

7. Aplicación de dinámica de sistemas para la evaluación de alternativas de mejoramiento en la cadena de suministros de café en Colombia



ÁLVARO JOSÉ TORRES PENAGOS*

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.349.07>

Resumen

Dada la problemática generada en esta cadena productiva e identificando como problema central la baja sostenibilidad de la cadena productiva del café, especialmente en el Valle del Cauca (Colombia), es imperativo proponer soluciones al actual desarrollo de esta cadena, especialmente al eslabón de los productores menos beneficiados. Estas soluciones deben permitir un crecimiento equilibrado y estar encaminadas a posibilitar la superación del actual sistema socioeconómico basado en un crecimiento depredador y competitivo al servicio de intereses privados. Así, la sostenibilidad debe dar paso a un replanteamiento profundo de las relaciones de los grupos humanos, entre sí y con el entorno, apostando por la cooperación y la defensa del interés general y cuya finalidad no sea sólo el crecimiento económico de las empresas a costa muchas veces de la pobreza de los habitantes de la región o del desgaste ecológico.

Se pretende utilizar la simulación dinámica para evaluar alternativas que evalúen la sostenibilidad de las fincas cafeteras, incluyendo elementos de rentabilidad, impacto ambiental y desarrollo social que en últimas permitan encontrar soluciones aplicables y cuantificables para un equilibrio sostenible en los eslabones fundamentales de la cadena productiva del sector cafetero en Colombia.

* Doctorante en Ingeniería, con énfasis en Ingeniería Industrial. Docente de la Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7815-7102>

Palabras clave: *café, cadena de suministro, sostenibilidad, dinámica de sistemas.*

Introducción

Actualmente se desarrollan muchas investigaciones en torno a la modelación de cadenas de suministro, en su gran mayoría con el propósito principal de minimizar costos, tales como inventario, transporte, almacenamiento, manejo de materiales, entre otros; en menor cantidad encontramos investigaciones que contengan modelamiento de cadenas de suministro sostenibles, entendiendo como sostenibilidad el equilibrio entre los aspectos económico, sociales y ambientales, Drake y Spinler (2013). La sostenibilidad es considerada “la idea central unificadora más necesaria en este momento de la historia de la humanidad” (Bybee, 1991). Es posible que la integración de todos los elementos de sostenibilidad genere complejidad en el momento de la aplicación de modelos; algunos autores —como M. Brandenburg et al. (2014), Carters y Rogers (2018), Kannegiesser y Gunter (2013) y Madani et al. (2024)— han realizado revisiones bibliográficas donde se evidencia la poca utilización de modelación para el análisis de cadenas de suministro que incluyan a la vez elementos económicos, sociales y ambientales.

En la caracterización que realiza Sasikumar y Kannan (2009) y la adaptación que realiza M. Brandenburg et al. (2014), se clasifican los posibles tipos de modelamientos para una cadena de suministro, entre ellos los métodos de programación matemática, los métodos de simulación, como la dinámica de sistemas; los métodos heurísticos, los modelos híbridos y por último, los modelos analíticos como, la teoría de juegos, los métodos multicriterio y los modelos sistémicos. Una de las herramientas que ha tomado relevancia en los últimos años precisamente para el análisis de problemas complejos es el enfoque sistémico y la dinámica de sistemas como metodología para su estudio.

Rebs et al. (2018) realizan una revisión de literatura en el marco de la aplicación de dinámica de sistemas en cadenas de suministro sostenible y concluyen que la mayoría de los modelos se ocupan de los niveles macroscópicos de análisis, mientras que los modelos para las cadenas de valor

intra e inter organizacionales ocupan un lugar menos destacado, lo cual representa una ventana de investigación interesante.

