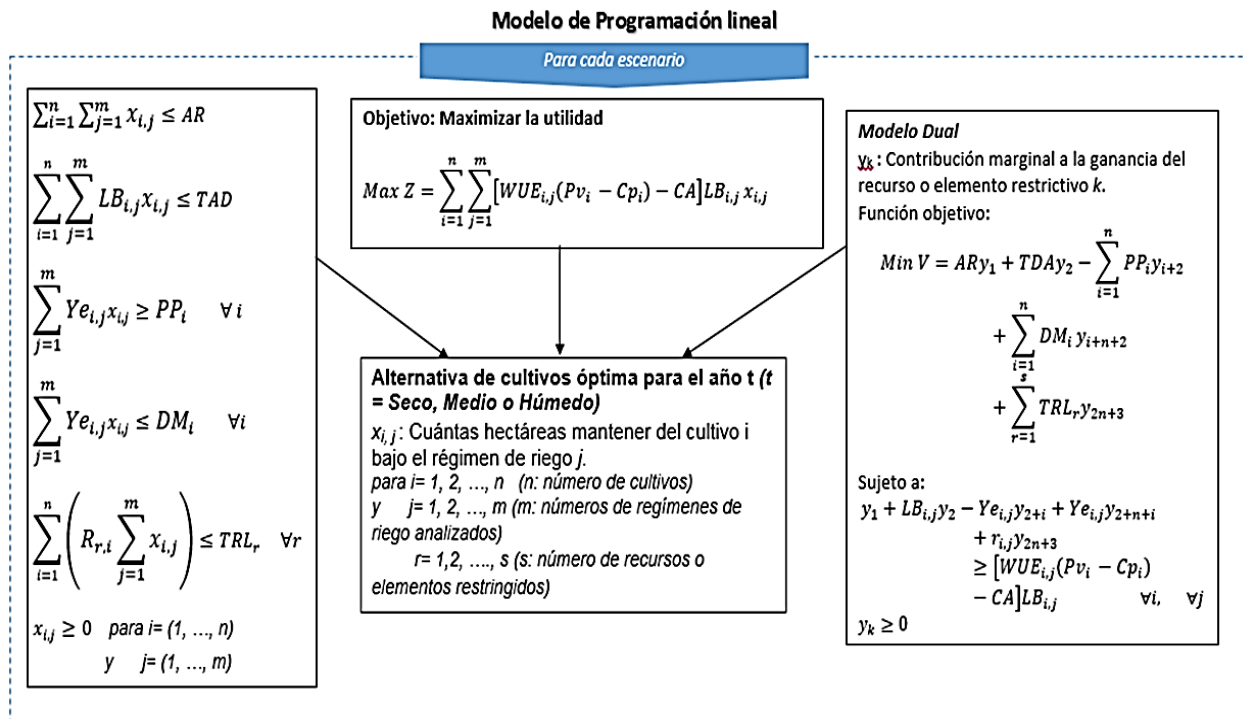


Figura 2. Modelo de programación lineal para la obtención de alternativas de cultivos óptimas (Submodelo 2). Fuente: Elaboración de los autores.

Para la modelación por Programación lineal se utilizan las siguientes nomenclaturas para variables y parámetros:

TTD: cantidad de tierra disponible para sembrar en el período.

LB_{ij}: metros cúbicos de agua a aplicar a cada hectárea del cultivo *i* bajo el régimen de riego *j*.

TDA: total de metros cúbicos de agua disponible en el período.

Ye_{ij}: rendimiento estimado del cultivo *i* bajo el régimen de riego *j*.

PP_i: Plan productivo del cultivo *i*.

DM_i: Demanda máxima estimada del cultivo *i*.

r = 1, 2, ..., s (*s*: número de recursos o elementos restringidos).

R_{ri}: Requerimiento del recurso *r* para cada hectárea del cultivo *i*.

TRL_r: Total disponible del recurso limitado *r*.

WUE_{i,j}: Productividad del agua del cultivo *i*, bajo el régimen de riego *j* ($\text{kg (m}^3\text{)}^{-1}$).

Pv_i: Precio de venta del cultivo *i* ($\text{\$. kg}^{-1}$).

Cp_i: Costo productivo del cultivo *i* ($\text{\$. ha}^{-1}$).

