

Modelado y simulación de la cadena productiva del cacao en Colombia

Modelling and simulation of the Colombian cocoa production chain

DOI: <https://doi.org/10.17981/ingecuc.14.1.2018.13>

Artículo de investigación científica. Fecha de recepción:01/03/2018. Fecha de aceptación:23/05/2018.

Eliécer Pineda Ballesteros 

Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Bucaramanga (Colombia).
epinedaba@gmail.com

Freddy Reynaldo Téllez Acuña 

Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Bucaramanga (Colombia).
freddy.tellez@gmail.com

Para citar este artículo:

E. Pineda Ballesteros y F. R. Téllez Acuña, "Modelado y simulación de la cadena productiva del cacao en Colombia," INGE CUC, vol. 14, no. 1, pp. 141-150, 2018. DOI: <https://doi.org/10.17981/ingecuc.14.1.2018.13>

Resumen

Introducción– Este artículo presenta los resultados de una investigación cuyo objetivo fue el modelado y simulación de la cadena productiva del cacao en Colombia. Esta investigación estuvo financiada por la Universidad Nacional Abierta y a Distancia.

Objetivo– El objetivo de este artículo es presentar un modelo de simulación de la cadena productiva del cacao en Colombia.

Metodología– Para el abordaje de esta investigación, se tuvo en cuenta autores como Absalón Machado, quien ofrece un marco teórico para asumir el entendimiento de los sistemas agroalimentarios, y se trabajó bajo una perspectiva sistémica. Se realizó un modelo usando la dinámica de sistemas, que se basa en la noción de la realimentación, los rezagos en el tiempo, la idea de acumulación y la razón de cambio, propias del cálculo diferencial e integral, haciendo un trabajo de campo en términos de observación directa de cultivos y plantas procesadoras del cacao internacionales.

Resultados– Se obtuvo un modelo matemático que recrea el comportamiento de la cadena productiva del cacao y se ajusta al comportamiento de la cadena para el horizonte temporal estudiado. El modelo puede ser usado para comprender la dinámica propia de la cadena en conjunto sobre la base de los flujos de información y material en el sistema.

Conclusiones– Se concluye que el uso de modelos de dinámica de sistemas, que representan una cadena productiva, puede ser empleado para potenciar procesos de toma de decisiones a partir de la experimentación simulada. Esto permite ganar en comprensión de la dinámica propia de la cadena productiva. Además, se pone en evidencia que la percepción in situ de los fenómenos a ser modelados favorece una mejor representación de los mismos.

Palabras clave– Cacao; cadena productiva; experimentación; modelado; simulación

Abstract

Introduction– This paper presents the results of a research project. The objective was the creation of a model and simulation of the cocoa production chain in Colombia. It was funded by the Universidad Nacional Abierta y a Distancia.

Objective– The purpose of this paper is to present a simulation model of the cocoa production chain in Colombia.

Methodology– For the approach to this research, authors such as Absalón Machado --who offers a theoretical framework to present the understanding of agri-food systems--, were taken into account. A systemic perspective was also implemented for the research. In fact, it was modelled using system dynamics, which is based on the notion of feedback, delays in time, the idea of accumulation and reason for change, typical of differential and integral calculation. In this way, field work was carried out in terms of direct observation of international cocoa crops and processing plants.

Results– A mathematical model that recreates the behavior of the cocoa production chain was obtained and was adjusted to the behavior of the chain for the time horizon studied. The model can be used to understand the dynamics of the chain as a whole based on the flows of information and material in the system.

Conclusions– It is concluded that the use of system dynamic models, which represent a productive chain, can be used to promote decision-making processes based on simulated experimentation. This allows us to gain an understanding of the dynamics of the productive chain. Furthermore, it is evident that in situ perception of the phenomena to be modelled promotes a better representation of them.

Keywords– Cocoa; production chain; experimentation; modelling; simulation

I. INTRODUCCIÓN

Este artículo presenta los resultados de una investigación que tuvo como objetivo modelar la cadena productiva del cacao en Colombia usando la metodología de la dinámica de sistemas [1] y la observación *in situ* de los eslabones de la cadena.

La cadena productiva del cacao en Colombia se ve afectada por el comportamiento de los precios del cacao en el mercado internacional. Durante el año 2017, el precio se mantuvo oscilando alrededor de 2090 dólares por tonelada, mientras que su precio promedio, entre el 2014 y el 2016, fue de 3029 dólares por tonelada [2], lo que implica una caída de cerca del 33%. Lo anterior se explica, en gran medida, por la sobreproducción de cacao, pues según el presidente de la Fedecacao [3], entre 2016 y 2017, hubo un excedente de producción de los principales productores de cacao a nivel mundial de cerca de 300 mil toneladas y una sensible disminución de la demanda durante los últimos cuatro años. Los datos muestran que la variable *precios* presenta un comportamiento incierto [4], dificultando el accionar de los agentes asociados a los eslabones de la cadena productiva. Este comportamiento incierto es una característica connatural a los fenómenos económicos [5] y suele ser tratada con herramientas como la econometría [6] mediante funciones de tipo estocástico [7], que no dan cuenta de cómo se genera el comportamiento.

En este contexto, la comprensión de la manera en que opera la cadena productiva del cacao puede ser de mucha utilidad pues ayudaría, de un lado, a orientar la toma de decisiones con un menor grado de incertidumbre [8] y, de otro, podría contribuir para realizar lo que [9] denomina la configuración de la asociatividad empresarial en cadenas productivas agropecuarias. Si se revisa la variación anual de los precios, se pueden observar ciclos que parecen coincidir con la decisión de sembrar cacao cuando los precios comienzan a subir. La cuestión es que el efecto de esa siembra solo se percibe a los cuatro o cinco años después, cuando se da la producción de las plantas de cacao sembradas. Por ejemplo, en el año 2000 se da un incremento del precio, lo que se supone motiva la siembra de cacao, pero el efecto de la siembra solo se aprecia cuatro años después, y es cuando, en 2004, el precio del cacao baja por la sobreoferta del grano. De igual forma, se podrían analizar otros periodos de incremento y decremento de precios, tomando en cuenta lo que [10] denomina comportamiento contra-intuitivo de los sistemas sociales. Para ello, se apoya en el uso de las TIC, que, en palabras de [11], pueden propiciar un aporte significativo en el crecimiento económico.