La cadena de suministro del café tiene inconvenientes en Colombia por varias razones, entre ellas la inestabilidad del precio internacional del café, según la Federación Nacional de Cafeteros (FNC) de Colombia, el grano pasó de costar 1.60 dólares por libra en noviembre de 2016 a 1.00 dólar en mayo de 2019, y aunque ha tenido precios muy altos como en el 2022 por encima de 2.4 dólares o el precio en marzo del 2025, cerca de los 4 dólares la libra, debido a las sequías en Brasil y Vietnam que son los principales productores de café; sin embargo, en los momentos de alta oferta de estos países hay semestres que el precio genera bajos ingresos en muchos casos por debajo de los costos de producción.

Actualmente, las multinacionales del café pagan hoy dos tercios menos que el precio del café en 1983 y aunque Colombia es el cuarto productor de café del mundo y anualmente el mercado del café genera unos 132 130 millones de dólares en todo el mundo, en el 2024, los productores solo tienen acceso a menos de un 10% de esa cifra. Según la FNC (2022) a pesar de que los precios de referencia internacional van en picada, en cafeterías y supermercados el costo sube progresivamente. Se calcula que por cada libra de café que se vende en el mundo, por dólar, los productores reciben solo 7 centavos de dólar según FNC (2018).

Esta situación se agudiza con otras problemáticas a lo largo de toda la cadena de suministro, en especial a los productores. Algunos de estos problemas son los costos logísticos, según la encuesta nacional de logística en Colombia (ENL 2022), los costos logísticos en empresas agropecuarias están alrededor del 22.2% concentrándose principalmente en costos de almacenamiento, con un 36.3% y costos de transporte, con un 27.5%.

La siguiente problemática hace referencia a la falta de ingresos adicionales en las fincas cafeteras que compensen las temporadas de bajos precios del café, además, no existe un comercio a través de toda la cadena de suministro que reparta equitativamente la cadena de valor del café. Según Jason Potts (2007), aunque los mercados de futuros son los responsables de establecer el contexto general de precios para transacciones físicas, la habilidad de los productores para imponer precios que satisfagan los costos domésticos de producción y/o los costos de mantener niveles de vida sostenibles, es

también dependiente de su capacidad para negociar condiciones deseables directamente con los compradores. Los productores son a menudo tomadores de precio con poca capacidad para influir sobre los términos del comercio en que participan.

En cuanto a las condiciones de empleabilidad, según Navarro et al. (2024) afirman que cerca del 44% de los productores de café en Colombia reciben ingresos que oscilan entre 0 y 1 salario mínimo legal vigente (SMLV) y más del 54% de los productores cafeteros se encuentran inmersos en condiciones de pobreza o vulnerabilidad ante la misma. Esta situación refleja la complejidad inherente al sector, donde gran parte de los productores se enfrentan a dificultades para sostener sus medios de subsistencia.

Por otra parte, se cuenta con poca disponibilidad laboral para el café que se mide a través de la proporción entre oferta y demanda laboral durante las épocas de cosecha en municipios cafeteros, lo cual genera un incremento en el costo laboral, incidiendo en los costos de producción cafetera. Según la organización internacional del trabajo (OIT, 2021), hasta el 85% de la producción de café en Colombia tiene lugar en la economía informal, que adolece de déficits de trabajo decente, como largas jornadas de trabajo, salarios bajos e inseguros, acceso limitado a la seguridad social, inspecciones escasas y falta de información para los trabajadores.

En términos ambientales, la producción del café está generando un impacto negativo en el desempeño ambiental del país: el cultivo y procesamiento de granos hace que la producción de café sea la segunda fuente más grande de emisiones de gases de efecto invernadero agrícolas, por lo tanto, el procesamiento del café es un aspecto importante para mejorar la huella climática de Colombia, según Bernal (2016).

Para contribuir a la sostenibilidad de la cadena de suministro del café en Colombia y mitigar o reducir los efectos de los problemas aquí evidenciados, se quieren plantear alternativas de solución y evaluar el resultado hasta alcanzar una mejora significativa en la sostenibilidad.

Para analizar varios de los elementos que influyen en la sostenibilidad de las fincas cafeteras en Colombia, se ha utilizado la dinámica de sistemas como metodología para entender algunas relaciones esta cadena de suministros.

