

Diseño de simulador que identifica variables clave y su impacto en la producción de chayote

Simulator design that identifies key variables and their impact on chayote production

Héctor Daniel García Castro¹, Cuauhtémoc Sánchez Ramírez²✉, Magno Ángel González Huerta²

¹Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, Tecnológico Nacional de México campus Orizaba, México

²División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México campus Orizaba, México

RESUMEN

El presente artículo reporta un caso de estudio desarrollado en una empresa agroindustrial mexicana que produce chayote, durante el cual se desarrolló un modelo de simulación de pronósticos que sirve de apoyo para estimar el rendimiento de las huertas, así como su merma, y que ayuda a evaluar el nivel de satisfacción de los clientes por la entrega de sus pedidos. Se analizaron variables clave de la cadena de suministro del chayote, tales como condiciones climatológicas, mermas, área sembrada, rendimiento promedio por hectárea, tasas de exportación y contratos celebrados con los clientes. Con esta herramienta, la empresa podrá tomar medidas oportunas de abastecimiento, considerar a otros productores para que sean sus proveedores, cumplir con los pedidos de los clientes y, de esta forma, incrementar su nivel de satisfacción. En el desarrollo del modelo, se utilizó la metodología de Dinámica de Sistemas. La empresa realizó la validación del modelo y recibió una interfaz gráfica que permite la manipulación de ciertas variables para entender como estas afectan al proceso productivo del chayote mediante una serie de indicadores clave de desempeño.

PALABRAS CLAVE: agroindustria, dinámica de sistemas, pronósticos, cadena de suministro, chayote.

ABSTRACT

This article reports a case study developed in a Mexican agroindustrial company that produces chayote,, during which a forecast simulation model was developed that serves as support to estimate the yield of the orchards, as well as their loss, and that helps to evaluate the level of customer satisfaction with the delivery of their orders. Key variables of the chayote supply chain were analyzed, such as weather conditions, losses, planted area, average yield per hectare, export rates and contracts signed with clients. With this tool, the company will be able to take timely supply measures, consider other producers to be its suppliers, fulfill customer orders and, in this way, increase their level of satisfaction. In the development of the model, the System Dynamics methodology was used. The company validated the model and received a graphical interface that allows the manipulation of certain variables to understand how they affect the chayote production process through a series of key performance indicators.

KEYWORDS: agroindustry, system dynamics, forecast, supply chain, chayote.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Cuauhtémoc Sánchez Ramírez.

INSTITUCIÓN: Tecnológico Nacional de México campus Orizaba.

DIRECCIÓN: Av. Oriente 9 núm. 852, col. Emiliano Zapata, Orizaba, Veracruz, México, C. P. 94320.

CORREO ELECTRÓNICO: csanchezr@ito-depi.edu.mx

Fecha de recepción: 30 de julio de 2023. **Fecha de aceptación:** 18 de agosto de 2023. **Fecha de publicación:** 31 de agosto de 2023.



I. INTRODUCCIÓN

El chayote (*Sechium edule*) es un fruto ampliamente conocido en todo el continente americano, llegando a ser considerado parte de la dieta básica en México. Su popularidad se debe no solo a su sabor, sino a los beneficios y propiedades que su consumo causa en la salud, gracias a la aportación de vitaminas y minerales [1]. México cubre el 53 % del mercado de consumo para este fruto, dejando una derrama económica estimada en más de 190 millones de pesos [2]. Veracruz es el estado con más producción registrada a nivel nacional, alcanzando más de 160 000 toneladas [3]. En los últimos años el mercado ha tenido un aumento en su competitividad derivado de la implementación de nuevas estrategias ante un mercado cada vez más exigente.

Exportar no solo el chayote, sino cualquier producto agrícola, es un proceso complejo debido a los estándares de calidad e higiene que los importadores exigen. En adición a lo anterior, la siembra y cosecha están estrechamente relacionadas a variables inciertas que influyen en gran medida al rendimiento de las huertas. Esto se traduce en un reto importante para los productores, quienes se encuentran ante incertidumbre y falta de herramientas para tomar decisiones adecuadas.