Tomando lo anterior en consideración, se propuso una investigación cuyo propósito era modelar la cadena productiva del cacao en Colombia usando la dinámica de sistemas. Para el abordaje de la investigación se tuvo en cuenta a autores como [12], quienes ofrecen un marco teórico para la comprensión de

los sistemas agroalimentarios. Se realizó un modelo usando la metodología de la dinámica de sistemas, que, según [13], se soporta en la idea de sistema, la noción de realimentación y los retardos en el flujo de información y materiales.

II. REVISIÓN DE LITERARIA

Existen trabajos previos, como el planteado por [14], sobre la cadena productiva del cacao, en el que la cadena se describe desde una perspectiva funcional, pues se hace determinando las características económicas de la misma y las tendencias de valores asociados a la oferta y demanda y demás categorías económicas. Además, en [15] se pueden encontrar otros enfoques de modelado, como la programación lineal entera mixta y la programación estocástica entera mixta. La propuesta de modelo aquí presentada se concentró especialmente en caracterizar la cadena desde una perspectiva sistémica, pues, según [16], se pueden identificar en ella sistemas y subsistemas y sus componentes estructurales en términos de flujos de material y de información. El hecho de que existan abundantes experiencias economicistas en la descripción de las cadenas productivas conduce hacia un particular entendimiento de la dinámica propia de dichas cadenas. Este hecho desencadena situaciones como la toma de decisiones sobre la base de las tendencias. Por el contrario, el modelado estructural, según [17], permite generar comportamientos factibles, los cuales son el resultado de las interacciones estructurales del sistema y, por tanto, se constituyen en un buen apoyo para la toma de decisiones.

Uno de los principales antecedentes referidos a la representación de las cadenas de suministro se encuentra en [18], en donde se efectuó una explicación satisfactoria del efecto látigo o efecto *bullwhip*, referido también en [19]. En [20] se usa la dinámica de sistemas para realizar comparaciones de flujos y cadenas de envejecimiento. Así mismo, los efectos dinámicos que tienen las cadenas de suministro por la presencia de demoras o retardos en su proceso de acondicionamiento fueron estudiados por [21], quienes examinaron los efectos dinámicos en los procesos condicionantes para comprender las inestabilidades potenciales en una cadena de suministro.

En la Universidad de Cartagena [22], construyeron un modelo en dinámica de sistemas para dar cuenta del comportamiento de la cadena productiva de la yuca y el ñame, esto en el departamento de Bolívar, evaluando escenarios de simulación relacionados con las variables “hectáreas cosechadas” y “rendimientos por hectárea”. En esta misma zona del país, se realizó el estudio de la cadena productiva de las hortalizas y las frutas del sur de Bolívar por [23] usando la simulación de escenarios o prospectiva. En esta misma línea de trabajo, en [16], se presenta un libro sobre modelado dinámico y estratégico de la cadena agroindustrial de frutas.

La cadena productiva de la papa, caracterizada por tener una gestión organizada de forma ineficiente que genera costos elevados de operación, precios elevados al consumidor y calidad baja del producto, fue modelizada por [24]. Con ese modelo buscaban dar cuenta del comportamiento del producto en cada una de las etapas de la cadena, y, a partir de ahí, formular políticas acerca de los recursos disponibles y requerimientos. En [25] y [26] se expone el análisis prospectivo y el papel y la influencia que ejerce la fuerza de trabajo en la cadena productiva del mango en la provincia del Tequendama (Cundinamarca) con el propósito de hacer comparaciones del mercado interno frente al mercado externo a partir de la determinación del escenario prospectivo más conveniente para los productores. En otro trabajo realizado por [27], los autores exponen una aproximación al modelado del eslabón primario de la cadena productiva del cacao con el propósito de apoyar el aprendizaje sobre el proceso de esta cadena, en el sentido que lo expresa [28] cuando señala que un modelo es un sistema complejo que conduce a procesos de aprendizaje. Cuando los actores de una cadena asumen diferentes roles de manera interactiva, en opinión de [29] y de [30], el uso de la experimentación simulada, aunado a las técnicas prospectivas, se constituyen en una alternativa que posibilita la construcción de futuros deseables.

III. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del proceso de modelado se asumió una perspectiva sistémica en el sentido expresado por [31]. Estos autores definen el pensamiento sistémico como una herramienta conceptual que posibilita al observador percibir el mundo como si éste fuera un sistema, y, de esta forma, aplicar las propiedades de los sistemas para dar cuenta de su comportamiento. En este sentido la cadena productiva y su planificación pueden, según [32], ser vistas como si fueran un sistema.

Se usó la dinámica de sistemas como metodología de modelado, creada en los años cincuenta por el profesor Jay W. Forrester del MIT. La dinámica de sistemas se soporta en cuatro fundamentos conceptuales: la noción de acumulación, la razón de cambio, la realimentación y los retardos en el tiempo, necesarios todos ellos para representar los fenómenos naturales que pueden ser vistos como sistemas dinámicos.

Para la comprensión del constructo de cadena productiva se acudió a [33], quien afirma que fueron Hirschman y Porter los que con sus aportaciones teóricas posibilitaron el surgimiento del concepto económico de cadena productiva. Hirschman sostiene que el éxito en la generación de riqueza, a nivel organizacional, se debe, principalmente, a los “encadenamientos” de cooperación. Por su parte, Porter afirma que articularse de forma eficiente, por parte de las empresas, en torno de una “cadena de valor”, permite la generación de ventajas competitivas, y así mismo, una generación eficiente de riqueza para estas. Según [33], la cadena productiva se puede entender como si fuera un sistema, es decir, “como un conjunto de unidades económicas integradas alrededor de la producción de un bien o servicio, que van desde los productores de materias primas hasta el consumidor final”.