Metodología

Introducción a la metodología

Según Meadows y Robinson (1985), la dinámica de sistemas es un paradigma metodológico para la investigación de sistemas complejos y se considera un subconjunto del paradigma más amplio de los modelos de simulación. En este proceso de análisis de la sostenibilidad de cadena de suministro del café se pueden dejar por fuera muchos elementos, pero según Forrester (1987) para entender un sistema es preferible incorporar variables e interacciones incluso si su representación es difícil y evitar omitirlas aún con conocimiento de su importancia en el desempeño del conjunto. La idea de este enfoque es evaluar de forma novedosa los impactos de posibles intervenciones de gestión, de políticas y observar los cambios en los sistemas complejos Sterman (2000), Thorton y Herrero (2001) y Tedeschi et al. (2011). Este documento utiliza el enfoque sistémico y la dinámica de sistemas propuesta por Forrester (1987), para analizar algunos aspectos económicos, sociales y ambientales al interior de la cadena de suministro del café que podrían contribuir a su sostenibilidad.

Diseño del estudio

Se desarrollará una investigación de carácter mixta con elementos de investigación descriptiva al caracterizar la cadena de suministros del café en Colombia y con investigación experimental para la construcción de modelos y cuantificación de relaciones entre variables que influyen en la sostenibilidad de la cadena, es decir se realizará un estudio causal. El estudio necesita de fuentes secundarias de información a través de entidades gubernamentales que publiquen información relevante sobre el comportamiento de la población que se estudiará. Después de hacer un mapeo de las cadenas de suministro de café en Colombia, se realiza trabajo de campo para recopilar información de manera directa a través de entrevistas y encuestas a los caficultores de diferentes fincas.

Métodos utilizados

Algunas de las decisiones que se tomaron en el transcurso de la investigación requirieron del apoyo de expertos en el sector y su consenso, para esta selección se deben aplicar técnicas que prioricen los expertos a seleccionar; en ese sentido, esa parte de la investigación tendrá un carácter exploratorio. Es importante tener en cuenta que la investigación tendrá un enfoque amplio que permitirá generalizar los resultados a las fincas cafeteras de varias regiones de Colombia. Los métodos utilizados para el desarrollo de la investigación están basados en la dinámica de sistemas; a continuación, un resumen de ellos.

- *Dinámica de sistemas.* Un modelo de dinámica de sistemas es la representación de la estructura de un sistema. Una vez que se construye el modelo de dinámica de sistemas y se especifican las condiciones iniciales, la computadora puede simular el comportamiento de distintas variables del modelo en el tiempo.
- *Diagrama causal.* Este diagrama permite conocer la estructura de un sistema dinámico. Dicha estructura viene dada por la especificación de las variables y la existencia o no de relaciones entre ellas. La realimentación es fundamental en cualquier sistema, ya que sin ella no hay sistema. Los bucles de realimentación son los elementos estructurales primarios de los sistemas.
- *Diagrama de Forrester.* En un diagrama de Forrester, los distintos elementos existentes en un diagrama de influencias (causal), se representan por medio de variables, clasificadas en tres grupos diferentes, las variables de nivel que representan los resultados de la acumulación en el tiempo, son aquellas variables cuya evolución es significativa para el estudio del sistema y son equivalentes a las variables de estado. Las variables de flujo, que fluyen entrando y saliendo de los niveles, de manera que causan los cambios en éstos. Las variables auxiliares, son variables de ayuda en el modelo, su papel consiste en colaborar en la definición de las variables de flujo y en documentar el modelo haciéndolo más comprensibles, finalmente, las fuentes y sumideros, que suponen una capacidad infinita y se representa por una nube.

