



Publicación Cuatrimestral. Vol. 7, No. Especial, Diciembre, 2022, Ecuador (p. 311 -326). Edición continua
<https://revistas.utm.edu.ec/index.php/Basedelaciencia/index>
revista.bdlaciencia@utm.edu.ec
Universidad Técnica de Manabí

DOI: <https://doi.org/10.33936/revbasdelaciencia.v7iESPECIAL.4393>

ADAPTACIÓN DEL MODELO DE LOCALIZACIÓN DE MÁXIMA COBERTURA PARA OPTIMIZAR LA PRODUCTIVIDAD DE LOS CULTIVOS CON BASE A SU CICLO

Joffre Paúl Añazco Chávez^{1*} , Miguel Alfonso Flores Sánchez² 

¹Instituto de Posgrado, Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador / Instituto Superior Tecnológico Quinindé, Quinindé, Ecuador. Email: janazco5162@utm.edu.ec

² Grupo MODES, SIGTI, Departamento de Matemática, Facultad de Ciencias, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. Email: miguel.flores@epn.edu.ec

*Autor para correspondencia: janazco5162@utm.edu.ec

Recibido: 08-02-2022/ Aceptado: 14-12-2022/ Publicación: 27-12-2022

Editor Académico: Carmen Judith Vanegas Espinoza 

RESUMEN

En el presente estudio, se ha realizado una revisión bibliográfica con la finalidad de determinar un modelo de optimización que maximice la productividad de los cultivos de ciclo corto en función de las fechas de siembra, considerando como base tres de las variables meteorológicas que están siendo afectadas por el cambio climático, las cuales son: temperatura, radiación solar y precipitación. Por la naturaleza del problema, la formulación se asemeja al modelo de localización de máxima cobertura (MCLP), por tal motivo se ha realizado un análisis detallado de este modelo. Para definir la función objetivo se utilizó al índice de capacidad agrícola de Turc ya que este permite calcular la productividad mensual de los cultivos mediante la multiplicación de tres factores: solar, aridez y térmico que se relacionan con la radiación solar, precipitación y la temperatura respectivamente, con base a esto se hizo un modelado a partir del MCLP, con el cual se puede determinar (localizar) la fecha óptima de siembra, en donde la productividad va a ser máxima. Para el uso de este modelo se hicieron adaptaciones al índice de Turc, con el fin de que la productividad se mida semanalmente. Al final se obtuvo un modelo que por la forma en la que las variables intervienen resultó ser un problema no lineal con variables binarias, pero que guardó relación al MCLP.

Palabras clave: índice de Turc, Problema de Localización, Producción agrícola, Variables meteorológicas.

ADAPTATION OF THE MAXIMUM COVERAGE LOCATION MODEL TO OPTIMIZE THE PRODUCTIVITY OF CROPS BASED ON THEIR CYCLE.

ABSTRACT

In the present study, a bibliographic review has been carried out in order to determine an optimization model that maximizes the productivity of short-cycle crops based on planting dates, considering as a basis three of the meteorological variables that are being affected. by climate change, which are: temperature, solar radiation and precipitation. Due to the nature of the problem, the formulation is similar to the maximum coverage location model (MCLP), for this reason a detailed



analysis of this model has been carried out. To define the objective function, the Turc agricultural capacity index was used, since it allows calculating the monthly productivity of crops by multiplying three factors: solar, aridity, and thermal, which are related to solar radiation, precipitation, and temperature, respectively. , based on this, a model was made from the MCLP, with which the optimal planting date can be determined (located), where productivity will be maximum. For the use of this model, adaptations were made to the Turc index, so that productivity is measured weekly. In the end, a model was obtained that, due to the way in which the variables intervene, turned out to be a non-linear problem with binary variables, but which was related to the MCLP.

Keywords: Agricultural production, Location problem, Meteorological variables, Turc index.

ADAPTAÇÃO DO MODELO DE LOCALIZAÇÃO DE COBERTURA MÁXIMA PARA OTIMIZAR A PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS COM BASE NO SEU CICLO

RESUMO

No presente estudo, foi realizada uma revisão bibliográfica para determinar um modelo de otimização que maximize a produtividade das culturas de ciclo curto com base nas datas de plantio, considerando como base três das variáveis meteorológicas que estão sendo afetadas pelas mudanças climáticas. , que são: temperatura, radiação solar e precipitação. Devido à natureza do problema, a formulação é semelhante ao modelo de localização de cobertura máxima (MCLP), por isso foi realizada uma análise detalhada deste modelo. Para definir a função objetivo, foi utilizado o índice de capacidade agrícola Turc, pois permite calcular a produtividade mensal das lavouras multiplicando três fatores: solar, aridez e térmico, que estão relacionados à radiação solar, precipitação e temperatura, respectivamente. , com base nisso, foi feito um modelo a partir do MCLP, com o qual pode ser determinada a data ótima de plantio (localizada), onde a produtividade será máxima. Para a utilização desse modelo, foram feitas adaptações no índice de Turc, para que a produtividade seja medida semanalmente. No final, obteve-se um modelo que, pela forma como as variáveis intervêm, acabou por ser um problema não linear com variáveis binárias, mas que estava relacionado com o MCLP.