En la actualidad es normal que los productores trabajen con base en los conocimientos adquiridos a lo largo de años de experiencia en el ramo agroindustrial, sin embargo, al estar basados en un método empírico, se carece de fiabilidad al tomar decisiones en momentos críticos y es ahí donde el presente artículo encuentra el área de oportunidad a explotar.

El objetivo de este trabajo es analizar las variables inciertas críticas presentes en la cadena de suministro del chayote y cómo estas impactan al sistema estudiado, todo ello orientado a generar una herramienta que sirva para planear estrategias que eleven la satisfacción del cliente. Para ello, se seleccionó la metodología de dinámica de sistemas, cuya filosofía gira en torno a la retroalimentación o causalidad circular entre variables observables [4].

A continuación, se resumen los trabajos consultados para el desarrollo del artículo.

Se consultaron artículos donde se aplican diversos métodos basados en series de tiempo para el pronóstico de

precio y costos de productos y consumos energéticos [5]-[8] mostrando resultados de confiabilidad de por lo menos el 90 % en todos los casos, razón por la cual se evaluó el uso de estas técnicas para ciertas secciones del modelo a desarrollar.

Posteriormente, se examinó el uso de la dinámica de sistemas para el análisis de cadenas de suministro agroindustriales, metodología que demostró ser capaz de analizar de forma satisfactoria escenarios altamente complejos e inciertos [9]-[11], siendo la principal ventaja la posibilidad de manipular variables clave para estudiar su efecto en el sistema y, de esta forma, evaluar posibles escenarios para el desarrollo de estrategias oportunas que mitiguen condiciones desfavorables del sistema.

Por último, se repasó un trabajo donde se mezclaron las técnicas antes analizadas [12] y se usaron pronósticos matemáticos clásicos para alimentar un modelo de simulación basado en dinámica de sistemas, trabajo que arrojó resultados altamente fiables.

Una vez estudiado lo anterior, se decidió desarrollar un modelo de pronósticos basado en dinámica de sistemas y alimentado por series de tiempo para evaluar las variables críticas que impactan el proceso productivo del chayote, con la finalidad de analizar el impacto de estas variables en la satisfacción de la demanda de los clientes.

Para ello, se plantearon los objetivos siguientes:

- Identificar las variables claves en el proceso productivo del chayote.
- Definir la relación de las variables identificadas, así como el diagrama causal del proceso productivo del chayote.
- Desarrollar un modelo de simulación de pronósticos que ayude a la empresa a evaluar escenarios de alta, media y baja producción de chayote para analizar si se cumplirán los pedidos de los clientes, de igual forma, que el modelo ayude a la toma de decisiones oportunas como estrategias de ventas a corto plazo, cuando se presentan variantes climáticas en un ciclo de producción.
- Validar, mediante pruebas estadísticas, el error de los datos generados en el simulador con respecto a los datos históricos reales de la empresa.

II. METODOLOGÍA

IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES

El primer paso para el desarrollo del proyecto fue identificar claramente las partes que componen a la *cadena de suministro del chayote* para especificar y definir las variables presentes en él.

Esta cadena se divide en tres eslabones principales (Figura 1), los cuales se definen a continuación:

Aprovisionamiento: Fase donde se obtiene la materia prima, el chayote, ya sea mediante huertas propias (suministro propio) o comprando el producto a terceros (suministro tercerizado).

Producción: Etapa donde el producto es adquirido, seleccionado y empaquetado para su posterior distribución.

Distribución y entrega: Etapa final donde se hace llegar el producto al consumidor final, para este caso, se tienen dos mercados: el nacional y el de exportación.

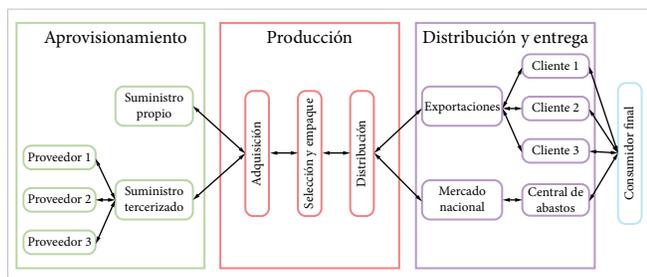


Figura 1. Cadena de suministro de una empresa agroindustrial.

