

Configuración de la Cadena Productiva del Café en Norte de Santander

Configuration of the Coffee Production Chain in Norte de Santander

Karen Julieth Castellanos Rodríguez¹, Óscar Mayorga Torres², Óscar Orlando Ortiz Rodríguez³

¹<https://orcid.org/0000-0002-3899-9193> Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia, karen.castellanos@unipamplona.edu.co
²<https://orcid.org/0000-0002-2354-3193> Universidad Francisco de Paula Santander, San José de Cúcuta, Colombia, oscarmtorres@ufps.edu.co
³<https://orcid.org/0000-0003-2250-9804> Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia, foscartortiz@unipamplona.edu.co

Fecha de recepción: 05 de marzo de 2025

Fecha de aprobación: 15 de mayo de 2025

Fecha de publicación: 30 de junio de 2025



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons
Reconocimiento-No comercial-SinObraDerivada 4.0 internacional.

DOI: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.113282>

Citar como: K. J. Castellanos Rodríguez, O. Mayorga Torres y O. O. Ortiz Rodríguez, "Configuración de la Cadena Productiva del Café en Norte de Santander," Avances: Investigación en Ingeniería, vol. 22, núm. 1, pp. 20–32, 2025, doi: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.113282>

Resumen

La investigación analiza la configuración estructural y relacional de la cadena productiva del café en Norte de Santander, con el objetivo de identificar los eslabones y el grado de correlación entre los actores que intervienen desde la producción hasta la comercialización en los mercados nacionales e internacionales. Para ello, se diseñó un diagrama de hilos que integra la transición del producto por eslabón-actor, caracterizando la distribución geográfica, la densidad de actores, los flujos de entrada – salida, así como los puntos de pérdida en el sistema.

El análisis estadístico evidenció una correlación positiva entre las variedades resistentes y las prácticas agrícolas modernas con el rendimiento del cultivo, mientras que los cultivos tradicionales y susceptibles mostraron una menor incidencia en grandes extensiones. Este diagnóstico permitió identificar deficiencias en la organización, el transporte y el manejo del grano, que han generado pérdidas superiores al 30% en la última década, afectando especialmente a los pequeños y medianos productores. Se concluye que el fortalecimiento de las cooperativas, la renovación de cultivos tradicionales y la adopción de prácticas agrícolas modernas constituyen estrategias clave para reducir pérdidas, incrementar la productividad y consolidar la competitividad del café de Norte de Santander en el ámbito nacional e internacional.

Palabras Clave: Cadena productiva, Café, Configuración, Diagnóstico.

Abstract

The research analyzes the structural and relational configuration of the coffee production chain in Norte de Santander, aiming to identifying the links and the degree of correlation among the actors involved, from production to commercialization in national and international markets. To achieve this, a thread diagram was designed to illustrate the product's transition through each link-actor, characterizing geographical distribution, actor density, input-output flows, and loss points within the system.

The statistical analysis revealed a positive correlation between resistant varieties and modern agricultural practices with crop yield, while traditional and susceptible crops showed lower performance over large áreas. This diagnosis made it possible to identify deficiencies in organization, transportation, and grain handling, which have caused losses exceeding 30% over the last decade, particularly affecting small and medium-sized producers; it is concluded that strengthening cooperatives, renewing traditional crops, and adopting modern agricultural practices are key strategies to reduce losses, increase productivity, and consolidate the competitiveness of Norte de Santander's coffee in both national and international markets.

Keywords: Characterization, Coffee, Configuration, Diagnosis, Productive chain.

1. Introducción

Colombia es el tercer productor de café en el mundo, con un alto nivel de exportaciones del grano hacia diferentes países [1]. En la última década, el sector cafetero ha experimentado cambios de índole económico, social, ambiental y político; influyendo en la arquitectura, transformación y productividad del sector [2]. Por otro lado, la dinámica del mercado internacional, la creciente oferta del grano (por parte del mayor productor Brasil) y las pérdidas ocasionadas por enfermedades del cultivo han impactado de manera negativa la competitividad y sostenibilidad del sector cafetero colombiano.

En este contexto, los productores enfrentan múltiples barreras derivadas de la volatilidad de los precios internacionales, la obsolescencia tecnológica y la limitada gestión

gubernamental para apoyar el sector. Cabe resaltar que aproximadamente el 80% de los Caficultores en Colombia son pequeños y medianos productores, lo que evidencia la necesidad de desarrollar estrategias focalizadas de mejoramiento [3].

Bajo estas consideraciones, el departamento de Norte de Santander se constituye como el escenario de estudio para analizar la configuración del sector caficultor; identificando los diferentes actores, eslabones, flujos y medios que interactúan en el sistema productivo, transformador y comercializador de la cadena; con el objetivo de establecer una caracterización y diagnóstico de las cantidades que se producen, transforman, comercializan, despachan y reprocessan entre eslabones.