Resultados y discusión

Diagrama causal

Se realizó un diagrama de influencias en el cual se encontraron con claridad 6 bucles de refuerzo (figura 7.1), el primero (R1) muestra la importancia de la permanencia de los campesinos en el campo, a más áreas cultivadas con influencia de la tecnificación y la mejora de la calidad del grano de café, más ingresos se obtienen, logrando mejorar la rentabilidad; el bucle de refuerzo 2 (R2) muestra que a más caficultores, menos migración hay de campesinos a la ciudad, logrando que los niveles de empleo no se reduzcan en las ciudades y se garantice el consumo, que a la vez promueve la compra de café.

Es claro que los precios del café no son estables, esto hace que en algunos semestres los caficultores reciban menos ingresos por su café, incluso a veces por debajo del costo, dejando de ser rentable, así que es importante compensar esta reducción de utilidades con ingresos adicionales en las fincas cafeteras, la propuesta que se sugiere en el diagrama de influencias es incluir la apicultura, el turismo en las fincas cafeteras y la cría de cerdos y gallinas como estrategia para diversificar el ingreso ante la reducción en las utilidades ante bajas en el precio internacional del café. Claramente existen otras actividades que actualmente interactúan con los cultivos de café en varias fincas cafeteras, sin embargo se han seleccionado estas 3 como las más aplicadas.

Observamos en el bucle de refuerzo 3 (R3) que la inversión en atractivos turísticos a las fincas podría incrementar las visitas de turistas, incrementando los ingresos, lo mismo con la apicultura (R4), a más inversión en la tecnificación y buenas prácticas de la apicultura, mayor producción de miel y sus derivados, por lo tanto mayores ingresos. La última alternativa que se incluyó para aumentar los ingresos de los caficultores es la cría de animales productores en pequeña escala, como cerdos y gallinas. En el bucle de refuerzo 5 (R5) se observa que si se incrementa esta cría podrían aumentar los ingresos adicionales.

Es importante resaltar que todos estos bucles están restringidos por la disponibilidad de recursos, como terrenos, agua, energía, etc. La cría de animales tiene un beneficio adicional, además de los ingresos, y es la gene-

ración de biocombustible a partir de los residuos generados por los animales; en muchos de los hogares de caficultores cocinan con leña, esto tiene varias implicaciones, la primera es el impacto ambiental por la quema del combustible, además de la tala de árboles, la segunda es la cantidad de jornales utilizados por los campesinos para la recolección de leña, tiempo que se podría utilizar en actividades propias del cultivo, otro elemento importante es el incremento de enfermedades crónicas respiratorias a causa de la inhalación de humo producto de la quema de madera. Así que, como observamos, en el bucle de refuerzo 6 (R6), el incremento en la producción de residuos de los animales, aumenta la generación de biocombustible que contribuye a la reducción de costos de las fincas no solo por el ahorro en el método de cocción de los alimentos, también el biocombustible puede usarse para el secado del café, entre otros usos.

En el diagrama de influencias se encuentran otras relaciones importantes en la sostenibilidad de esta cadena, en lo ambiental se ilustra la utilización y transformación de los residuos de los animales en biocombustibles evitando gases de efecto invernadero como el metano, además de la contaminación de acuíferos y ríos donde terminan generalmente estos residuos.

El diagrama muestra que la tecnificación en todos los procesos de cultivo, cosecha y poscosecha del café podría mejorar la calidad del café y por lo tanto colocarse en el mercado a un mejor precio, además de un incremento en la productividad y rendimiento, generando mayores ingresos por hectárea sembrada.

Por último, se observa que entre más campesinos están cultivando hay mayor reducción de la huella de carbono por la cantidad de árboles sembrados no solo de café, también los que generan sombrío como técnica de mejora de la calidad del café. En lo social se analiza la problemática creciente en Colombia por falta de relevo generacional en el campo, si las fincas cafeteras pueden ser rentables, podría reducir la probabilidad de la migración de los campesinos a la ciudad. La migración por supuesto genera un efecto en cadena terrible, produce sobrepoblación de las ciudades, y, por lo tanto incremento, en el daño ambiental por aumento en el uso de recursos, como agua, energía, además de la generación de residuos, la migración genera menos producción en el campo y más dependencia de las importaciones, afectando seguridad alimentaria y la balanza de pagos.