ELABORACIÓN DEL DIAGRAMA CAUSAL

Posteriormente, se elaboró un diagrama causal (DC) donde se manifiestan las relaciones que las variables identificadas tienen unas con otras. La Figura 2 muestra un fragmento del DC correspondiente al producto en su presentación de 18 kg para el mercado de exportación.

Una variable tiene una influencia positiva en otra cuando estas dos son directamente proporcionales, lo cual es representado por una flecha con un símbolo positivo en su punta, y, contrario a esto, una variable tiene una influencia negativa en otra cuando estas dos son inversamente proporcionales, lo que es representado por una flecha con un símbolo negativo en su punta.

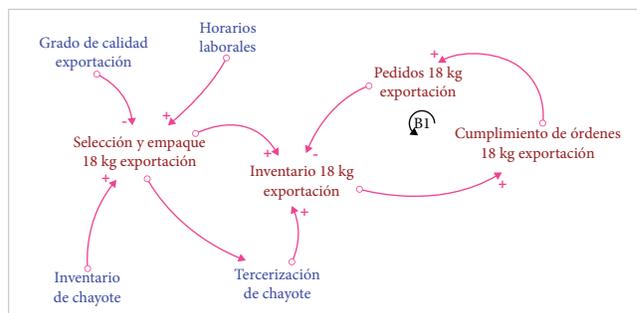


Figura 2. Diagrama causal.

CREACIÓN DEL DIAGRAMA DE FORRESTER

El siguiente paso fue la transformación del DC a un diagrama de Forrester, el cual no es más que la simulación del modelo estudiado.

El software elegido para el desarrollo del trabajo es Stella Architect®, el cual se ajusta con un Delta Time (DT = 1 hora) para trabajar hora por hora durante un año calendario (8761 horas).

Enseguida, se empezó con la construcción del diagrama de Forrester y para ello el modelo se dividió en “sectores”, cada con la programación de una parte específica del modelo, los cuales se detallan a continuación.

Primero se programó un calendario con el fin de identificar en qué momento del año simulado se encuentra el modelo con exactitud.

Las condiciones climatológicas se pronosticaron haciendo uso de modelos matemáticos. En particular, se eligió promedios móviles para la temperatura y la humedad, y promedios móviles dobles para la lluvia debido a que mostraron una confiabilidad del 90 % y 95 %, respectivamente, para pronosticar datos a un año calendario. Para alimentar a los modelos se consultó la base de datos de la NASA [13], donde los 8760 datos fueron descargados y canalizados al modelo de pronósticos.

Antes de implementarlos al modelo, se realizaron pruebas t apareada pronosticando las condiciones para el año 2021, arrojando una confiabilidad en los pronósticos del 95 % para la temperatura y la humedad, y un 90 % para la lluvia. Con el fin de ilustrar mejor lo anterior, en la Figura 3 se muestra el comportamiento de las variables pronosticadas contra los datos reales para la temperatura del 2021.

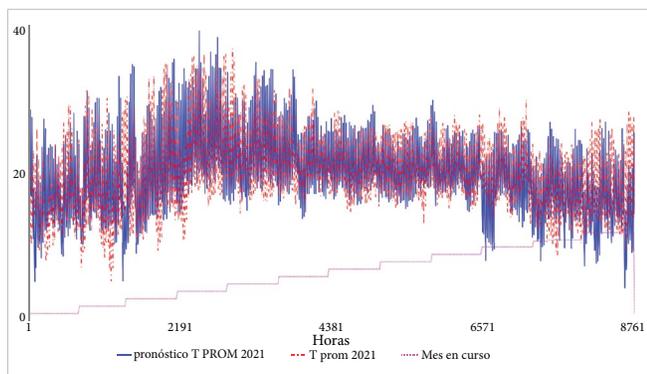


Figura 3. Comparación entre las temperaturas pronosticadas para 2021 vs. las temperaturas reales de 2021.