CA: Costo del agua ($\text{\$. (m}^3\text{)}^{-1}$).

En el mismo, se han incluido las restricciones necesarias para caracterizar el área agrícola urbana tipo, atendiendo a diferentes aspectos técnicos, agronómicos, comerciales, disponibilidades hídricas, restricciones de cultivo, etc.

El objetivo del modelo de Programación lineal sería identificar cuánto de cuáles cultivos sembrar y con qué niveles de riego, para que se maximice la utilidad del agua, o sea, que se obtenga la mayor ganancia por metro cúbico de agua aportado. Además, debe contener todos los posibles cultivos a sembrar en cada período en que se aplique, las distintas variantes de riego para satisfacciones evapotranspirativas, así como las disponibilidades de recursos, mano de obra y requerimientos de producción mínimos (planes) y máximos según estudios de demanda.

Una de las restricciones más importantes, según las consideraciones anteriores, es la de superficie máxima cultivable para cada especie agrícola de interés, de forma que se consigan alternativas de cultivo razonables, teniendo en cuenta que la solución que se genere sea posible, de acuerdo con las disponibilidades de mano de obra, capacidad técnica de los agricultores, acceso a mercados y posibilidades de comercialización, etc.

En este modelo se tienen en cuenta las disponibilidades de terreno, agua, semilla, fertilizantes u otros recursos que, por su restricción, resulten limitantes del proceso productivo. Asimismo, se pretenden establecer cotas superiores de producción de

acuerdo con la demanda de los cultivos, así como cotas inferiores para el cumplimiento de planes, si es que lo requiere la unidad, según su política.

La función objetivo del modelo de programación lineal propuesto es maximizar la rentabilidad económica del uso del agua, o sea, que se prioricen los cultivos que proporcionen mayores ingresos por unidad de agua recibida, tomando en consideración su rendimiento, su requerimiento de agua, su costo de producción y el costo del agua.

Dentro de los costos productivos del cultivo se consideran los diferentes costos implicados en el proceso productivo a excepción de los costos fijos, de forma que se establezca una comparación lo más directa posible entre los diferentes cultivos; (fertilizantes, semillas, productos fitosanitarios, mano de obra, etc.).

Paralelamente, se trabajará con los resultados del modelo dual, el cual proporcionará información relevante sobre la contribución marginal a la ganancia de cada uno de los recursos, lo que es de importancia en la presente investigación, porque permitirá al decisor hacer análisis de sensibilidad sobre su uso en uno u otro cultivo. Ello brinda la posibilidad de evaluar el efecto de posibles cambios en los precios de los productos, los costos o las disponibilidades.

Etapa 4. Elección de la alternativa para la planificación de la producción

En la cuarta etapa, se propone el uso de la técnica matriz de pagos, para la toma de decisión final, ya que el análisis se ha hecho hasta este momento, para cada uno de los escenarios previstos, pero debe escogerse una de estas alternativas de decisión. La matriz construida tendrá el formato que se muestra en la figura 3.

Escenario Alternativa de decisión	Estados de la naturaleza		
	Año Húmedo	Año medio	Año seco
Proporción de cultivos y régimen de riegos óptimos para Año húmedo	$\begin{aligned} \text{Ganancia H/H} \\ = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [WUE_{i,j}(Pv_i \\ - Cp_i) - CA]LB_{i,j} x_{i,j} \end{aligned}$	$\begin{aligned} \text{Ganancia H/M} \\ = (\text{Ganancia H/H}) - CA \\ * \Delta TLB_{h-m} \end{aligned}$	$\begin{aligned} \text{Ganancia H/S} \\ = (\text{Ganancia H/H}) - CA \\ * \Delta TLB_{h-s} \end{aligned}$
Proporción de cultivos y régimen de riegos óptimos para Año medio	$\begin{aligned} \text{Ganancia M/H} \\ = (\text{Ganancia M/M}) + CA \\ * \Delta TLB_{m-h} \end{aligned}$	$\begin{aligned} \text{Ganancia M/M} \\ = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [WUE_{i,j}(Pv_i - Cp_i) \\ - CA]LB_{i,j} x_{i,j} \end{aligned}$	$\begin{aligned} \text{Ganancia M/S} \\ = (\text{Ganancia M/M}) - CA \\ * \Delta TLB_{m-s} \end{aligned}$
Proporción de cultivos y régimen de riegos óptimos para Año seco	$\begin{aligned} \text{Ganancia S/H} \\ = (\text{Ganancia S/S}) + CA \\ * \Delta TLB_{s-h} \end{aligned}$	$\begin{aligned} \text{Ganancia S/M} \\ = (\text{Ganancia S/S}) + CA \\ * \Delta TLB_{s-m} \end{aligned}$	$\begin{aligned} \text{Ganancia S/S} \\ = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [WUE_{i,j}(Pv_i - Cp_i) \\ - CA]LB_{i,j} x_{i,j} \end{aligned}$