Palavras chave: Índice de turc, Problema de localização, Produção agrícola, variáveis meteorológicas.

Citación sugerida: Chávez, P., Sánchez, A. (2022). Adaptación del modelo de localización de máxima cobertura para optimizar la productividad de los Cultivos con base a su ciclo. Revista Bases de la Ciencia, Vol. 7, (No. Especial), Diciembre, 2022, Ecuador (p. 311 -326). DOI: <https://doi.org/10.33936/revbasdelaciencia.v7iESPECIAL.4393>





1. INTRODUCCIÓN

El planeta está pasando por una crisis climática, debido al calentamiento global, el cual demanda de políticas y acciones que permita minimizar el impacto negativo que este tiene sobre la civilización humana (Caride Gómez y Meira Cartea, 2019). Entre los cambios que se han observado en el sistema climático según el quinto informe de evaluación del IPCC (Camino y cols., 2014) son: aumento de la temperatura media entre $0,65\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ en los últimos 120 años a nivel mundial, las últimas tres décadas fueron más calientes que las demás desde 1850, las precipitaciones han aumentado en algunas zonas y disminuido en otras.

Las variables meteorológicas que definen el clima de una región son determinantes al momento de considerar la productividad que pueden llegar a tener los cultivos, en la actualidad debido al aumento de la emisión y concentración de gases que promueven el efecto invernadero en la atmósfera terrestre y por ende al calentamiento global, lo que supone que las actividades agrícolas tienen que adaptarse, modificarse o cambiarse dependiendo del nivel de afectación de cada región del planeta, ya que los efectos no son globalizados (López Feldman y Hernández Cortés, 2016).

En la actualidad y desde hace más de 20 años, se han empezado a emplear algunos modelos computacionales que permiten estudiar el desarrollo y productividad de los cultivos en varios escenarios utilizando como base las variables meteorológicas que están siendo afectadas y por ende modificadas por el cambio climático, estas variables que por lo general se utilizan son: La temperatura, la radiación solar y la precipitación, en donde primero se delimita un área y luego se procede a la simulación (Villalobos y Retana, 2017), algunos de los modelos usados son: CERES-Maize (Sau y cols., 2012) para el estudio del crecimiento del cultivo de maíz, AquaCrop (Flores-Gallardo y cols., 2013) usado para el estudio de la productividad de cultivos de ciclo corto, al igual que el Modelo de simulación DSSAT (Hernández Córdova y cols., 2016) o el CROPGRO usado para el cultivo de soja (Rocha y cols., 2012), entre otros.

Para describir muchos de los fenómenos que están en la naturaleza se utilizan modelos matemáticos, por lo que resultan muy útiles para la toma de decisiones en el área de la agricultura; estos modelos son herramientas que permiten calcular la producción de los cultivos, generar escenarios, maximizar ingresos y minimizar cualquier actividad o proceso adverso que esté afectando a cualquier tipo de explotación agrícola (Gort y cols., 2018). Una de las ramas de la matemática es la optimización, dentro de la cual se encuentra la programación matemática, la cual tiene una gran aplicación en el sector industrial y de servicios, pero pocos son los trabajos que se realizan en la agricultura que en la actualidad han ido en aumento (Boirivant, 2013). En este contexto se determina la utilidad del modelamiento matemático para dar solución en poco tiempo y tener unas reacciones posibles a los efectos del cambio climático como lo es el identificar las fechas de siembra óptimas de los cultivos con base a las necesidades meteorológicas de los cultivos.

El objetivo de la presente investigación, es realizar una revisión bibliográfica que permita presentar un modelo de optimización matemática que determine la máxima productividad de los cultivos en función de las fechas de siembra y además considerando como restricciones al comportamiento de tres de las variables meteorológicas que se están viendo afectadas por el cambio climático, como lo son la temperatura, la radiación solar y la precipitación.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente estudio se usó como base para la función objetivo del modelo de optimización a buscar, al índice de capacidad agrícola de Turc descrito en C. C. García (1990) con las posibles modificaciones que puede tener, debido a la adaptación que se le deben realizar para cada región del planeta, como lo indica Estrada (2011). Este índice es el que mejor se adapta a la problemática que se tiene en la presente investigación, además de eso por parte de los autores se considera una modificación de este índice para que los cálculos de este sean semanalmente, a diferencia del propuesto por Turc que es mensualmente, esto con el fin de adaptarlos a cultivos de ciclo corto, esta modificación ayuda a ser más exactos en la predicción de cosecha ya que los periodos evaluados son más cortos.