Diagrama de Forrester

Se realizó el diagrama de Forrester de acuerdo con el diagrama de influencias generado y el resultado se observa en la figura 7.2. Se encuentran 3 variables de nivel, asociadas a la producción de café, la generación de gases de efecto invernadero (GEI) y población rural; el propósito fundamental es evaluar la rentabilidad de las fincas cafeteras a partir de los ingresos por ventas del café y los otros tipos de ingresos propuestos, también se quiere observar el crecimiento o el decrecimiento de la población rural a partir del aumento o la reducción de ingresos en las fincas cafeteras y, finalmente, el impacto ambiental que tiene la reducción en quema de leña vía generación de gas propano por biodigestor, además de la reducción de emisiones de gas propano a la atmósfera por desechos de los animales y descomposición de los lixiviados producto del lavado del café.

Si se cuenta con información veraz, se podrá obtener resultados de la simulación en cuanto a las dinámicas sociales, económicas y ambientales sugeridas en este estudio que fortalecerá los procesos de toma de decisiones asociados a incrementar la sostenibilidad de la cadena de suministro del café.

Si bien el modelo se concibe pensando en la realidad Colombiana, será posible ajustarlo a otros países y cadenas similares.

Resultados y discusión

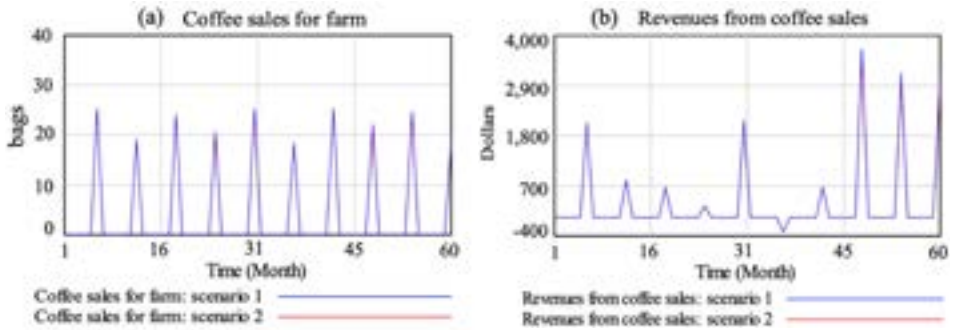
Hemos recopilado información sobre algunas variables del diagrama de Forrester; estas variables se han simulado para obtener su comportamiento preliminar en una granja típica. Los resultados de la simulación indican que es importante informar sobre estos primeros avances de la investigación. Nuestra investigación en curso se centra en la influencia de las variables simuladas sobre las no simuladas y su correlación. Los escenarios simulados consideraron los siguientes aspectos:

- *Escenario 1:* sólo variables de producción y venta de granos de café para los productores de café.
- *Escenario 2:* fuentes alternativas de ingresos en las fincas cafetaleras, como la venta de productos apícolas, el turismo rural y la cría de cerdos/venta de carne.
- *Escenario 3:* algunos impactos ambientales negativos en las fincas cafetaleras y su posible mitigación.

Se recopiló información técnica y estadística de fuentes secundarias durante 60 meses (desde julio de 2017 hasta junio de 2022), que incluyó datos relacionados con el impacto de la pandemia covid-19 en los precios del café, la carne de cerdo y la reducción del turismo de finca.

La figura 7.3a muestra que no hay diferencias en las ventas de café y los ingresos entre los escenarios, porque las otras fuentes de ingresos no afectan a la cosecha de café. El comportamiento de las ventas concuerda con las dos floraciones de café que se presentan en Colombia cada año, una de abril a junio y la más importante de octubre a diciembre. Por otra parte, los ingresos de los productores por la venta del grano dependen de los precios internacionales del café y de los costos de producción. En consecuencia, estos ingresos pueden ser a veces muy bajos, e incluso negativos en algunos periodos, generando pérdidas para el productor (figura 7.3b).