En la Fig. 1 se identifican los elementos presentes en la definición propuesta por el Departamento Nacional de Planeación (DNP), además de otros elementos importantes, como la información y el dinero que son dos elementos que fluyen de forma circular, generando los ciclos de realimentación. Esta característica no suele ser considerada en las lecturas economicistas de la cadena productiva, pues suele generar problemas como la autocorrelación y la heteroscedasticidad. Lo que ha sido expuesto previamente corresponde con lo planteado por Hirschman, citado por [33], y que se relaciona con la presencia de encadenamientos hacia adelante y hacia atrás.

En este contexto se circunscribe la cadena productiva del cacao, la cual se compone de tres eslabones acordes con cada etapa del procesamiento industrial del cacao: eslabón primario, eslabón de transformación y eslabón de comercialización. El primer eslabón lo componen la siembra, la cosecha y la post-cosecha; los actores de este eslabón son los agricultores y productores de insumos. La transformación, eslabón altamente concentrado en pocas unidades de producción, se constituye en el dinamizador de la cadena. En él se procesa el grano produciendo licor, pasta, manteca y polvo de cacao, chocolatería y confitería de cacao; este eslabón está compuesto por las industrias transformadoras de cacao y por las productoras de chocolate de mesa. El eslabón de comercialización abarca el mercadeo tanto a nivel interno como externo.



Fig. 1. Esquema de cadena productiva.
Fuente: Adaptado de [33].

A. Metodología de modelado

Para la construcción del modelo se siguieron los lineamientos metodológicos propuestos por [13], [17] y [31] sobre el modelado con dinámica de sistemas. Para una exposición más amplia del concepto de modelado se puede consultar [34]. Inicialmente, se hizo una modelización cualitativa, que consiste en describir el fenómeno a ser modelado mediante una narrativa que va dando cuenta de dicho fenómeno a través de una descripción de las principales variables y las relaciones entre ellas para posteriormente elaborar un diagrama causal. Este diagrama (Fig. 3) es un grafo dirigido y signado, en donde los nodos corresponden a las variables y los enlaces se asocian con las conexiones entre las variables; este entramado define la estructura del fenómeno. En esta parte del modelado se identifican los ciclos de realimentación y los retardos presentes en el fenómeno, propiedades que caracterizan a la dinámica de sistemas. Seguidamente se identifican las razones de cambio y acumulaciones a partir del diagrama causal y se proponen las ecuaciones en diferencias que permitirán la solución computarizada del modelo mediante análisis numérico. Esta fase concluye con el diagrama de Forrester (Fig. 4). Finalmente, se realiza la validación del modelo según [35] y el diseño de escenarios de simulación. De esta forma, se lleva a cabo la experimentación simulada que posteriormente se puede usar para apoyar los procesos de toma de decisiones [8].

Para la construcción del modelo inicialmente se realizó una capacitación en modelado y simulación con dinámica de sistemas, la cual estuvo dirigida a los investigadores del proyecto, comenzando por una revisión conceptual del pensamiento sistémico como paradigma fundante de la dinámica de sistemas. Luego, se capacitaron en el uso de la dinámica de sistemas, y finalmente, se revisó la temática correspondiente a la toma de decisiones soportada por modelos de simulación. Una vez capacitados los investigadores, se llevó a cabo la observación del eslabón primario y el de la producción de cacao, tanto en forma tradicional como en cultivos tecnificados

mediante visitas de campo. Se realizaron también visitas, acompañados de técnicos de Fedecacao, a fincas de San Vicente de Chucurí en Santander y a fincas de Rivera en el Huila. De estas visitas preliminares se obtuvieron datos relacionados con la forma en que se produce el grano de cacao. Las visitas permitieron realizar una observación *in situ* del proceso, posibilitando la estructuración de la hipótesis dinámica, [36], que luego se modeló matemáticamente.

A partir de artículos científicos, trabajos de grado e informes técnicos de Fedecacao, se copiaron y procesaron una serie de datos que se constituyen en los modos de referencia para la construcción y validación del modelo. A continuación, en la Fig. 2, se muestran los datos correspondientes a la producción de cacao en Colombia dada en toneladas por año entre 1990 y 2014.

Seguidamente, en la etapa de formalización, se materializaron las hipótesis dinámicas en diagramas de influencias y, estos a su vez, en diagramas de Forrester. La parte de conceptualización implicó, como se dijo antes, la visita a los cultivos de cacao en los departamentos de Santander y Huila en Colombia, la zona productora de cacao de Tabasco en México y a una planta procesadora de cacao en Villahermosa, México. Se visitaron en total 9 haciendas productoras de cacao, en Colombia 6 y en México 3. De esas visitas se obtuvieron datos relacionados con los tiempos de siembra, de cosecha y beneficio del cacao. En el estado de Tabasco, en México, se visitó una empresa transformadora de cacao, lográndose obtener datos relacionados con el proceso de transformación del grano y los productos generados. El modelo construido se validó en cuanto a estructura y límites del sistema, según se propone en [35].

II. RESULTADOS

A. Diagrama causal

Tomando en cuenta la información obtenida previamente, se planteó el diagrama de influencias o causal de la cadena productiva del cacao de la siguiente forma (Fig. 3).

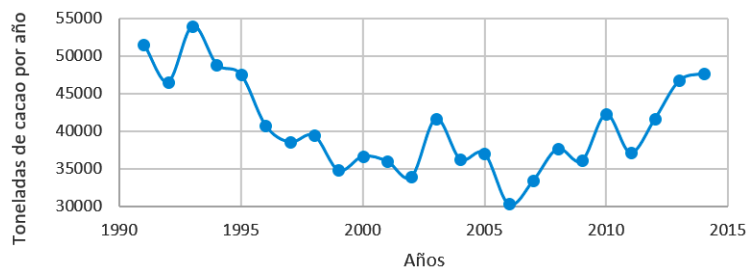


Fig. 2. Producción anual de cacao en Colombia (1990-2014). Fuente: Fedecacao.