2.1 Índice de capacidad agrícola de Turc

En el año 1972 L. Turc desarrolla un índice de capacidad agrícola que permitía relacionar la productividad de los cultivos en base a la biomasa de materia seca producida mes a mes a través variables meteorológicas de interés en esta investigación, como son la precipitación, la radiación solar y la temperatura (Iniesta, 2001). Este índice descrito en C. C. García (1990) y considerando algunas modificaciones propuestas por Estrada (2011), resulta de la multiplicación de tres factores, que son: Factor térmico Ft , el factor de aridez Fs y el factor solar Fh , dando como resultado la capacidad agrícola CA , en (1) se observa la fórmula para el cálculo mensual de CA . Una vez se obtiene la capacidad agrícola para los 12 meses de año, se suman para obtener la productividad anual de la biomasa en materia seca que está en (2):

$$CA_i = Ft_i \times Fh_i \times Fs_i; \quad i = 1, \dots, 12; \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{i=12} CA_i \quad (2)$$

Donde:

- i representa el número del mes evaluado en el año, por lo que $i = 1, \dots, 12$

Para el presente estudio se presenta el modelo de optimización para cultivos de ciclo corto, los cuales tienen un periodo de explotación de menos de un año (Tello Domínguez, 2015), por lo que para el CA tenga mayor exactitud para este tipo de cultivos, se consideró un CA^* modificado, en donde la capacidad agrícola se calcula de forma semanal por lo que para un año, se debe usar la fórmula (3):

$$\sum_{i=1}^{i=52} CA_i^* \quad (3)$$

Donde:

- CA^* es el índice de capacidad agrícola modificado
- i representa el número de la semana evaluada en el año, por lo que $i = 1, \dots, 52$

Es así que al considerar la semana como variable de decisión se necesita modificar los factores del CA los cuales se van a detallar en la sección 3.



2.2 Modelo de Optimización

Para la modelación del problema de optimización, que permite seleccionar (localizar) la mejor fecha de siembra de los cultivos considerando las variables meteorológicas: radiación solar, temperatura y precipitación; se partió de formulación del problema, el cual se asemeja a los modelos de localización (Murray y cols., 2010), con una gran relación al Modelo de Localización de Máxima Cobertura (MCLP) (Church, 1974), debido a que este trabaja con radios espaciales y/o temporales, siendo esta segunda característica la que permite seleccionar la fecha óptima de siembra.

Este problema es parte de la programación lineal; según Boirivant (2011), esta se ha aplicado en varios procesos de la industria, como la localización de instalaciones de producción y almacenaje, con la finalidad de la minimización de los costos de producción sin perder calidad, planificación de la producción y para maximizar las ganancias. Es importante recalcar también la existencia de problemas de optimización no lineales, los cuales pueden ayudar a modelar situaciones aunque parecidas pero con mayor complejidad como se puede leer en (Espinosa-Paredes y Rodríguez, 2016).

A continuación se muestra como está planteado el modelo en la literatura.

2.2.1 Modelo de localización de máxima cobertura MCLP

Church (1974) propuso por primera vez el Problema de Localización por Máxima Cobertura (MCLP), el cual tiene como objetivo el maximizar la demanda que se tiene dentro de una distancia o tiempo fijo, que está sujeto a que un presupuesto previamente establecido, debe alcanzar para un número fijo de equipamientos. La formulación del (MCLP) dado por (Church, 1974), se describe a continuación:

$$\begin{aligned} \max z &= \sum_{i \in I} a_i y_i \\ \text{s.a} & \\ & \sum_{j \in N_j} x_j \geq y_i \quad \forall i \in I \\ & \sum_{j \in J} x_j = P \\ & x_j = (0, 1) \quad \forall j \in J \\ & y_i = (0, 1) \quad \forall i \in I \end{aligned} \tag{4}$$

Donde:

Conjuntos

- I son los conjuntos demandados en los nodos i
- J son los conjuntos de ubicación de las instalaciones j

Parámetros

- a_i es la población que se atiende en el nodo i
- P es el total de instalaciones a ubicar

- $N_j = \{j \in J : d_{ij} \leq S\}$
- S es la distancia de un punto demandado y no cubierto.
- d_{ij} es la distancia más cercana entre nodos i y j

Variables

- $x_j = \begin{cases} 1 & \text{si la instalación se asigna en el sitio de seleccionado } j \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$
- $y_i = \begin{cases} 1 & \text{si la demanda } i \text{ es cubierta} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$
- z es la variable a maximizar

El MCLP, se adaptó muy bien a la modelación del presente estudio, ya que se considera un radio temporal y maximiza el lugar donde se cubre la mayor parte de las demandas, por lo que esto se relaciona con las semanas del ciclo del cultivo en donde la producción es máxima, sin embargo existen modificaciones, que hacen que el modelo que se propone en el presente estudio sea un problema no lineal con variables binarias.