Figura 7.3. Simulación de las ventas de café verde en grano de los caficultores y su relación con la rentabilidad



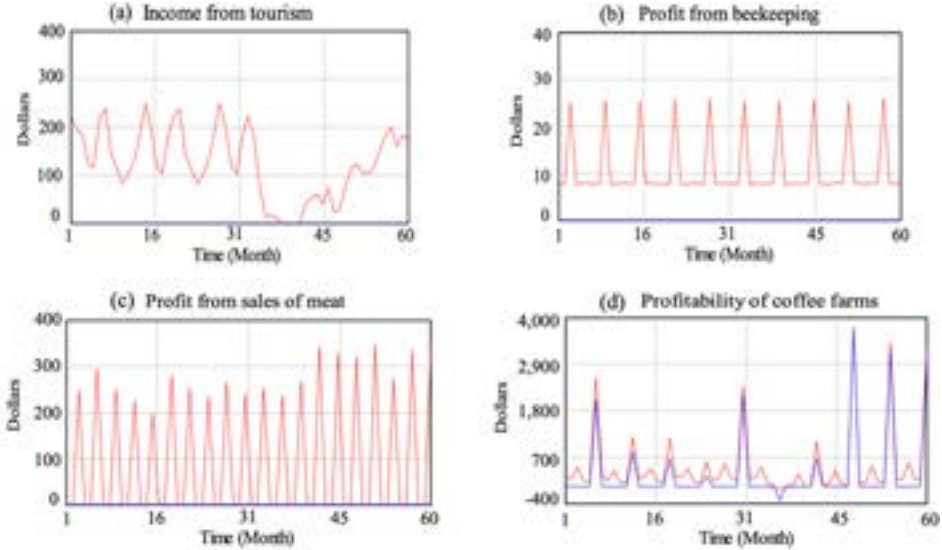
Fuente: Elaboración propia en programa Vensim.

Las figuras 7.4a, b y c ilustran que los ingresos adicionales procedentes de otras fuentes pueden ser comparables a los ingresos del grano de café. Los ingresos adicionales procedentes del turismo agrícola aumentan en verano, cuando acuden más turistas a la explotación. La figura 7.4a revela una reducción significativa de visitantes a la finca a partir del mes 33 (marzo de 2020) debido a la cuarentena obligatoria causada por la pandemia del covid-19.

La figura 7.4b muestra algunos periodos de máxima producción de productos apícolas debido a la floración de los cafetos. Cada año, un panal genera en promedio 35 kg de miel y 12 kg de polen y el modelo se corrió usando una medida típica de 1.3 hectáreas por finca, que corresponde al área del 82% de las fincas cafeteras en Colombia (FNC, 2018). Además, el número máximo permitido de panales por hectárea es de dos. Como resultado, la simulación indica que los ingresos por esta actividad no son significativos. La figura 7.4d compara los diferentes ingresos.

Los ingresos medios mensuales procedentes de la venta de granos de café ascienden a 232 USD, mientras que los ingresos medios mensuales procedentes de otras fuentes de ingresos ascienden a 153 USD, lo que arroja unos ingresos medios mensuales totales de 385 USD. Aunque esta cifra supera el salario mínimo mensual en Colombia (aprox. 252 USD), puede no ser suficiente para el grupo familiar del productor de café medio, compuesto por unas 4 personas.

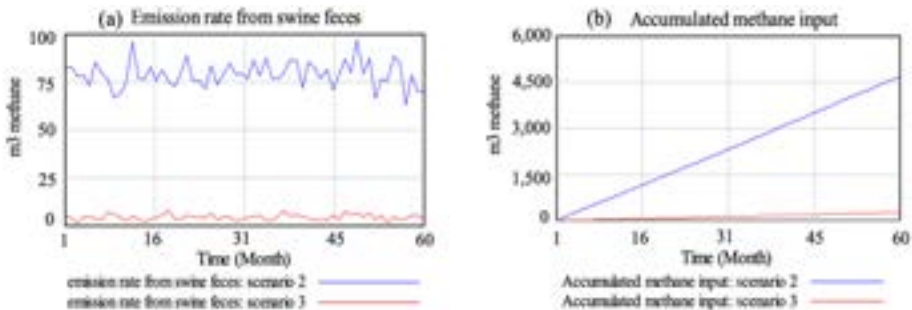
Figura 7.4. Comportamiento de los cafetales con fuentes de ingresos adicionales



Notas: línea azul = escenario 1; línea roja = escenario 2.
Fuente: Elaboración propia en programa Vensim.