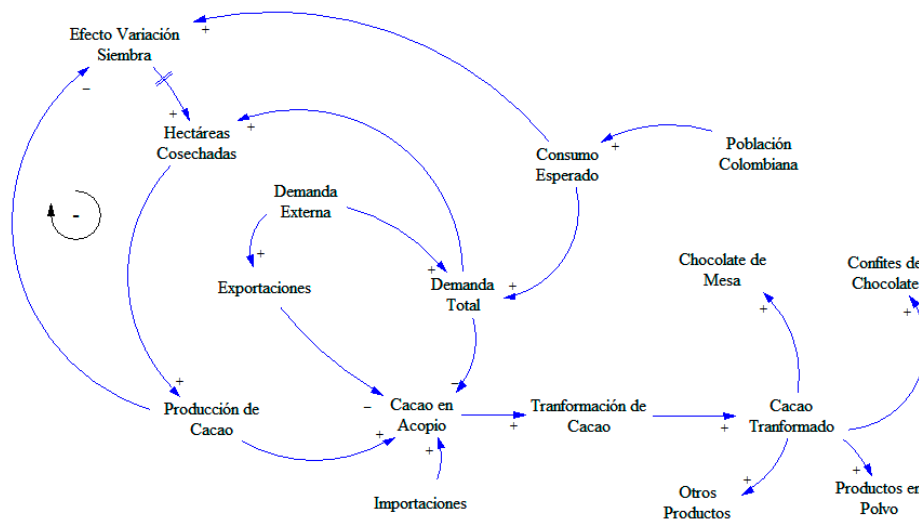


Fig. 3. Diagrama causal.
Fuente: Elaboración propia.

La primera parte representada corresponde a las hectáreas cosechadas que consideran dos elementos importantes; por una parte, la tendencia que puede ser atribuida al crecimiento poblacional y, de otra parte, una tendencia estocástica que engloba otros fenómenos, como el clima y la variación de los precios del cacao. Esto corresponde al eslabón primario de la cadena. La segunda parte corresponde a la etapa de acopio y transformación del grano de cacao, los cuales reciben influencias de las importaciones, exportaciones, la producción y la transformación de cacao. Finalmente, se modela la demanda interna del cacao teniendo como principal causa el crecimiento de la población colombiana, el consumo *per cápita* y el consumo aparente.

Es importante notar el recorrido circular que puede realizarse a través de las variables del diagrama causal (Fig. 3). Es precisamente esta característica la que no es habitualmente considerada en las representaciones economicistas, pues puede traer problemas como la autocorrelación [37].

Las principales variables del diagrama causal son: la variable “hectáreas cosechadas” que es influenciada por la “demanda total” y la “siembra”; la “demanda total”, a su vez, es afectada por el “consumo esperado” y la “demanda externa”. La siguiente variable en importancia es la “producción de cacao”, la cual es influenciada por la “cantidad de hectáreas cosechadas” y la “cantidad de cacao en acopio”, y, además, es afectada por el “rendimiento por hectárea”. El “cacao en acopio” es afectado por “producción de cacao”, la “demanda total”, las “importaciones”, las “exportaciones” y la “transformación de cacao”. Finalmente, se tiene la variable “cacao transformado” que da origen a los productos como el “chocolate de mesa”, los “confi-

tes de chocolate” y demás subproductos, que serán demandados por la población.

Conviene señalar, para aquellos lectores neófitos en dinámica de sistemas, que los signos al final de cada una de las relaciones establecen el tipo de influencia de una variable sobre otra; por ejemplo: en la relación que va de “exportaciones” a “cacao en acopio”, el signo es negativo (-), lo cual debe entenderse como que a un aumento de las “exportaciones” le sobreviene una disminución al “cacao en acopio”; caso contrario ocurre en la relación entre “importaciones” y “cacao en acopio”, pues el signo es positivo, indica que un aumento en las “importaciones” produce un incremento en “el cacao en acopio”. Es importante recalcar que las variaciones no son necesariamente proporcionales y, además, que los signos positivos o negativos no connotan las relaciones como buenas o malas en el sentido común.

B. Ecuaciones de estado del modelo

Tomando en cuenta el diagrama de influencias anterior se diseñó un sistema de ecuaciones de estado que, al ser resueltas de manera numérica con ayuda del computador, permite generar gráficos de comportamiento que pueden ser usados para dar cuenta de la dinámica asociada al fenómeno.

$$PC(t + \nabla t) = PC(t) + \nabla t * TIP \quad (1)$$

En donde PC es la población colombiana y TIP es la tasa de incremento poblacional.

$$HC(t + \nabla t) = HC(t) + \nabla t * VH \quad (2)$$

En donde HC son las hectáreas cosechadas y VH es la variación anual de las hectáreas cosechadas.

$$CA(t + \nabla t) = CA(t) + \nabla t * (PCA + IMPC - TRC - EXPC) \quad (3)$$

En donde CA es el cacao en acopio, PCA es la producción de cacao, $IMPC$ es la importación de cacao, TRC es la transformación de cacao y $EXPC$ son las exportaciones de cacao.

$$CT(t + \nabla t) = CT(t) + \nabla t * (CA - CHM - PP - CCH - OPP) \quad (4)$$

En donde CT es el cacao transformado, CA es el cacao en acopio, CHM es el chocolate de mesa, PP son los productos en polvo, CCH son confites de chocolate y OPP son otros productos en polvo.

Al final del presente artículo se agrega un apéndice con las ecuaciones restantes del modelo.

C. Diagrama de Forrester

En la Fig. 4 se presenta un diagrama de Forrester de la cadena productiva del cacao, que incluye las ecuaciones de estado previamente definidas además de las variables de flujo y las variables auxiliares necesarias para realizar los cálculos numéricos, que en este caso fueron hechos usando el software Vensim[®], versión académica. También se destacan cada uno de los elementos que constituyen el diagrama de influencias o causal, además de otras variables que son necesarias para calcular las razones de cambio responsables de la dinámica de las variables de estado.

Cabe resaltar el efecto retardado que sobre las “hectáreas cosechadas” produce la diferencia entre el “consumo esperado” y la “producción de cacao”. Es evidente que este efecto no es inmediato, pues la decisión de sembrar implica un tiempo de retardo hasta que la planta está en capacidad de producir, tiempo estimado en cuatro años a partir de los datos obtenidos en las visitas técnicas realizadas a los cultivadores de cacao.

D. Comportamiento del modelo

Luego de construido el diagrama de Forrester, se procedió a calibrar el modelo teniendo como referencia los datos obtenidos en las visitas técnicas y los datos recolectados en los informes de Fedecaco. En la Fig. 6 se pueden observar los resultados de simulación para un horizonte temporal comprendido entre 1991 y 2025.