3. DESARROLLO

Con base al índice de Turc (C. C. García, 1990), para el presente estudio se modificaron algunos parámetros a fin de que el cálculo de la productividad de los cultivos de ciclo corto se hagan de forma semanal, obteniéndose la siguiente ecuación:

$$CA_i^* = Ft_i^* \times Fh_i^* \times Fs_i^*; \quad i = 1, \dots, n; \quad (5)$$

Donde:

- i es la semana del ciclo del cultivo, que varía dependiendo de la especie y variedad.
- Ft^* , Fh^* y Fs^* representan al factor térmico, solar y aridez respectivamente modificados.
- CA^* , es la capacidad agrícola modificada del cultivo que se seleccione.

En las siguientes subsecciones para las respectivas modificaciones se habla para cualquier semana específica por lo que no se considera la definición por el subíndice i .



3.1 Modificaciones de los factores del índice de Turc

3.1.1 Modificaciones del Factor térmico del índice de Turc

Algunas investigaciones como en Estrada (2011) muestran al Factor térmico Ft de la siguiente manera:

$$Ft = \begin{cases} 0 & \text{si } t \leq 1 \\ \left(\frac{tm(60-tm)}{1000}\right) \times \left(\frac{t-1}{4}\right) & \text{si } 1 < t < 5 \\ \frac{tm(60-tm)}{1000} & \text{si } t \geq 5 \end{cases} \quad (6)$$

Donde:

- t es la temperatura media de las mínimas del mes $^{\circ}C$.
- tm es la temperatura media del mes evaluado $^{\circ}C$.
- Ft es máximo cuando $tm \geq 30^{\circ}C$.

Por otra parte, en las modificaciones que se proponen, se consideró la temperatura base T_b , la cual es diferente en cada cultivo y en las zonas tropicales es de $T_b \geq 5^{\circ}C$ (Alvarez, 2015), si la $t < T_b$ el crecimiento de los cultivos es nulo. Con base a esto considerando Ft ya descrito se propone un Ft^* modificado como se muestra en la fórmula (7).

$$Ft^* = \begin{cases} 0 & \text{si } t < T_b \\ \frac{tm(60-tm)}{1000} & \text{si } t \geq T_b \end{cases} \quad (7)$$

Donde:

- T_b Es la temperatura base que tolera el cultivo
- Ft^* Es el factor solar modificado propuesto
- $Ft^* \leq 0.9$

3.1.2 Modificaciones del Factor solar del índice de Turc

En Estrada (2011) se describe Fh a partir de (8) y (9) en donde si los valores son positivos describen productividad y se toma el menor valor y en el caso de que los dos sean negativos se toma $Fh = 0$, por lo que representa un mes improductivo:

$$Fh_1 = Nm - 5 - \left(\frac{\Phi}{40}\right)^2 \quad (8)$$

$$Fh_2 = 0,03 \times (R - 100) \quad (9)$$

Que se puede escribir como muestra en (10):

$$Fh = \begin{cases} 0 & \text{si } Fh_1; Fh_2 \leq 0 \\ Fh_1 & \text{si } 0 < Fh_1 < Fh_2 \\ Fh_2 & \text{si } 0 < Fh_2 < Fh_1 \end{cases} \quad (10)$$

Donde:

- Nm es el número promedio de horas máximas de insolación diarias (horas luz).
- Φ es la latitud del lugar de evaluación medido en grados.
- R es la radiación solar medida en cal/cm^2 al día en el suelo.