Figura 3. Matriz de pagos para la toma de decisión. Fuente: Elaboración de los autores.

En esta matriz se muestra que el resultado de la decisión que se tome estará condicionado por la ocurrencia de uno u otro escenario, los cuales son difíciles de pronosticar en el corto plazo. Es por ello que los resultados están representados como se muestra (primera fila):

- Ganancia H/H: Es la ganancia a obtener dado que se planificó para año húmedo y ocurrió el escenario Año Húmedo.
- Ganancia H/M: Es la ganancia a obtener dado que se planificó para año húmedo y ocurrió el escenario Año Medio.
- Ganancia H/S: Es la ganancia a obtener dado que se planificó para año húmedo y ocurrió el escenario Año Seco.

Y así, para las dos filas subsecuentes.

Por ejemplo, puede haberse tomado la decisión de sembrar las alternativas de cultivos que se obtuvieron en el modelo para el escenario de año seco y que, en la práctica, en el ciclo productivo, las variables climáticas se comporten con mayor similitud a las de un año húmedo, luego, el gasto de agua por concepto de riego, sería menor que el planificado, por lo que, a la ganancia estimada, se le debería sumar el ahorro del costo del agua que se dejó de aplicar. Lo contrario ocurriría si se eligiera la alternativa para año húmedo y se manifiesta el clima como el de un año seco.

Para la toma de decisión se propone el criterio del valor esperado, puesto que se cuenta con una base de datos extensa de las precipitaciones en la zona de estudio y se puede estimar la probabilidad de ocurrencia de cada escenario con bastante efectividad (Bueno, Quintero y Rodríguez, 2017; Felipe, Rodríguez, Ruíz, González y Álvarez, 2001).

Una vez seleccionada la alternativa de decisión óptima, se pasa a la elaboración del plan agregado de producción de la unidad para el ciclo productivo.

Etapa 5. Elaboración del plan agregado de producción

Con los resultados de la aplicación de los modelos anteriores, se propone elaborar el plan agregado de producción. El mismo debe incluir todos los recursos, tanto humanos como materiales, necesarios para que se cumpla la optimización de los resultados económicos.

Este plan debe ser analizado por la administración de la unidad productiva para incluir los ajustes necesarios. Se propone que se siga la lógica propuesta en el diagrama de la figura 4, el cual es una versión realizada por los autores de la propuesta por Domínguez, Álvarez, García, Domínguez y Ruiz (1995).

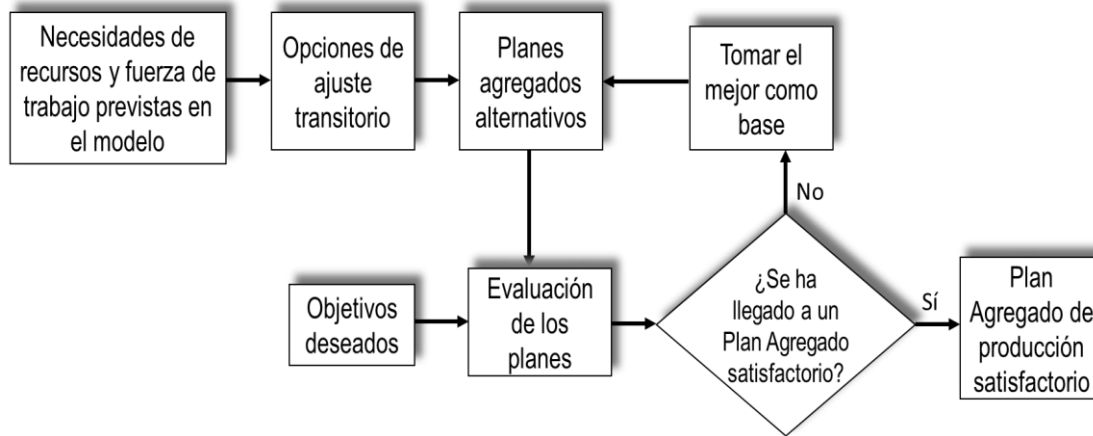


Figura 4. Lógica para la elaboración del plan agregado de producción satisfactorio. Fuente: Adaptado de Domínguez y otros (1995)