La Fig. 5, que corresponde al periodo comprendido entre 1991 y el 2014, muestra el comportamiento de la variable “producción de cacao”, que al ser comparada con la Fig. 2, muestra que el modelo es capaz de recrear el comportamiento de referencia, es decir, que estructuralmente el modelo puede dar cuenta del fenómeno pues las gráficas son cualitativamente similares teniendo en cuenta que la producción de cacao depende de las hectáreas cosechadas y el rendimiento por hectárea. Además, al realizar una validación por coeficiente de determinación mediante un análisis de regresión simple, se encontró que el modelo tiene un $R^2 = 0.98$ (Tabla I).

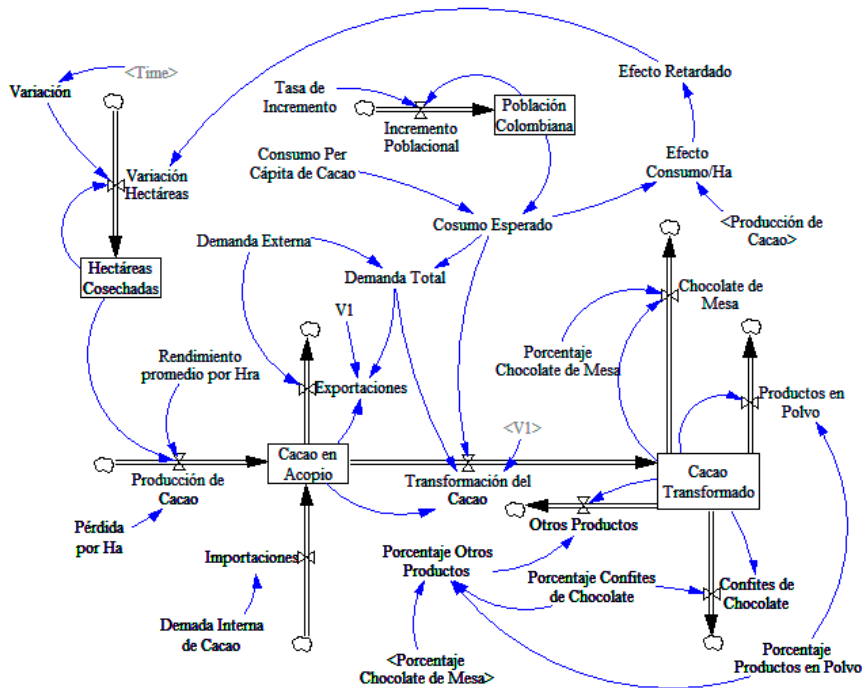
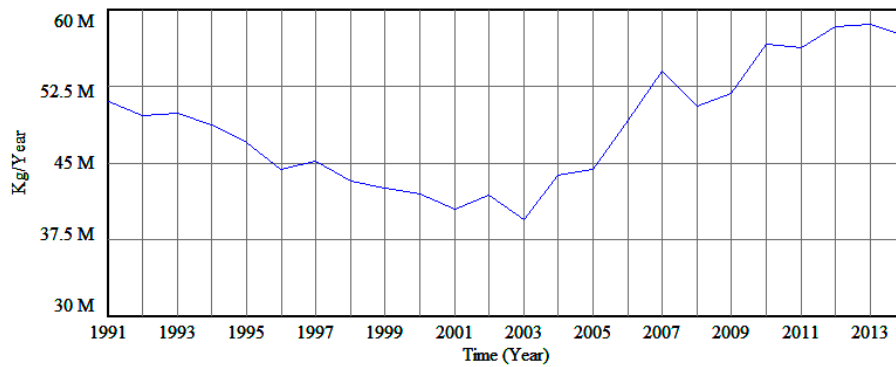


Fig. 4. Diagrama de Forrester. Fuente: Elaboración propia.



Producción de Cacao : Corridal

Fig. 5. Producción de cacao.
Fuente: Vensim Ple.

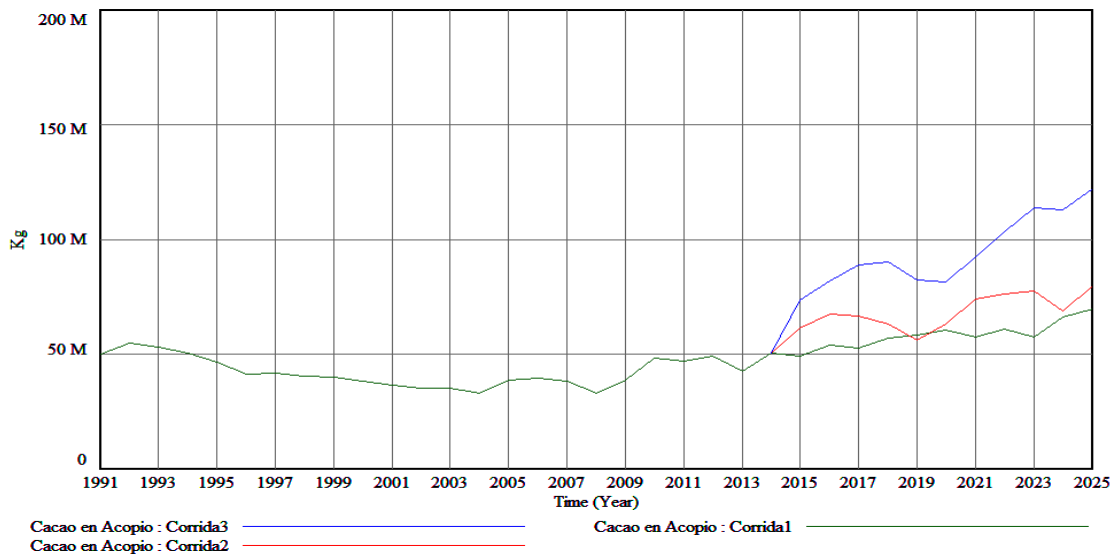


Fig. 6. Cacao en acopio.
Fuente: Vensim Ple.

TABLA I. VALIDACIÓN POR COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN.