Como se está trabajando a nivel semanal, se procede a que los valores que se obtienen de (8) y (9) dividirlos entre 4 para transformarlos a la semana como se muestra en (11) y (12). En particular los datos de la R deben ser de la semana que se está evaluando.

$$Fh_1^* = \frac{Nm - 5 - \left(\frac{\Phi}{40}\right)^2}{4} \quad (11)$$

$$Fh_2^* = \frac{0,03 \times (R - 100)}{4} \quad (12)$$

Con lo que la formulación general de Ft^* modificado se muestra en (13):

$$Fh^* = \begin{cases} 0 & \text{si } Fh_1^*; Fh_2^* \leq 0 \\ Fh_1^* & \text{si } 0 < Fh_1^* < Fh_2^* \\ Fh_2^* & \text{si } 0 < Fh_2^* < Fh_1^* \end{cases} \quad (13)$$

Donde:

- Fh^* , Fh_1^* y Fh_2^* representan a las modificaciones que se proponen para el factor solar del índice de Turc para la presente modelización.

3.1.3 Modificaciones del Factor de aridez del índice de Turc

En Estrada (2011) la formulación de F_s es la que se muestra en (14):

$$F_s = \begin{cases} 0 & \text{si } \frac{x-F}{x} + r < 0 \\ \frac{x-F}{x} + r & \text{si } \frac{x-F}{x} + r \geq 0 \end{cases} \quad (14)$$

Donde:



- x es el mínimo de los resultados de los siguientes valores ET_0 y $0,3 \times ET_0 + 50$; ET_0 es la evapotranspiración potencial (Marini y cols., 2017) calculada por el método de Turc como se describe en Pereyra Díaz y cols. (2011).
- F es la cantidad de agua faltante del mes para cubrir las necesidades hídricas de los cultivos, este se mide en mm (milímetros), la formulación de F es la que se muestra en (15):

$$F = \begin{cases} 0 & \text{si } P \geq ET_0 \\ ET_0 - P & \text{si } ET_0 > P \end{cases} \quad (15)$$

P es la precipitación medida en mm .

- r es el reporte del mes precedente y se calcula como se muestra en (16):

$$r = \begin{cases} 0 & \text{si } \frac{x-F}{x} + r > 0 \\ \frac{x-F}{x} + r & \text{si } -1 \leq \frac{x-F}{x} + r \leq 0 \\ -1 & \text{si } -1 > \frac{x-F}{x} + r \end{cases} \quad (16)$$

La modificación que se propone para el factor de aridez, se basa en el cálculo de la ET_0 ; en algunas investigaciones como en (Lujano y cols., 2019), recomiendan el uso del método de Penman-Monteith (PM) (Chávez-Ramírez y cols., 2013) por sobre el de Turc, por tener un mayor desempeño óptimo. El método de PM se describe en (17) como sigue:

$$ETP = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (17)$$

Donde:

- ETP es la evapotranspiración de referencia en mm/d (Aquí se deben sumar los 7 días de la semana).
- R_n es la radiación solar en la superficie en $MJ m^2/d$.
- G es la densidad que tiene el flujo de calor en la superficie en $MJ m^2/d$.
- T es la temperatura media del ambiente en $(^\circ C)$.
- u_2 es velocidad media el aire en m/s a $2 m$ del suelo.
- e_s en Kpa representa a la presión del vapor de saturación.
- e_a es la presión de vapor en Kpa .
- Δ es la pendiente de la curva de la presión de vapor en $kpa/^\circ C$.
- γ es la constante psicrométrica en $kpa/^\circ C$

Con base a esto la formulación general de F_s queda como en (18):

$$F_s^* = \begin{cases} 0 & \text{si } \frac{x^*-F}{x^*} + r < 0 \\ \frac{x^*-F}{x^*} + r & \text{si } \frac{x^*-F}{x^*} + r \geq 0 \end{cases} \quad (18)$$

Donde:

- F_s^* es el factor de aridez modificado propuesto
- x^* es el mínimo de los resultados de los siguientes valores ET_o y $0,3 \times ET_o + 50$; ET_o se calcula a partir del método de PM.

Con esto quedan descritas las modificaciones que se realizaron al índice de capacidad agrícola, lo cual sirvió como base de la función objetivo del modelo propuesto en la presente investigación.

3.2 Producción de los cultivos con base al índice de Turc

El índice de cosecha IC , es un parámetro que relaciona al producto cosechado y la materia seca total del cultivo (Díaz Valdés y cols., 2014), el cual varía entre variedad y especie con lo que se puede calcular la productividad, quedando la siguiente fórmula:

$$IC \times \sum_{j=1}^n CA_i^* \quad (19)$$

Donde:

- CA_i^* es el índice de capacidad agrícola de Turc modificado propuesto para las semanas de duración del ciclo del cultivo que se seleccione.
- n es el número de semanas que tiene el ciclo de cultivo que se seleccione.
- IC es el índice de cosecha del cultivo que se seleccione.