Este plan es muy importante, ya que, a la vez que es un instrumento para la planificación de un período productivo y para el control del cumplimiento del plan estratégico de la entidad, sirve de base para la aplicación del modelo en períodos similares de años posteriores.

Etapa 6 Validación del modelo a través del Criterio de Expertos

Para validar este modelo mediante el criterio de expertos, se partió de la identificación previa de un grupo de personas con vasta experiencia en el campo Riego y drenaje en la agricultura o la Modelación Matemática, que han ocupado cargos de dirección administrativa o han desarrollado investigaciones en este campo, para una primera propuesta de 10 posibles expertos.

Se seleccionaron para la validación del procedimiento los expertos con alto coeficiente de competencia, en total 7 de diez posibles; de los cuales todos son doctores en ciencias técnicas agropecuarias, con más de 15 años de experiencia en el ámbito agropecuario o en la modelación matemática.

El segundo paso consistió en presentarle a cada experto una copia del modelo propuesto y una encuesta para su validación, que solicitaba su respuesta a una serie de preguntas referidas a valorar la pertinencia de los mismos, enmarcadas en las siguientes calificaciones Muy relevante, Bastante relevante, Relevante, Poco relevante y No relevante.

Después de aplicada la encuesta se pasó al procesamiento de la misma, con la utilización del Microsoft Excel. En este caso se confeccionó una tabla de doble entrada donde se reflejó el total de respuestas por aspectos consultados y categorías señaladas. Se obtuvo una tabla de frecuencia absoluta a partir de la cual se derivaron las tablas de frecuencia absoluta acumulada, y la de frecuencia relativa acumulada.

Se evidenció que los expertos coinciden en valorar como *Bastante Relevante* la claridad en cada una de las etapas del procedimiento, el uso de la matriz de pagos para la toma de decisión y la aplicabilidad de modelo y como *Muy Relevante* el rigor científico en el diseño del modelo, la coherencia entre las etapas que componen el modelo; el análisis de las variables climáticas de la zona de estudio, el uso de la simulación Montecarlo para la generación de escenarios y el uso de la programación lineal para la determinación de las alternativas de cultivos óptimas.

Para obtener la evaluación general del modelo, se calcularon los puntos de corte, como el promedio de los valores de la función estándar inversa por cada uno de los valores de escala y se determinó el valor de límite N, a través del promedio de los puntos de Corte para delimitar los rangos de intervalo a los que pertenece cada categoría.

Al tener en cuenta las calificaciones de cada aspecto evaluado por los expertos y según los puntos de corte se halló que todos se encuentran en el rango de Muy Relevante, por lo que se concluye que la opinión de los expertos es favorable al modelo propuesto.

Aplicación parcial del modelo propuesto en la unidad “El Tunerito”

El modelo fue aplicado parcialmente para la planificación de la producción en el organopónico “El Tunerito” del municipio Las Tunas, para el período de septiembre a diciembre de 2019.

Se trabajó con una serie temporal mensual de más de 25 años (1991-2017) de precipitaciones en la localidad de Las Tunas, para la construcción de los escenarios de año seco, medio y húmedo, y con datos diarios de la misma serie proporcionada por el Centro Provincial de Meteorología de Las Tunas, para la determinación de las necesidades de riego.

Los cultivos de elección para este período fueron la Lechuga Fomento- 95, la Zanahoria Tropical CH-4, la Remolacha Detroit Dark Red y la Habichuela china Cuba 98.

Entre los factores técnicos económicos se destacan que el área a sembrar es de 500 m², el sistema de riego, por aspersión, la eficiencia del sistema de riego de 65%, el total de agua disponible es de 240m³, el costo del agua \$0.036 (m³)⁻¹(pesos por metro cúbico).