Estadísticas de la regresión	Valor
Coefficiente de correlación múltiple	0,987877917
Coefficiente de determinación R ²	0,975902779
R ² ajustado	0,930448233
Error típico	6456,485798
Observaciones	23

Fuente: Elaboración propia.

La fig. 6 muestra el comportamiento del cacao en acopio resultante de haber variado el parámetro

“rendimiento por hectárea”, pasando de 410 Kg/Ha en la corrida 1, a 510 Kg/Ha en la corrida 2 y a 610 Kg/Ha en la corrida 3.

En los resultados obtenidos a partir del año 2014 (Fig. 6), la cantidad de cacao en acopio se incrementó, esto como consecuencia de haber variado el rendimiento por hectárea.

Al observar la Fig. 7, se aprecia un decrecimiento en las hectáreas cosechadas a partir del año 2018 (no ocurre desde el año 2014 debido al retardo en el tiempo de cosecha). Este comportamiento sería el adecuado pues al aumentar el rendimiento por hectárea, por efecto del consumo aparente, se genera una reducción en las hectáreas cosechadas, escenario que puede ser observado en la parte derecha de este gráfico.

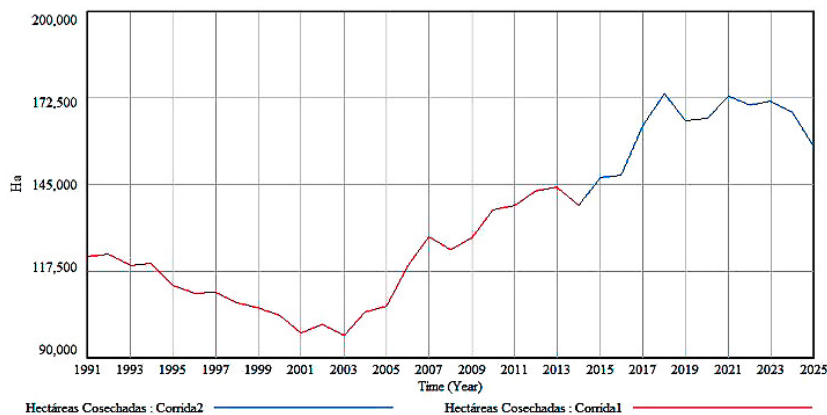


Fig. 7. Hectáreas cosechadas.
Fuente: Vensim Ple.

V. DISCUSIÓN

Otros experimentos que pueden ser planteados tienen que ver con la modificación del parámetro “consumo *per cápita*”, que tendrá, como es de esperarse, efectos sobre las hectáreas cosechadas y, por tanto, sobre la producción de cacao.

Este tipo de modelos, a pesar de su aparente simplicidad, pueden ser útiles para aquellas personas encargadas de tomar decisiones, como los funcionarios del gobierno, quienes pueden impulsar políticas agropecuarias cuya acción pueda ser el mejoramiento del rendimiento por hectárea, ello naturalmente demandaría la gestión de nuevos mercados capaces de absorber la producción excedente, como lo muestran las trayectorias correspondientes a las corridas 2 y 3 en la Fig. 6.

A diferencia del modelado econométrico [38] y [39], el modelado con dinámica de sistemas [17] y [18], toma como base para construir el modelo la estructura del fenómeno y no principalmente las tendencias.

VI. CONCLUSIONES

En el proceso de modelado de la cadena productiva del cacao se realizaron visitas de campo, tanto a las plantaciones de cacao como a la planta procesadora de Tabasco en México, hecho que permitió una mayor comprensión de las dinámicas asociadas a la cadena productiva y contribuyó en la elaboración del modelo con un mayor nivel de correspondencia con la realidad; este proceso no suele contemplarse en la metodología tradicional de dinámica de sistemas.

El uso de modelos de simulación puede proporcionar otras posibilidades para el diseño de políticas públicas pues puede favorecer la definición de agendas temáticas de investigación, el fortalecimiento de las capacidades de trabajo en red de los actores de la cadena y el desarrollo de habilidades para la ejecución de ejercicios de prospectiva de manera sistémica y continuada.

La construcción de un mecanismo conceptual para el análisis de una cadena productiva y su modelamiento con base en los planteamientos de Forrester, surge como una alternativa pertinente para futuros estudios en el campo agroindustrial sobre el entendido que tales modelos pueden ser empleados para explicar el comportamiento dinámico de la cadena, o cualquier otro fenómeno, al validar estrategias que promuevan la mejora de su desempeño y posibilitando una toma de decisiones con menor grado de incertidumbre.

El modelo muestra un comportamiento que recrea los datos obtenidos sobre la producción de cacao en Colombia para el periodo de 1991 a 2014 con un coeficiente de determinación R^2 de 0,97, lo que valida el modelo para ser usado en la simulación de futuros posibles que actúen como insumo para el diseño de políticas públicas de intervención en la cadena productiva del cacao.

VII. FINANCIAMIENTO

Artículo de investigación científica derivado del proyecto de investigación “Modelado y simulación de la cadena productiva del cacao”, código PG-02-2011, financiado por la “Universidad Nacional Abierta y a Distancia” en la convocatoria 01 de 2011. Año de inicio: 2012. Año de finalización: 2014.

VIII. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la “Universidad Nacional Abierta y a Distancia”, la cual posibilitó la realización de este trabajo por medio del proyecto de investigación “Modelado y simulación de la cadena productiva del cacao”.

REFERENCIAS

- [1] S. D. Applanaidu, F. M. Arshad, A. A. Abdel, A. Hasanov, N. Idris, A. M. Abdullah y M. N. Shamsudin, «Malaysian Cocoa Market Modeling: A Combination of Econometric and System Dynamics Approach,» *Agricultural Sector Modelling In Malaysia: Quantitative Models for Policy Analysis*, Shah Alam, 2009.