Finalmente, se evalúan los factores clave que han permitido el crecimiento del sector, como aquellos donde se debe intervenir para generar mecanismos o políticas de mejora. La investigación abarca los 36 municipios productores de café en Norte de Santander y se sustenta en una base documental que integra información proveniente de los diferentes actores que componen la cadena — productores, transformadores, comercializadores y exportadores —. Posteriormente, se desarrolló un análisis de la información mediante herramientas computacionales, lo que permitió identificar los puntos de inflexión según la fase, el actor y la tipología del producto.

2. Métodos

2.1 Fases de Investigación

Se desarrolló una investigación descriptiva de carácter mixto [4], orientada a caracterizar los actores y eslabones de la cadena productiva del café en el departamento de Norte de Santander. El estudio integró instrumentos de recolección de datos y técnicas estadísticas para analizar las relaciones estructurales y las variables del escenario objeto de estudio, mediante herramientas computacionales como Python ® y Excel ®.

La población correspondió a los 36 municipios productores de café de la región, en los cuales se identificaron 16.027 caficultores [5] y una superficie cultivada de 23.411 hectáreas. Se empleó un muestreo censal, considerando a los productores formalmente vinculados a la Federación Nacional de Cafeteros; aunque existen diagnósticos generales de la caficultura en Colombia realizados por dicha entidad [5], no se han encontrado estudios detallados que caractericen la configuración estructural y relacional de la cadena productiva del café en Norte de Santander.

Con lo anterior, se diseñó una base de datos destinada a almacenar la información correspondiente a los diferentes actores organizados según los eslabones de la cadena productiva. La investigación se estructuró en cuatro fases:

La primera describe la revisión, delimitación del problema y definición de variables de análisis; la segunda, identificación de eslabones, actores, tecnologías, recursos y medios que componen la cadena productiva; en la tercera se determinó un diagnóstico del análisis estructural (geolocalización, número de eslabones, cantidad de actores, flujos de entrada y salida) y análisis relacional (indicadores de producción, gestión de políticas, pérdidas sistémicas) y finalmente, el diseño e integración de la información a través de diagramas de hilos, diagramas de dispersión y matrices de correlación, para representar la estructura y dinámica de la cadena.

La Figura 1 presenta de manera esquemática las fases y herramientas utilizadas en la metodología de investigación. Para el análisis estadístico, se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson para evaluar la relación entre el área cultivada, las variedades de café (resistentes, tradicionales, susceptibles, renovadas) y el rendimiento productivo.

Asimismo, se empleó un análisis de varianza (ANOVA), para identificar diferencias significativas en los rendimientos en función de prácticas agrícolas y tipología de cultivos.

Finalmente, con el objetivo de identificar los defectos en la calidad del grano y su incidencia en las pérdidas productivas se analizaron las variables mediante diagramas de Pareto y mapas de calor.

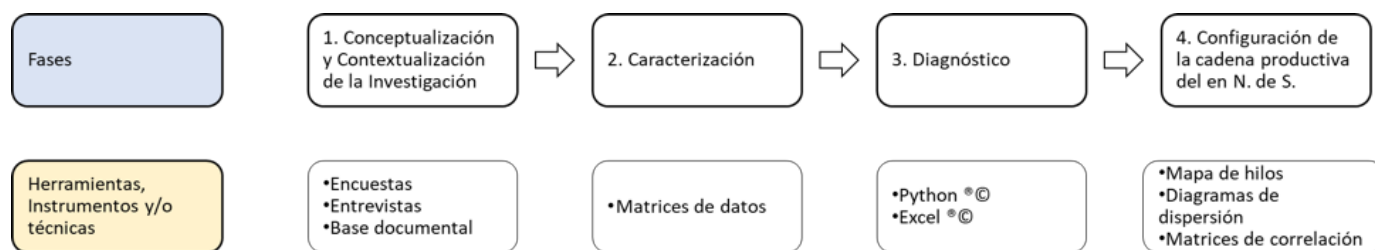


Figura 1. Metodología.

2.2 Análisis Estadístico

El análisis estadístico tuvo como propósito identificar la relación entre los principales factores de la caficultura y el rendimiento del cultivo. Para ello, se aplicó coeficiente de correlación de Pearson, encontrando que tanto la siembra de variedades resistentes como el uso de prácticas agrícolas modernas presentan una correlación con la productividad del café ($R = 0,996$ y $R = 0,9959$, con $p < 0,001$), lo que indica una relación altamente significativa y consistente entre dichas variables.

Asimismo, se empleó un análisis de varianza (ANOVA) con el fin de evaluar las diferencias significativas en el rendimiento del cultivo de café en función de las prácticas agrícolas y los tipos de cultivos, determinando diferencias entre los grupos ($p \leq 0,05$), evidenciando diferencias específicas en los defectos físicos del grano, siendo el insumo base para el diseño gráfico del diagrama de hilos.