Finalmente, las figuras 7.5a y b comparan la generación de metano a partir de heces de cerdo en el escenario 2 con y sin el uso de un biodigestor para producir biogás. Es importante señalar que la inversión en el biodigestor se amortizó a lo largo del horizonte temporal analizado. Se observa una reducción significativa de las emisiones de metano a la atmósfera.

Figura 7.5. Emisiones de metano con y sin generación de biocombustible



Notas: línea azul = escenario 2; línea roja = escenario 3.
Fuente: Elaboración propia en programa Vensim.

Conclusiones

El estudio de la cadena sostenible de abastecimiento de café que considere elementos económicos, sociales y ambientales mediante la dinámica de sistemas es un tema que merece mayor investigación. Como ejemplo, se han identificado varios problemas en la cadena de abastecimiento de café en Colombia, tales como la incertidumbre en los precios internacionales, la baja proporción de rentabilidad que reciben los caficultores y su falta de relevo generacional.

Para reducir los efectos de estos factores y mejorar la sostenibilidad de la cadena productiva del café, se proponen diagramas de influencia y de Forrester de dinámica de sistemas, que consideran las siguientes alternativas de mejora: la permanencia de los caficultores en el campo incentivados por mejores tecnologías, la producción de granos de alta calidad, y la creación de diversas fuentes de ingresos como la apicultura, el turismo agrícola y la cría de animales a pequeña escala.

Según el diagrama de influencias, estas alternativas producen al menos seis bucles de refuerzo que podrían contribuir a la sostenibilidad económica, social y medioambiental de la cadena de suministro del café en Colombia. Las ejecuciones preliminares del modelo muestran que los ingresos procedentes de otras fuentes distintas de la venta del grano de café pueden ser significativos. Además, el modelo puede ser útil para analizar las implicaciones medioambientales de algunas actividades de producción como la cría de cerdos y algunos impactos sociales del covid-19, por ejemplo, en la reducción del turismo.

Referencias

- Bashiri, M., Tjahjono, B., Lazell, J., Ferreira, J. y Perdana, T. (2021). The dynamics of sustainability risks in the global coffee supply chain: A case of Indonesia-UK. *Sustainability*, 13(2), 589. <https://doi.org/10.3390/su13020589>
- Bernal Vargas, Ó. M. (2016). *Hacia la sostenibilidad cafetera: un análisis de política pública* (pp. 85–120).
- Brandenburg, M., Govindan, K., Sarkis, J. y Seuring, S. (2014). Quantitative models for