- [2] I. Mundi, «Cacao en grano precio mensual.» 5 12 2017. [En línea]. Available: <http://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/?mercancia=granos-de-cacao&meses=360>
- [3] R. Agropecuaria, «Precio del cacao se rige por mercado internacional y TRM.» *Vanguardia Liberal*, 23 de mayo de 2017.
- [4] P. Varangis y D. Larson, *Dealing with commodity price uncertainty*, The World Bank, 1996.
- [5] T. Lawson, «Uncertainty and Economic Analysis.» *The Economic Journal*, vol. 95, no. 380, pp. 909-927, 1985. <https://doi.org/10.2307/2233256>
- [6] A. Baronio y A. M. Vianco, «Materiales y Métodos en el Proceso de Investigación Econométrica.» Cuaderno de Econometría 1. Buenos Aires: Universidad Nacional de Villa María, 2015.
- [7] J. Danielsson, «Stochastic volatility in asset prices estimation with simulated maximum likelihood.» *Journal of Econometrics*, vol. 64, no. 1-2, pp. 375-400, 1994. [https://doi.org/10.1016/0304-4076\(94\)90070-1](https://doi.org/10.1016/0304-4076(94)90070-1)
- [8] F. Asif, A. Rashid, C. Bianchi y C. M. Nicolescu, «System dynamics models for decision making in product multiple lifecycles.» *Resources, Conservation and Recycling*, pp. 20-33, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.05.002>
- [9] L. M. Bada, L. A. Rivas y H. F. Littlewood, «Modelo de asociatividad en la cadena productiva en las Mipymes agroindustriales.» *Contaduría y Administración*, no. 62, pp. 1100-1117, 2017.
- [10] J. W. Forrester, «Counterintuitive behavior of social systems.» *Technological Forecasting and Social Change*, pp. 1-22, 1971. [https://doi.org/10.1016/S0040-1625\(71\)80001-X](https://doi.org/10.1016/S0040-1625(71)80001-X)
- [11] H. E. Díaz, «Tecnologías de la información y comunicación y crecimiento económico.» *Economía Informa*, vol. 405, pp. 30-45, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ecin.2017.07.002>
- [12] A. Machado y J. Torres, *El sistema agroalimentario: Una visión integral de la cuestión agraria en América Latina*, México: Siglo Veintiuno Editores, 1991.
- [13] J. Aracil, *Introducción a la Dinámica de Sistemas*, Madrid: Alianza, 1997.
- [14] C. F. Espinal, H. Martínez y L. Ortiz, *La cadena del cacao en Colombia. Una mirada global de su estructura y dinámica 1991-2005*, Bogotá: Observatorio Agrocadenas Colombia, 2005.
- [15] J. A. Aranda, M. J. Barón, I. Huertas y J. A. Orjuela, «Modelo de programación matemática para la cadena productiva del biodiésel en Colombia.» *Ingeniería*, vol. 19, no. 1, pp. 19-49, 2014. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.reveng.2014.1.a02>
- [16] M. Herrera, J. Orjuela, H. Sandoval y M. A. Martínez, *Modelado dinámico y estratégico de la cadena agroindustrial de frutas. Un enfoque para la gestión de tecnología*, Bogotá: Universidad Piloto de Colombia, 2017.
- [17] J. Aracil, Máquinas, Sistemas y Modelos; *un ensayo sobre sistémica*, vol. 1, Madrid: Tecnos, 1986.
- [18] J. W. Forrester, *Industrial Dynamics*. Cambridge, MA: MIT press, 1961.
- [19] H. Lee, V. Padmanabhan y S. Whang, «The Bullwhip Effect in Supply Chains.» *Sloan Management Review*, pp. 93-102, 1997.
- [20] M. Lariviere y E. Porteus, «Selling to the Newsvendor: An Analysis of Price-On.» *Manufacturing & Service Operations Management*, pp. 293-305, 1999.
- [21] L. An y B. Ramachandran, «System Dynamics Model to Understand Demand Conditioning Dynamics in Supply Chains.» *International Conference of the System Dynamics Society*, Boston, 2005.
- [22] J. Amézquita y K. Chamorro, «Dinámica de sistemas aplicado en el análisis de cadenas productivas agroindustriales en el departamento de Bolívar.» *S&T*, pp. 27-37, 2013.
- [23] J. C. Vergara, T. J. Fontalvo y F. Maza, «Análisis de las cadenas productivas hortofrutícola del sur de Bolívar: un análisis bajo el enfoque de la simulación prospectiva.» *Prospectiva*, vol. 9, no. 1, pp. 30-37, 2011.
- [24] J. García, F. Romero y O. Mayorga, «Modelado del sistema logístico de la cadena productiva de la papa empleando dinámica de sistemas.» *AVANCES Investigación en ingeniería*, pp. 86-92, 2015.
- [25] J. Tribín y F. Celina, «Prospectiva de la cadena productiva de mango bajo el enfoque dinámico.» *Entramado*, pp. 56-81, 2014.
- [26] C. Forero, M. Martínez y M. M. Herrera, «Modelo de simulación relacionado con la influencia de la fuerza de trabajo en la cadena de suministro del mango en la región del Tequendamá. Caso el colegio.» *Revista Inventum*, vol. 12, no. 22, pp. 76-84, 2017.
- [27] N. Martínez, H. Andrade y U. Gómez, «Propuesta de un modelo con dinámica de sistemas como herramienta en el aprendizaje del eslabón de producción de la cadena productiva del cacao.» *9º Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas*, Bogotá, 2011.
- [28] J. Olea, O. Contreras y M. Barcelo, «Las capacidades de absorción del conocimiento como ventajas competitivas para la inserción de pymes en cadenas globales de valor.» *Estudios Gerenciales*, vol. 32, p. 127-136, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.estger.2016.04.002>
- [29] T. J. Fontalvo, J. C. Vergara y J. Amézquita, «Construcción de cadenas productivas del sector agrícola mediante modelos de redes: Caracterización, simulación de escenarios y prospectiva.» *Dimensión empresarial*, vol. 7, no. 1, pp. 11-21, 2009.
- [30] D. Vidal y R. Domenge, «Simulador de vuelo ejecutivo como medio de aprendizaje en la planeación de recursos de nuevas empresas bajo el enfoque del marcador balanceado.» *Contaduría y Administración*, no. 62, p. 556-576, 2017.
- [31] H. Andrade, I. Dynner, A. Espinosa, H. Lopez y R. Sotaquirá, *Pensamiento Sistémico, Diversidad en Búsqueda de Unidad*, 1 ed., Bucaramanga: Ediciones Universidad Industrial de Santander, 2001.
- [32] V. I. Antúnez y M. Ferrer, «El Enfoque de cadenas productivas y la planificación estratégica como herramientas para el desarrollo sostenible en Cuba.» *Revista de Investigaciones Políticas y Sociales*, vol. 15, no. 2, pp. 99-130, 2016.
- [33] J. Isaza, «Cadenas Productivas. Enfoques Y Precisiones Conceptuales.» *Sotavento M.B.A.*, pp. 8-25, 2008.
- [34] E. Pineda y D. P. Landazábal, «Reflexiones sobre el proceso de modelado: Una perspectiva dinámico-sistémica.» *Revista Científica Guillermo de Ockham*, vol. 8, no. 1, pp. 95-104, 2010.
- [35] Y. Barlas, «Model Validation.» *International System Dynamics Conference*, Estambul, 1994.
- [36] J. Sterman, *Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*, Irwin: McGraw-Hill, 2000.
- [37] J. A. Pérez, «Econometría espacial y ciencia regional.» *Investigación Económica*, pp. 129-160, 2006.
- [38] O. Morales, A. Borda, A. Argandoña, R. Farach, L. García y K. Lazo, *La Alianza Cacao Perú y la cadena productiva*, Lima: Cecosami Prerensa e Impresión Digital S. A, 2015.
- [39] O. Díaz, J. Aguilar, R. Rendón y H. Santoyo, «Current state of and perspectives on cocoa production in Mexico.» *Ciencia e investigación agraria*, vol. 40, no. 2, pp. 279-289, 2013. <https://doi.org/10.4067/S0718-16202013000200004>