Entre los demás recursos restrictivos la mayor limitación que se tiene es las horas-hombre al día, que suman en total 32 horas, (2496 h en el período). Además, se tuvieron en cuenta los planes productivos de la empresa y la demanda de los productos.

Con la aplicación del modelo se obtuvieron los resultados que se muestran en las tablas siguientes:

Cultivos	Área a sembrar (m ²)	Producción total esperada (kg)	Cumplimiento del plan de producción (%)	Ganancia esperada por cultivo (\$)	Consumo de agua por cultivo (m ³)
<i>Lechuga Fomento- 95</i>	273	2187	728,89	15276.11	41,28
<i>Remolacha Detroit Dark Red</i>	67	200	100,00	1203.460	23,52
<i>Zanahoria Tropical CH-4</i>	67	200	100,00	600.75	20,80
<i>Habichuela China Cuba 98</i>	93	653	326,67	2596.09	31,39
<i>Total</i>	500	3240	1255,56	19676,41	116.99

Tabla 3 Planificación de cultivos a sembrar. Año húmedo.

Cultivos	Área a sembrar (m ²)	Producción total esperada (kg)	Cumplimiento del plan de producción (%)	Ganancia esperada por cultivo (\$)	Consumo de agua por cultivo (m ³)
<i>Lechuga Fomento- 95</i>	273	2187	728,89	15270.80	59.70
<i>Remolacha Detroit Dark Red</i>	67	200	100,00	1202.97	28.04
<i>Zanahoria Tropical CH-4</i>	67	200	100,00	600.26	25.33
<i>Habichuela China Cuba 98</i>	93	653	326,67	2594.51	37.67
<i>Total</i>	500	3240	1255,56	19668.54	150,74

Tabla 4 Planificación de cultivos a sembrar. Año medio.

Cultivos	Área a sembrar (m ²)	Producción total esperada (kg)	Cumplimiento del plan de producción (%)	Ganancia esperada por cultivo (\$)	Consumo de agua por cultivo (m ³)
<i>Lechuga Fomento- 95</i>	273	2187	728,89	15265.71	77.40
<i>Remolacha Detroit Dark Red</i>	67	200	100,00	1202.62	31.30
<i>Zanahoria Tropical CH-4</i>	67	200	100,00	599.87	28.94
<i>Habichuela China Cuba 98</i>	93	653	326,67	2593.05	43.44
<i>Total</i>	500	3240	1255,56	19661,25	181,08

Tabla 5 Planificación de cultivos a sembrar. Año seco.

Para los tres escenarios previstos la solución óptima es la misma, o sea, hay coincidencia en que se deben sembrar 273 m² de Lechuga, 67m² de remolacha, 67m² de zanahoria y 93 m² de habichuela china, lo que significaría, según el rendimiento esperado por m², un sobrecumplimiento de los planes productivos de la lechuga y la habichuela china.

La ganancia total a obtener en cada tipo de año varía, aunque en poca medida, producto al bajo costo del agua. Sin embargo, la variación del consumo de agua sí es notable, al alcanzar totales de 34m³ entre año húmedo y medio y de 31m³ entre año medio y seco, lo que sumaría una variación total de 65m³ (entre año seco y húmedo).

Para valorar económicamente los resultados de la aplicación del modelo, se comparó con la planificación realizada por la Unidad en el período septiembre-noviembre de 2019. Los resultados se muestran en la tabla 1.

	Ganancia Total (\$)	Producción total (kg)	Cumplimiento del plan de producción (%)	Consumo de agua por cultivo (m ³)
Por el modelo	19668	3240	360	150,00
Real	13300	2500	87	198,00

Diferencia	6368	740	273	-48
------------	------	-----	-----	-----

Tabla 1. Comparación de los resultados obtenidos con la planificación real y con la planificación mediante el modelo
Fuente: Elaboración de los autores.

Mediante la planificación realizada por el modelo, la ganancia esperada a obtener, supera a la ganancia realmente obtenida en \$6368,00 (47,9%); mientras que el consumo de agua sería disminuido en 48m³, lo que representa un 24% del total utilizado.