El modelo analiza cada dato pronosticado y detecta cuando una condición climática es desfavorable para el desarrollo del chayote, convirtiendo esta señal en merma para el cultivo.

Después de esto, el sistema calcula un rendimiento por huerta de acuerdo a variables como la superficie de cada huerta, la cantidad de charolas cosechadas en cada corte y su peso, entre otras.

El sistema es capaz de identificar cuando el cultivo sembrado está listo o no para ser cosechado, esto gracias a un sector dedicado al inicio y fin de la cosecha. Es importante mencionar que la empresa donde se realizó la investigación siembra sus huertas en dos partes con un desfase de tiempo, por lo que se tuvo cuidado con hacer esta diferencia en el modelo. Los rendimientos de todas las huertas analizadas se concentran en una variable llamada cosecha total para posteriormente ingresar a las bodegas de la empresa para iniciar con el proceso de selección y empaque.

Finalmente, se incluyó un sector dedicado al análisis mensual del cumplimiento de las órdenes de los clientes con el fin identificar los periodos de tiempo críticos en que no se podrán cumplir con ello, lo cual puede ayudar que se implementen estrategias oportunas que permitan contra arrestar esta situación.

VALIDACIÓN DEL MODELO

Para asegurar un buen funcionamiento lógico del modelo, se realizaron dos pruebas:

Consistencia dimensional: Se verificó que cada dimensión tenga un comportamiento lógico y esperado

de acuerdo a la situación analizada. Para ilustrar lo anterior, se presenta la gráfica de las temperaturas pronosticadas para el año 2022 (Figura 4).

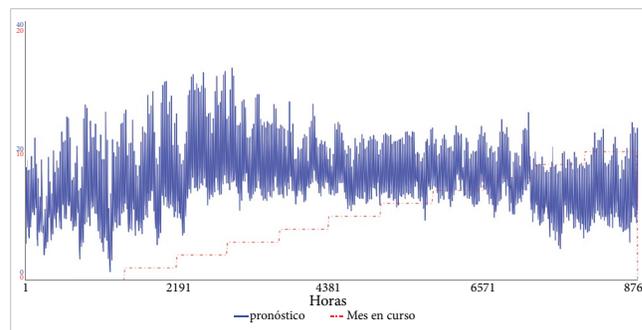


Figura 4. Pronóstico de la temperatura para el año 2022.

La gráfica demuestra que las temperaturas más altas tienen su registro en los meses de abril y mayo, mientras que las más bajas se presentan en noviembre, diciembre y enero. Con lo anterior se puede concluir que la variable analizada cumple con un comportamiento lógico esperado.

Valores extremos: Es una prueba dividida en dos partes: condición extrema inferior y condición extrema superior.

Para la condición extrema inferior a los valores de la superficie de cada huerta analizada se le asigna el valor cero y se obtienen los siguientes resultados en los inventarios (Figura 5).

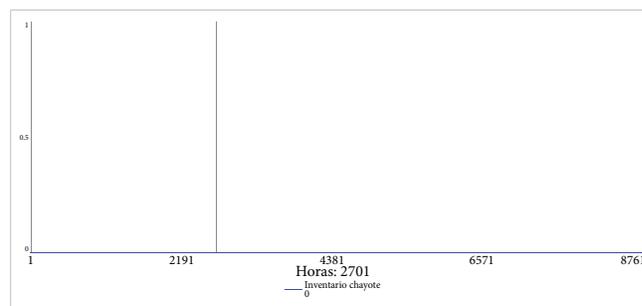


Figura 5. Prueba de valores extremos inferiores.

Se observa que al no haber superficie que cosechar, el inventario de chayotes durante todo el año permanece constante en cero, por lo cual se puede concluir que el comportamiento es el esperado

Para la condición extrema superior, la variable seleccionada para su modificación es la de embarque, la

cual hace referencia a la cantidad de chayote enviado al cliente en cada pedido. Si esta variable sufre una modificación en su valor a una cantidad exageradamente grande, la empresa no podrá completar ni una orden colocada por el cliente (Figura 6).