- sustainable supply chain management: Developments and directions. *European Journal of Operational Research*, 233(2), 299–312. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.09.032>
- Carter, C. R. y Rogers, D. S. (2008). A framework of sustainable supply chain management: Moving toward new theory. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 38(5), 360–387 <https://doi.org/10.1108/09600030810882816>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) (ca. 2014). *Censo Nacional Agropecuario 2014*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/censo-nacional-agropecuario-2014/>
- Díaz Manrique, M. A. y Córdoba Vargas, C. A. (2019). Estudio de la estructura del agroecosistema cafetero mediante el diagrama de ciclos causales: estudio de caso (Cundinamarca, Colombia). *Journal of Depopulation and Rural Development Studies*, 28, 1–24. <https://doi.org/10.4422/ager.2019.08>
- Drake, D. F. y Spinler, S. (2013). Sustainable operations management: An enduring stream or a passing fancy? *Manufacturing & Service Operations Management*, 15(4), 689–700. <https://doi.org/10.1287/msom.2013.0456>
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNC) (ca. 2011). *Informe de gestión 2011*. <https://federaciondefcafeteros.org/wp/publicaciones>
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNC) (2012). *Presentación sobre cooperativas a la misión de la competitividad del café*. <https://federaciondefcafeteros.org/static/files/IGG2012.pdf>
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNC) (s/f). *Quiénes somos*. <https://valle.federaciondefcafeteros.org/federacion>
- Forrester, J. W. (1987). Lessons from system dynamics modeling. *System Dynamics Review*, 3(2), 136–149. <https://doi.org/10.1002/sdr.4260030205>
- Hakim, L., Deli, A. y Zulkarnain (2020). The system dynamics modeling of Gayo arabica coffee industry supply chain management. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 425, 012019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/425/1/012019>
- Kannegiesser, M. y Günther, H. O. (2014). Sustainable development of global supply chains, 1: Sustainability optimization framework. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 26, 24–47. <https://doi.org/10.1007/s10696-013-9176-5>
- Madani, B., Saihi, A. y Abdelfatah, A. (2024). A systematic review of sustainable supply chain network design: Optimization approaches and research trends. *Sustainability*, 16(8), 3226. <https://doi.org/10.3390/su16083226>
- Malik, A. D., Parikesit, Withaningsih, S. (2019). Exploring drivers' interaction influencing the adoption of sustainable coffee production system through a qualitative system dynamics modelling, case study: Smallholder coffee plantation in Pangalengan, Bandung, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 306, 012007. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/306/1/012007>
- Meadows, D. y Robinson, J. M. (1985). *The electronic oracle: Computer models and social decisions*. John Wiley & Sons.
- Navarro Muñoz, M. J., Ramírez Romero, Á., Ortega Carmona, C. C., Montero Lobato, N. L., Romero-Torres, B. D. y Quitian Barrera, D. (2024, mayo). *El sector cafetero en la*

- economía solidaria* (Notas Solidarias, 2). Superintendencia de la Economía Solidaria. https://www.supersolidaria.gov.co/sites/default/files/gad_2024/20240515_nts_002.pdf
- Observatorio Nacional de Logística [de Colombia]. (ca. 2018). *Encuesta Nacional Logística 2018*. <https://onl.dnp.gov.co/Paginas/Encuesta-Nacional-Logistica-2018.aspx>
- Organización Internacional del Trabajo (OIT). (s/f). *Cadenas de suministro sostenibles para reconstruir mejor el futuro*. <https://www.ilo.org/es/projects-and-partnerships/projects/cadenas-de-suministro-sostenibles-para-reconstruir-mejor-el-futuro>
- Potts, J., Fernández, G. y Wunderlich, C. (2007). *Trading practices for a sustainable coffee sector context, strategies and recommendations for action prepared as a background document for the sustainable coffee partnership*. International Institute for Sustainable Development.
- Rachman, J., Machfud, S. y Raharja, M. (2014). Prediction of sustainable supply chain management for Gayo coffee using system dynamics approach. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 70(2), 372–380.
- Sasikumar, P. y Kannan, G. (2009). Issues in reverse supply chain, part III: Classification and simple analysis. *International Journal of Sustainable Engineering*, 2(1), 2–27. <https://doi.org/10.1080/19397030802673374>
- Sterman, J. D. (2001). System dynamics modeling: Tools for learning in a complex world. *California Management Review*, 43(4), 8–25. <https://doi.org/10.2307/41166098>
- Tedeschi, L. O., Nicholson, C. F. y Rich, E. (2011). Using system dynamics modelling approach to develop management tools for animal production with emphasis on small ruminants. *Small Ruminant Research*, 98(1–3), 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2011.03.026>
- Thornton, P. K. y Herrero, M. (2001). Integrated crop-livestock simulation models for scenario analysis and impact assessment. *Agricultural Systems*, 70(2–3), 581–602. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(01\)00060-9](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(01)00060-9)