La formulación que se muestra en (19), se convierte en un modelo de crecimiento fisiológico de los cultivos, que describe la producción de los cultivos basados netamente en las condiciones climáticas (Delgado y cols., 2015), pese a esto se debe recordar que existen otros factores que también afectan a la producción (Díaz y cols., 2015) como la calidad del agua, tipos de suelo, nutrición, plagas, enfermedades y manejo principalmente, los cuales se pueden controlar si son detectados a tiempo por lo que no se consideran en la formulación que se propone en el presente estudio.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Adaptación del modelo de de optimización

Partiendo del $MCLP$ (Church, 1974), se presenta el siguiente modelo con las respectivas modificaciones:



4.1.1 Conjuntos

Como se ha indicado, lo que se busca es un modelo que permita seleccionar (localizar) una semana a partir de un conjunto (I) de posibles semanas (i) para iniciar con la siembra o ciclo del cultivo; al localizar esta semana, se cuenta un número determinados de semanas (j) continuas, cuya cantidad va a depender de la duración del ciclo de cultivo, este representa a otro conjunto que se llamó J ; en las semanas j se debe cumplir en su mayoría con los requerimientos climáticos mínimos para el cultivo que se seleccione; por lo tanto se tiene:

- I conjunto de semanas i que se pueden seleccionar para dar inicio al ciclo del cultivo.
- J conjunto de semanas j continuas que representan al ciclo del cultivo.

4.1.2 índices

- i es la semana que se puede seleccionar para dar inicio al ciclo del cultivo.
- j es una semana del ciclo del cultivo.

4.1.3 Parámetros

Los parámetros que se detallan a continuación, parten de las modificaciones que se realizaron al índice de capacidad agrícola de Turc y los requerimientos climáticos del cultivo que se considere.

- IC valor escalar que representa al índice de cosecha del cultivo.
- $CA_{i,j}^*$ es el índice de la capacidad agrícola de Turc en la semana j del ciclo si se selecciona la semana i para la siembra.

El índice de capacidad agrícola de Turc, consta de tres factores, estos se relacionan directamente con las variables climáticas que se describen a continuación como parámetros:

- $t_{i,j}$ es la temperatura mínima real medida en $^{\circ}C$ en la semana j del ciclo si se selecciona la semana i para la siembra.
- $R_{i,j}$ es la radiación solar real medida en cal/cm^2 en la semana j del ciclo si se selecciona la semana i para la siembra.
- $P_{i,j}$ es la precipitación real medida en mm en la semana j del ciclo si se selecciona la semana i para la siembra.

Los siguientes parámetros describen a los requerimientos climáticos mínimos del cultivo que se seleccione en las diferentes semanas j de su ciclo:

- T_{\min_j} es la temperatura mínima que requiere el cultivo en la semana j de su ciclo.
- R_{\min_j} es la radiación solar mínima que requiere el cultivo en la semana j de su ciclo (Fischer y Pérez, 2012).

- P_{\min_j} es la precipitación mínima que requiere el cultivo en la semana j de su ciclo (Ojeda-Bustamante y cols., 2011) y (Della Maggiora y cols., 2000).
- $N_j = \{j \in J : t_{i,j} \geq T_{\min_j}; R_{i,j} \geq R_{\min_j} \text{ y } P_{i,j} \geq P_{\min_j}\}$, aquí N_j representa a las semanas j que cumplen con los requerimientos climáticos del cultivo, cuando se selecciona la semana i para la siembra.

4.1.4 Variables

- z representa al valor de la función objetivo y en este caso a la productividad de los cultivos
- $x_i = \begin{cases} 1 & \text{si se inicia el cultivo en la semana } i \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$
- $y_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{al cubrir los requerimientos climáticos de la semana } j \text{ si se selecciona la semana } i \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$

4.1.5 Función objetivo

$$\max z = \sum_i^n \sum_j^m IC \times CA_{i,j}^* \times y_{i,j} \times x_i \quad (20)$$

Todos los componentes de la función objetivo ya se han descrito con anterioridad.

4.1.6 Restricciones

Los cultivos en general tienen algunas fases fenológicas, en las que se incluye la germinación, el desarrollo, la floración, la fructificación y la maduración; las cuales se distribuyen en intervalos de semanas, en donde existen diferentes requerimientos mínimos de temperatura, precipitación y radiación solar, que se distribuyen en cada semana de las fases fenológicas, por lo que se proponen las siguientes restricciones:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n x_i &= 1 && \forall i \\ y_{i,j} &= 1 && \text{si } j \in N_j \\ y_{i,j} &= (0, 1) && \forall i, j \\ x_i &= (0, 1) && \forall i \end{aligned} \quad (21)$$

4.1.7 Descripción del modelo propuesto

La función objetivo se acerca al propuesto por (Church, 1974) con la diferencia que por la naturaleza del problema pasa a ser de un modelo entero de programación lineal a uno no lineal con variables binarias (D. García y Moreno, 1996). Las restricciones muestran similitud entre el Modelo de Localización de Máxima Cobertura (MCLP) y el propuesto para este problema; la primera restricción del



propuesto limita a las semanas que se pueden seleccionar para dar inicio a la producción, mientras que en el MCLP con la misma naturaleza se restringe el número de instalaciones a seleccionar; luego a manera de cubrimiento en las restricciones del modelo propuesto, se permite validar si las semanas del ciclo cumplen con las restricciones climáticas que se detallan en N_j .