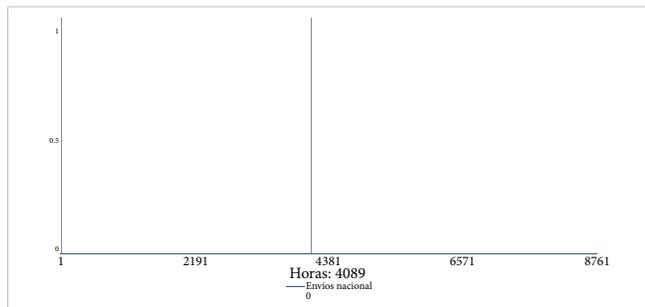


Figura 6. Prueba de valores extremos superiores.

Se observa que, al ser un pedido exageradamente grande, el inventario nunca alcanza a ser suficiente para mandarlo, por eso la variable envíos nacional permanece constante en cero, por lo cual se puede concluir que el comportamiento es el esperado.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para un uso más sencillo y amigable del modelo, se desarrolló una interfaz gráfica que permite visualizar e interpretar de forma más clara las variables analizadas, de forma tal que el agricultor sea capaz de tener un estimado del comportamiento de sus huertas y, de esta forma, establecer estrategias de venta que le permitan incrementar el nivel de satisfacción de sus clientes.

La página de inicio (Figura 7) es encargada de correr, pausar, resumir o detener la simulación del programa. Cuenta con una barra indicadora en la parte inferior de la ventana para mostrar gráficamente el estatus de carga del programa. Adicional a lo anterior, desde esta página se pueden acceder a las diferentes secciones del modelo de simulación, las cuales son: Cosecha 1, Cosecha 2, Ajustes generales, Inventario, Condiciones climatológicas y Resumen anual.

Como se mencionó anteriormente, la empresa siembra sus huertas en dos partes, motivo por el cual existen dos páginas dedicadas a la representación del comportamiento de cada una de ellas (Figura 8). Estas páginas contienen las mismas variables, indicadores y botones que se explican a continuación.

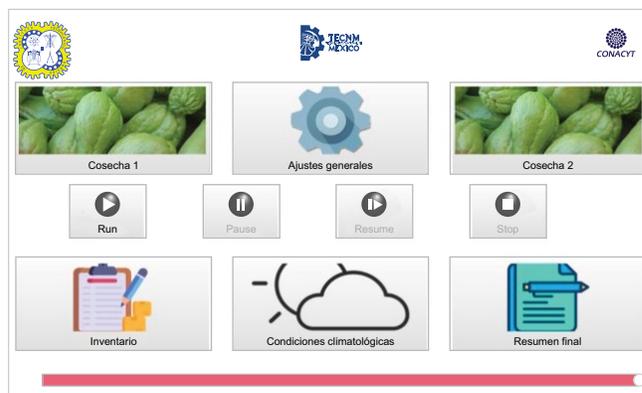


Figura 7. Página principal.



Figura 8. Página cosecha 1.

Las variables que el usuario puede modificar son día y mes del inicio de la cosecha, así como día y mes del fin de la misma. Los indicadores que el usuario puede ver son los rendimientos mensuales y anuales de cada huerta sembrada, así como una escala de colores tipo semáforo superpuesta en el mapa de las huertas. Además, cada página cuenta con sus respectivos botones de navegación para ir a las diferentes páginas del modelo, así como un botón para acceder a diferentes gráficas (Figura 9).

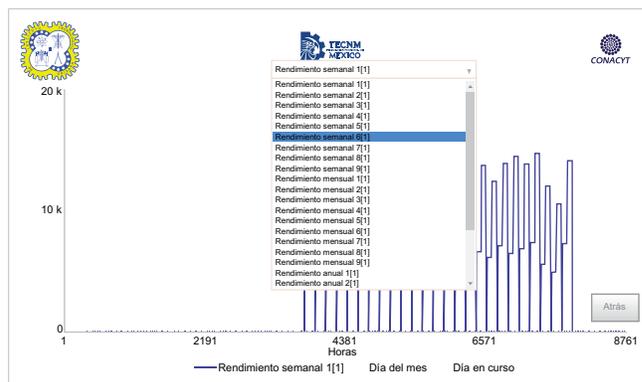


Figura 9. Gráficas de las cosechas 1.