Por lo tanto, se evidenció que el modelo propuesto contribuirá a un mejor aprovechamiento de los recursos hídricos al ajustar las láminas de riego a las necesidades reales de los cultivos, y las características de los sistemas de riego del que disponga la entidad, manejando además alternativas de cultivos con déficit hídrico.

La planificación de la producción en áreas de la agricultura urbana del municipio Las Tunas se fundamenta en la aplicación de métodos empíricos a partir de resultados históricos lo que provoca reiterados incumplimientos de los planes productivos, así como una desacertada asignación de los recursos que afecta los resultados económicos.

Precisiones finales

El modelo propuesto permite, a partir de la caracterización de la unidad suelo-clima-cultivo- y factores técnico-económicos, determinar las láminas de riego y rendimientos estimados por cultivos, así como las alternativas de cultivos y regímenes de riego óptimos en cada escenario para la elaboración del plan agregado de producción. Ello contribuirá a un mejor aprovechamiento de los recursos hídricos al ajustar las láminas de riego a las necesidades reales de los cultivos, y las características de los sistemas de riego del que disponga la entidad, manejando además alternativas de cultivos con déficit hídrico.

La validación del modelo mediante el criterio de expertos y los resultados positivos obtenidos en su aplicación parcial, demostraron la pertinencia del mismo para la planificación de la producción en áreas de agricultura urbana.

Referencias

- Allen, R., Pereira, L., Raes, D. y Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje 56*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Boirivant, J. A. (2011). El análisis post-optimal en programación lineal aplicada a la agricultura. *Reflexiones*, 90(1), 4.

- Bueno, J. A. G., Quintero, S. M. D. y Rodríguez, J. N. (2017). Optimización de carteras a la luz de la teoría de decisión fuzzy. *Puente*, 10(2), 103-115.
- Cuba. Ministerio de la Agricultura (MINAGRI). (2017). *Informe de balance anual de producciones urbanas en Las Tunas*. Informe impresión ligera. Las Tunas: Autor.
- Chapman, S. (2006). *Planificación y control de la producción* (1ra ed.). México: Pearson Educación de México.
- Domínguez, J., Álvarez, M., García, S., Domínguez, M. y Ruiz, A. (1995). *Dirección de Operaciones: Aspectos Tácticos y Operativos en la Producción y los Servicios*. Madrid: McGraw Hill.
- Doorenbos, J. y Pruitt, W.O. (1975). *Guidelines for predicting crop water requirements, Estudio de Riego y Drenaje No. 24*. Organización de las Naciones Roma: Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Felipe, P., Rodríguez, B., Ruíz, N., González, A., y Álvarez, P. (2001). *Programación matemática I*. La Habana: Félix Varela.
- González, R. C. (2017). Evapotranspiración y coeficiente de cultivo de la lechuga (BSS-13) en condiciones de organopónico. *Revista Ingeniería Agrícola*, 5(2), 10-15.
- Martín-Benito, J. M. T., Merino, R., Valiente, M., de Juan Valero, J. A., y Álvarez, J. F. O. (1999). Modelo de optimización económica del manejo del agua de riego en las explotaciones agrícolas: Aplicación a la agricultura de regadío de la provincia de Toledo. Investigación agraria. *Producción y protección vegetales*, 14(3), 325-354.
- Pacheco, J., Alonso, N., Pujol, P., y Camejo, E. (1995). *Riego y drenaje*. La Habana: Pueblo y Educación.
- Partido Comunista de Cuba (PCC, 2017). *Actualización de los lineamientos de la política, económica y social del partido y la revolución para el período 2016-2021*. La Habana: Autor.
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E. y Raes, D. (2012). *Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. Estudio FAO Riego y Drenaje 66*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Stewart, J. I., Hagan, R. M., Pruitt, W. O., Danielson, R. E., Franklin, W. T., Hanks, R. J. y Jackson, E. B. (1977). *Optimizing crop production through control of water and salinity levels in the soil*. Estados Unidos: Reports Paper 67. Utah Water Research Laboratory, USA.
- Taha, H. A. (2012). *Investigación de Operaciones*. Novena Edición. México: Pearson Educación.

Vásquez, J. P. R., Cárdenas, D. C., Carrillo, M. G. G., y Rosero, C. H. S. (2015). Modelo de programación lineal para planeación de requerimiento de materiales. *Revista Tecnológica-ESPOL*, 28(2).