Este modelo puede ser utilizado para cultivos de ciclo corto, en los lugares en donde se tengan los datos climáticos requeridos en formato de los periodos evaluados (semanas); como lo que se quiere es localizar la semana óptima de siembra en donde se cumplen con la mayoría de los requerimientos climáticos mínimos, es necesario tener un histórico de estos datos, que permita predecir estas variables y poder ser usadas para este modelo.

5. CONCLUSIONES

Se usó como punto de partida de la función objetivo del modelo propuesto al índice de capacidad agrícola de Turc debido a que usa parámetros climáticos para predecir la productividad de los cultivos, a este índice se le hicieron modificaciones que permiten realizar cálculos semanales de la producción y no mensuales como estaba planteado en (C. C. García, 1990)

Se propuso un modelo a partir del Problema de Localización de Máxima cobertura (Church, 1974), que permite maximizar la producción de los cultivos agrícolas de ciclo corto específicamente, con la ayuda de la localización de la fecha óptima de siembra, considerando tres de las variables meteorológicas, que actualmente se están viendo afectados por el ya notable cambio climático, los que son la radiación solar, temperatura y precipitación.

El modelo propuesto a pesar de partir de un problema de programación lineal por su naturaleza, se pasó a uno no lineal con variables binarias el cual puede resolverse con algoritmos que se relacionen con este tipo de problemas.

6. DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERÉS DE LOS AUTORES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

7. REFERENCIAS

Alvarez, D. M. (2015). Ecofisiología del cultivo de maíz. *La publicación que se presenta titulado El cultivo de maíz en la provincia de San Luis es un actualizado trabajo de información para la toma de decisiones relacionado con el cultivo. El índice nos señala un recorrido de datos, información y resultados de ensayos demostrativos localizados realizado por un grupo interdisciplinario público-privado.*, 7.

- Boirivant, J. A. (2011). El análisis post-optimal en programación lineal aplicada a la agricultura. *Reflexiones*, 90(1), 4.
- Boirivant, J. A. (2013). Modelo de optimización para un asentamiento agrícola en la cruz de guana-
caste, costa rica. *InterSedes: Revista de las Sedes Regionales*, 14(29), 19–42.
- Camino, E. R., Ruggeroni, J. R. P., y Hernández, F. H. (2014). Quinto informe de evaluación del ipcc:
Bases físicas. *Revista Tiempo y Clima*, 5(43).
- Caride Gómez, J. A., y Meira Cartea, P. Á. (2019). Educación, ética y cambio climático.
- Chávez-Ramírez, E., González-Cervantes, G., González-Barrios, J. L., Dzul-López, E., Sánchez-
Cohen, I., López-Santos, A., y Chávez-Simental, J. A. (2013). Uso de estaciones climatológicas
automáticas y modelos matemáticos para determinar la evapotranspiración. *Tecnología y ciencias
del agua*, 4(4), 115–126.
- Church, R. V. (1974). Cr 1974.“. *The Maximum Covering Location Problem.*” *Pap. Sci*, 32, 101–18.
- Delgado, O. S., Aguilar, Z. S., Mesa, M. P., Díaz, S. B., y Camargo, L. C. (2015). Estudio del
comportamiento e impacto de la climatología sobre el cultivo de la papa y del pasto en la región
central de boyacá empleando los sistemas dinámicos. 8study of the behavior and impact of the
weather on the potato crop and pasture in the central region of boyacá using dynamic systems.
Ciencia En Desarrollo, 6(2), 215–224.
- Della Maggiora, A., Gardiol, J., y Irigoyen, A. (2000). Requerimientos hídricos. *Bases para el manejo
del maíz, el girasol y la soja. Andrade, FE y Sadras, V. O, editores. Editorial Médica Panamericana
SA.*
- Díaz, C. A. F., Montoya, M. M., Álvarez, E. R., Giraldo, J. A. B., y Guerrero, J. M. (2015). Beneficio
económico de la implementación de buenas prácticas en cultivos de palma de aceite de productores
de pequeña escala en colombia. *Revista Palmas*, 36(2), 27–38.
- Díaz Valdés, T., Partidas Ruvalcaba, L., Suárez Fernández, Y. E., Lizárraga Jiménez, R., y López Ló-
pez, Á. (2014). Uso eficiente del agua y producción óptima en maíz, con el uso de cuatro dosis de
nitrógeno. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23(1), 32–36.
- Espinosa-Paredes, G., y Rodríguez, A. V. (2016). *Aplicaciones de programación no lineal.* OmniaS-
cience.
- Estrada, R. (2011). Ajustes al índice de potencialidad agrícola de turc para lograr mejores diseños de
los mecanismos para compartir beneficios en los andes. *Documento de trabajo*, 4.
- Fischer, G., y Pérez, C. P. (2012). Efecto de la radiación solar en la calidad de los productos hortícolas.
En *Memorias del congreso internacional de hortalizas en el trópico (en cd)* (pp. 28–30).
- Flores-Gallardo, H., Ojeda-Bustamante, W., Flores-Magdaleno, H., Sifuentes-Ibarra, E., y Mejía-
Saénz, E. (2013). Simulación del rendimiento de maíz (zea mays l.) en el norte de sinaloa usando
el modelo aquacrop. *Agrociencia*, 47(4), 347–359.