La página Inventario (Figura 10) ofrece información en cuanto a tres tipos de inventario:

- **Inventario chayotes:** Cuantifica la cantidad total de chayote que la empresa cosecha en todas las huertas.
- **Inventario exportación:** Cuantifica el chayote seleccionado para el mercado de exportación.
- **Inventario nacional:** Cuantifica el chayote seleccionado para el mercado nacional.

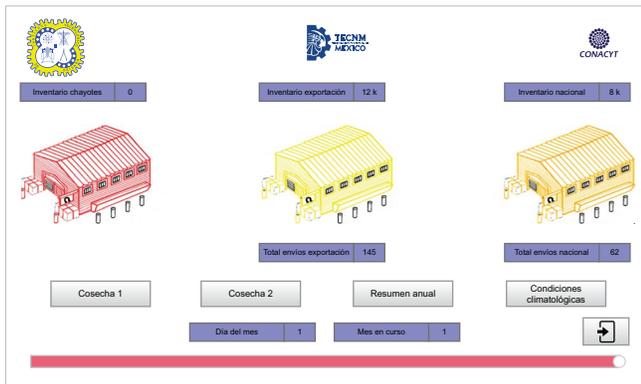


Figura 10. Página inventario.

De igual forma, el modelo es capaz de mostrar un resumen mensual acerca del cumplimiento de órdenes para los mercados nacionales y de importación (Figura 11)

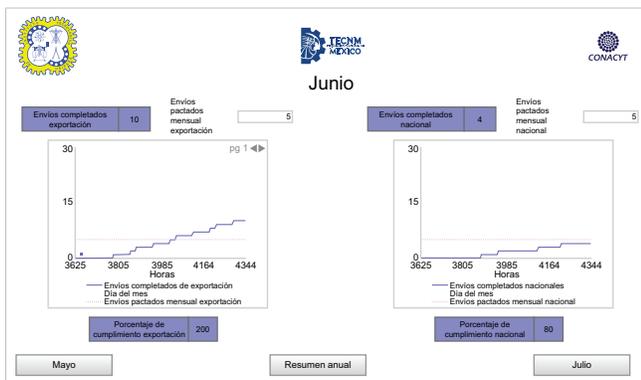


Figura 11. Resumen del mes de junio.

Es importante hacer mención que el usuario puede modificar el número de pedidos pactados para el envío de cada mercado y de esta forma se puede ver gráficamente si se alcanzará o no el objetivo.

El usuario tiene un concentrado de todas las variables que es capaz de modificar (Figura 12). Es importante señalar que una vez que el usuario modifique la variable

que desee, hay que volver a la página de inicio para correr el modelo y que el cambio haga efecto.

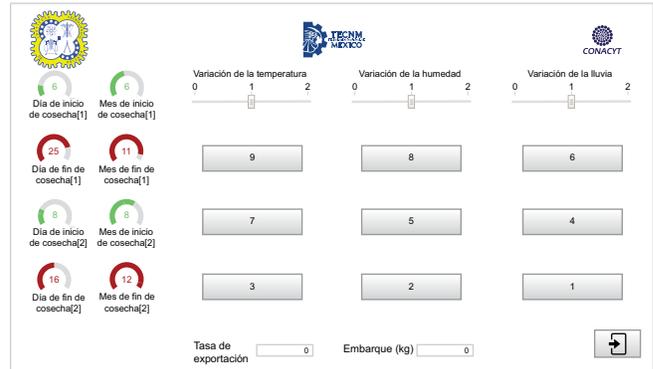


Figura 12. Página de ajustes generales.

Adicional a esto, cada huerta analizada dispone de un botón en el cual, haciendo clic, el programa desplazará una nueva ventana (Figura 13) donde aparecerán nuevas variables modificables por el usuario.