Eliécer Pineda Ballesteros es ingeniero de sistemas, economista y magíster en informática de la UIS. Actualmente es estudiante del doctorado en tecnología educativa de la UIB. Está vinculado como profesor asistente en la Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería de la UNAD. Es investigador junior de Colciencias, adscrito al grupo de investigación GUANE de la UNAD. <https://orcid.org/0000-0003-1331-308>

Freddy Reynaldo Téllez Acuña es ingeniero electricista y magíster en potencia eléctrica de la UIS. Está vinculado como profesor asistente en la Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería de la UNAD. Está adscrito al grupo de investigación GUANE de la UNAD. <https://orcid.org/0000-0002-1978-0137>

Anexo: Ecuaciones del Modelo

Cacao en acopio = INTEG (Importaciones + Producción de cacao - Transformación del cacao - Exportaciones, 3.92558e + 007) Units: Kg

Cacao transformado = INTEG (Transformación del cacao - Chocolate de mesa - Confités de chocolate - Productos en polvo - Otros productos, 41457.6) Units: Kg

Chocolate de mesa = Cacao transformado * Porcentaje chocolate de mesa Units: Kg/Year

Confités de chocolate = Cacao transformado * Porcentaje confités de chocolate Units: Kg/Year

Consumo per cápita de cacao = 1.2 Units: (Kg/Personas)/Year

Cosumo esperado = Población colombiana * Consumo per cápita de cacao Units: Kg/Year

Demanda interna de cacao = RANDOM NORMAL (74, 12795, 4006, 3848, 0) Units: Kg/Year

Demanda externa = RANDOM NORMAL (8, 8092, 2310, 2347, 6299) Units: Kg/Year

Demanda total = Cosumo esperado + Demanda externa Units: Kg/Year

Efecto consumo/Ha = (1 - (Producción de cacao / Cosumo esperado))/20 Units: **undefined**

Efecto retardado = DELAY FIXED ("Efecto Consumo / Ha", 5, 0) Units: **undefined**

Exportaciones = MIN(Demanda Externa, Cacao en Acopio * V1 * (Demanda Externa/Demanda Total)) Units: Kg/Year

FINAL TIME = 2025 Units: Year The final time for the simulation.

Hectáreas cosechadas = INTEG (Variación hectáreas, 111353) Units: Ha

Importaciones = Demanda interna de cacao Units: Kg/Year

Incremento poblacional = Población colombiana * Tasa de incremento Units: Personas/Year

INITIAL TIME = 1991 Units: Year The initial time for the simulation.

Otros productos = Cacao transformado *Porcentaje otros productos Units: Kg/Year

Pérdida por Ha = RANDOM UNIFORM(0.016, 0.031, 15.62) Units: (Kg/Ha)/Year

Población colombiana = INTEG (Incremento poblacional, 4.82422e + 007) Units: Personas

Porcentaje chocolate de mesa = 0.3 Units: 1/Year

Porcentaje confités de chocolate = 0.38 Units: 1/Year

Porcentaje otros productos = 1 - (Porcentaje chocolate de mesa + Porcentaje confités de chocolate + Porcentaje productos en polvo) Units: 1/Year

Porcentaje productos en polvo = 0.15 Units: 1/Year

Producción de cacao = (Hectáreas cosechadas * Rendimiento promedio por Hra) - (Pérdida por Ha * Hectáreas cosechadas) Units: Kg/Year

Productos en polvo = Cacao transformado * Porcentaje productos en polvo Units: Kg/Year

Rendimiento promedio por Hra = (RANDOM NORMAL (0.352, 0.519, 0.411, 0.039, 0.413)) * 1000

Units: (Kg/Ha)/Year

SAVEPER = TIME STEP Units: Year [0,?] The frequency with which output is stored.

Tasa de incremento = 0.012 Units: 1/Year

TIME STEP = 1 Units: Year [0,?] The time step for the simulation.

Transformación del cacao = MIN (Cosumo esperado, Cacao en acopio * V1 * (Cosumo esperado/Demanda total)) Units: Kg/Year

V1 = 1 Units: 1/Year

Variación = IF THEN ELSE(Time < 2003, RANDOM NORMAL (-0.1112, 0.029, -0.013, 0.0466, -0.047) , RANDOM NORMAL (-0.1517, 0.1965, 0.03, 0.0832, -0.008)) Units: 1/Year

Variación hectáreas = Hectáreas cosechadas * (Variación + Efecto retardado) Units: Ha/Year