- García, C. C. (1990). *El campo de cartagena: Clima e hidrología de un medio semiarido* (Vol. 13). EDITUM.
- García, D., y Moreno, P. P. (1996). *Programación lineal entera y programación no lineal*. Universidad de Oviedo.
- Gort, G. B. G., Villafranca, M. H., Corrales, C. P., y Bustillo, C. W. G. (2018). Modelos matemáticos para describir la producción de biomasa de la moringa oleífera. *Anuario Ciencia en la UNAH*, 16(1).
- Hernández Córdova, N., Soto Carreño, F., Florido Bacallao, R., Plana Llerena, R., Caballero Núñez, A., Maqueira López, L. A., ... others (2016). Utilización de un modelo de simulación para la predicción del comportamiento de algunos cereales en las condiciones de cuba. *Cultivos Tropicales*, 37(1), 78–84.
- Iniesta, R. G. (2001). *Aproximación al estudio de la estructura agraria y sus cambios en el alto almanzora. (repercusiones de la pac y posibilidades de desarrollo rural)* (Vol. 47). Universidad Almería.
- López Feldman, A. J., y Hernández Cortés, D. (2016). Cambio climático y agricultura: una revisión de la literatura con énfasis en américa latina. *El trimestre económico*, 83(332), 459–496.
- Lujano, A., Quispe, J. P., y Lujano, E. (2019). Métodos alternativos de estimación de evapotranspiración de referencia en la estación de yauri-cusco, Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 21(3), 215–224.
- Marini, F., Santamaría, M., Oricchio, P., Di Bella, C. M., y Basualdo, A. (2017). Estimación de evapotranspiración real (etr) y de evapotranspiración potencial (etp) en el sudoeste bonaerense (argentina) a partir de imágenes modis.
- Murray, A. T., Tong, D., y Kim, K. (2010). Enhancing classic coverage location models. *International Regional Science Review*, 33(2), 115–133.
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., Íñiguez-Covarrubias, M., y Montero-Martínez, M. J. (2011). Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos. *Agrociencia*, 45(1), 1–11.
- Pereyra Díaz, D., Cruz Torres, D. G., y Pérez Sesma, J. A. A. (2011). La evapotranspiración real (etr) en la cuenca del río la antigua, veracruz: estado actual y ante escenarios de cambio climático. *Investigaciones geográficas*(75), 37–50.
- Rocha, A., Bert, F., Skansi, M. d. I. M., Veiga, H., Podestá, G., Ruiz Toranzo, F., ... others (2012). Pronóstico de rendimiento de los cultivos de granos en la región pampeana a través del uso de modelos de simulación agronómica.
- Sau, F., CEDRÓN, F. L., Confalones, A., y Lizaso, J. (2012). Modelos de simulación del cultivo de maíz: Fundamentos y aplicaciones en España. *Pastos*, 40(2), 117–138.

Tello Domínguez, E. P. (2015). Empresas que provisionan productos del ciclo cortó en el país, sus formas de registro y funcionalidades en empresas agrícolas familiares.

Villalobos, F., y Retana, B. (2017). *Efecto del cambio climático en la agricultura. experiencias en costa rica.*

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

Autor	Contribución
Joffre Paúl Añezco Chávez	Metodología, revisión, búsqueda bibliográfica y diseño del artículo.
Miguel Alfonso Flores Sánchez	Concepción, análisis, revisión y redacción.