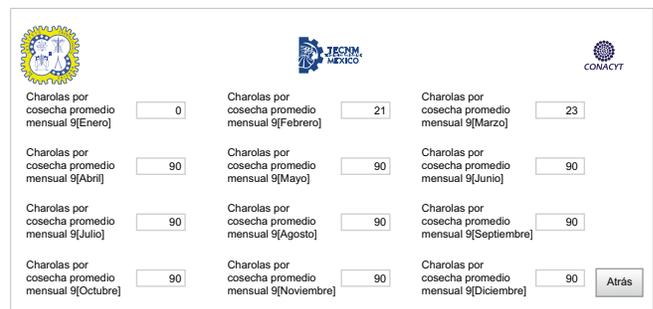


Figura 13. Página de parámetros modificables para cada huerta.

Finalmente, el modelo cuenta con una página donde se muestran las gráficas que representan a las variables climáticas pronosticadas por el modelo de simulación y, de igual manera, se cuenta con tres controles deslizantes para modificar el pronóstico calculado por el programa, tal como se muestra en la Figura 14.

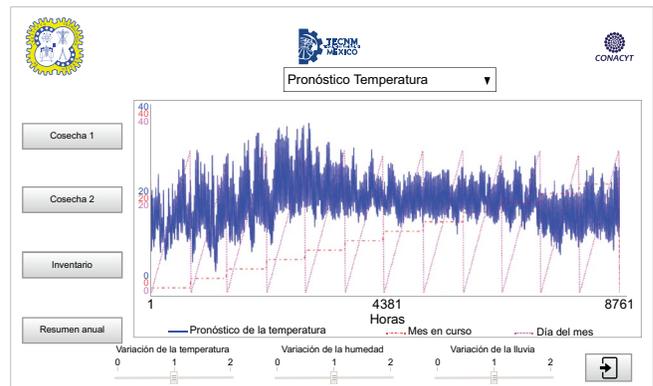


Figura 14. Página de condiciones climatológicas.

Finalmente, el modelo se presentó ante los expertos en el tema. Como prueba final, se comparó los resultados obtenidos en el modelo contra los datos históricos registrados por la empresa donde se llevó a cabo el proyecto, arrojando un error máximo del 10 %.

IV. CONCLUSIONES

El simulador no solo arrojó resultados muy importantes para la empresa, sino también permite llegar a conclusiones muy significativas durante el análisis del comportamiento de la siembra del chayote a lo largo del ciclo de cosecha, como lo son los siguientes:

- Si bien es cierto que existen muchas variables que impactan al proceso productivo del chayote, se determinó que las que tienen una mayor influencia en él son variables totalmente incontrolables por los productores, como lo son las condiciones climáticas.
- Una variación en las variables críticas identificadas en la cadena de suministro desencadena un efecto dominó, haciendo que la satisfacción del cliente se vea afectada. Por tanto, volvieron a ser identificadas las variables inciertas como las más desestabilizantes.
- Al momento de presentar el proyecto a los directivos de la empresa donde se llevó a cabo, estos quedaron muy satisfechos pues vieron en el sistema no solo una manera de saber sus tasas de satisfacción al cliente, sino la oportunidad de desarrollar estrategias que permitan elevarla y el momento oportuno para aplicarlas.
- En adición a lo anterior, el sistema permite identificar los tiempos de crisis en la cosecha del chayote y su posible razón, gracias a lo cual se pueden implementar estrategias en campo para contrarrestar dichas situaciones.

Es muy importante señalar que el trabajo desarrollado no predice el futuro, pero, como su nombre lo indica, pronostica y prevé posibles escenarios con una tasa de confiabilidad muy alta. Para comprobar lo anterior, se compararon los datos arrojados por el simulador para el mes de septiembre de 2022 contra los datos reales de la empresa, obteniendo un error del 3 %. Gracias a esto, se puede confiar en el simulador para tomar decisiones oportunas en base a sus pronósticos, como estrategias de ventas a corto plazo.

REFERENCIAS

- [1] SIAP. “Chayote, hortaliza que pertenece a la familia de las calabazas contribuye a la salud”. Gob.mx. <https://www.gob.mx/siap/articulos/chayote-hortaliza-que-pertenece-a-la-familia-de-las-calabazas-contribuye-a-la-salud> (accedido en: ag. 15, 2022).
- [2] H. Avendaño, J. Cadena, M. L. C. Arévalo, E. Campos, V. M. Cisneros y J. F. Aguirre, *Las variedades del chayote mexicano, recurso ancestral con potencial de comercialización*, 1.ª ed. México: GISEM, 2010, pp. 88. [En línea]. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/231856/Las_variedades_del_chayote_mexicano.pdf
- [3] J. Nataren-Velazquez, A. L. Del Angel-Pérez, J. Valente Megchún-García, E. Ramirez-Herrera, C. A. Hernandez-Estrada, I. Meneses-Marquez, “Caracterización del cultivo de chayote (*Sechium edule Jacq*) (Swartz) en la zona de Altas Montañas del estado de Veracruz”, *RINDERESU*, vol. 5, no. 1, pp. 134-152, sept., 2020. [En línea]. Disponible en: <http://rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/52/56>.
- [4] L. R. Izquierdo, J. M. Galán, J. I. Santos y R. Del Olmo, “Modelado de sistemas complejos mediante simulación basada en agentes y mediante dinámica de sistemas”, *EMPIRIA*, no. 16, pp. 85-112, 2008. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/2971/297124024004.pdf>.
- [5] S. A. David, D. D. Quintino, C. M. C. Inacio Jr. y J. A. T. Machado, “Fractional dynamic behavior in ethanol prices series”, *J. Comput. Appl. Math.*, vol. 339, 2018, pp. 85-93, doi: 10.1016/j.cam.2018.01.007.
- [6] M. V. Turdera, “Energy balance, forecasting of bioelectricity generation and greenhouse gas emission balance in the ethanol production at sugarcane mills in the state of Mato Grosso do Sul”, *Renew. Sust. Energy. Rev.*, vol. 19, 2013, pp. 582-588, doi: 10.1016/j.rser.2012.11.055.
- [7] L. G. Tapia, “The effects of oil price volatility on ethanol, gasoline, and sugar price forecasts”, *Energy*, vol. 181, 2019, pp. 1012-1022, doi: 10.1016/j.energy.2019.05.067.
- [8] A. Sanchez y D. Gomez, “Analysis of historical total production costs of cellulosic ethanol and forecasting for the 2020-decade”, *Fuel*, vol. 130, 2014, pp. 100-104, doi: 10.1016/j.fuel.2014.04.037.

- [9] D. C. Tascón y O. Díaz, “Air traffic forecast and its impact on runway capacity. A System Dynamics approach”, *J. Air Transp. Manag.*, vol. 90, p. 101946, 2021, doi: 10.1016/j.jairtraman.2020.101946.
- [10] Y. He, J. Jiao, Q. Chen, S. Ge, Y. Chang y Y. Xu, “Urban long term electricity demand forecast method based on system dynamics of the new economic normal: The case of Tianjin”, *Energy*, vol. 133, 2017, pp. 9-22, doi: 10.1016/j.energy.2017.05.107.
- [11] W. Wang, K. Li, Y. Liu, J. Lian y S. Hong, “A system dynamics model analysis for policy impacts on green agriculture development: A case of the Sichuan Tibetan Area”, *J. Clean. Prod.*, vol. 371, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.133562.
- [12] W. Zhou, A. Moncaster, E. O’Neill, D. M. Reiner, X. Wang, P. Guthrie, “Modelling future trends of annual embodied energy of urban residential building stock in China”, *Energy Policy*, vol. 165, 2022, doi: 10.1016/j.enpol.2022.112932.
- [13] *POWER | Data Access Viewer*, National Aeronautics and Space Administration, ag. 16, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la empresa agroindustrial el tiempo y buena disposición para brindar no solo los datos necesarios para llevar a cabo la investigación, sino la asesoría en todo momento.

También se agradece al CONAHCYT la beca de maestría que sirvió de soporte, entre otras cosas, para la realización del trabajo presentado.

Finalmente, se reconoce el apoyo del investigador Dr. Cuauhtémoc Sánchez Ramírez, quien en todo momento tuvo fe en el proyecto y colaboró en la supervisión del mismo.