2.3 Contexto del sector cafetero en Colombia

En Colombia, la mayoría de los productores de café son pequeños agricultores que poseen fincas con extensiones menores a cinco hectáreas. Por otro lado, el país se posiciona como el tercer mayor productor mundial del grano, la Federación Nacional de Cafeteros (FNC), en coordinación con el Gobierno Nacional, administra el Fondo Nacional del Café [6] cuyo propósito es fortalecer la competitividad del sector frente a los desafíos del mercado internacional.

De acuerdo con las proyecciones oficiales, se espera un incremento del 7,6% en la productividad del café colombiano para el periodo 2041-2060 [7]. Para alcanzar esta meta, la FNC trabaja en factores determinantes como la cantidad-calidad de semillas, incentivos y condiciones laborales [8].

2.4 Configuración de la Cadena Productiva

La configuración de la cadena de suministro constituye un elemento decisivo para la gestión equilibrada de la demanda y oferta, además de ser un factor clave para mitigar los impactos negativos derivados de la incertidumbre del mercado [9]; permitiendo a las empresas adaptarse a las preferencias cambiantes de los consumidores [10]. Un indicador es la gestión eficiente del almacenamiento a través de políticas coordinadas con los colaboradores de la cadena [11], minimizando costos y mejorando la utilización de recursos [12]; [13]; [14].

2.5 Cadena Productiva del Café

Establecer una gestión logística eficiente en la cadena productiva del café mejora la calidad del producto final, reduce desperdicios y promueve prácticas sostenibles [15]. En ese sentido, la eficiencia de la cadena de valor del café requiere considerar aspectos económicos, sociales y ambientales; fundamentales para el desarrollo agrícola sostenible y productivo [16].

Por otro lado, la articulación de los diferentes actores de la cadena constituye una acción esencial para establecer cadenas de suministro resilientes y mejorar la colocación en los mercados internacionales [17] posibilitando el consumo de cafés especiales de origen certificado [18].

2.6 Factores de la Producción del Café

La cantidad y calidad del café dependen directamente de diversos factores relacionados con la siembra y cosecha del grano, el control eficiente de plagas y enfermedades, y la manipulación operativa a lo largo de la cadena productiva [19], lo que permite garantizar una producción sostenible y de calidad; para lo cual, se hace un análisis del contexto del manejo desde la siembra hasta la postcosecha [20].

De igual manera, resulta imprescindible incorporar el componente de desarrollo sostenible [21], buscando garantizar condiciones amigables con el medio ambiente, además incorporar certificaciones de suelos, de especie de origen y la implementación de normas internacionales de comercio (Incoterms) [22].

3. Resultados

La cadena productiva del café en Norte de Santander constituye un pilar fundamental de la economía regional, posicionando al departamento como el sexto mayor productor de café en Colombia. En el año 2021, alcanzó su máximo histórico, con una producción de 10.611.000 kg. Esta actividad agrícola involucra a 16.027 productores distribuidos en 36 municipios, quienes manejan una superficie cultivada de 23.411 hectáreas; de esta área, el 85% corresponde a variedades resistentes [5].

Los principales municipios productores son Arboledas, Convención, Cucutilla, Salazar, San Calixto, Sardinata, y Villa Caro, los cuales en conjunto representan el 41,41% del área cultivada en la región. La producción combina enfoques modernos y tradicionales, incorporando además variedades de cafés especiales que aportan valor agregado al sector [5].

3.1 Caracterización de la cadena productiva del café en Norte de Santander

El sector caficultor del departamento se organiza principalmente a través de cooperativas, las cuales agrupan a los productores del grano, facilitando la comercialización y distribución del café [23].

Estas cooperativas también desarrollan programas de capacitación, gestión de cosechas, certificación de suelos, cualificación del grano, e impulsan la incorporación de tecnologías, insumos y maquinaria agrícola [16]. Actualmente, cuentan con 30 puntos de atención distribuidos en 25 municipios y 5 corregimientos, ampliando la cobertura hacia zonas rurales con dificultades de transporte o acceso a los centros intermedios.

Sin embargo, la cadena productiva del café en Norte de Santander enfrenta desafíos significativos en la organización, gestión, manipulación, almacenamiento y transporte del grano, desde las zonas productoras hasta los centros de transformación (tostadoras). Estas deficiencias han generado un incremento del 31,1% en las pérdidas de cantidad y rentabilidad durante la última década, impactando la económica del sector, especialmente en los pequeños y medianos cultivadores [24].

3.2 Configuración de la cadena productiva de Norte de Santander

Para contextualizar la estructura de la cadena productiva del café en Norte de Santander, se diseñó un diagrama de hilos que detalla la compleja red de actores y eslabones [25]; determinando sus interacciones, flujos de transferencia y grado de asociación [26]; en el diseño se emplearon colores y nomenclatura que permite identificar al eslabón y al actor que integra un determinado grupo, los colores de las flechas (hilos) simbolizan las entregas, devoluciones o pérdidas (desechos) del sistema (ver Figura 2).

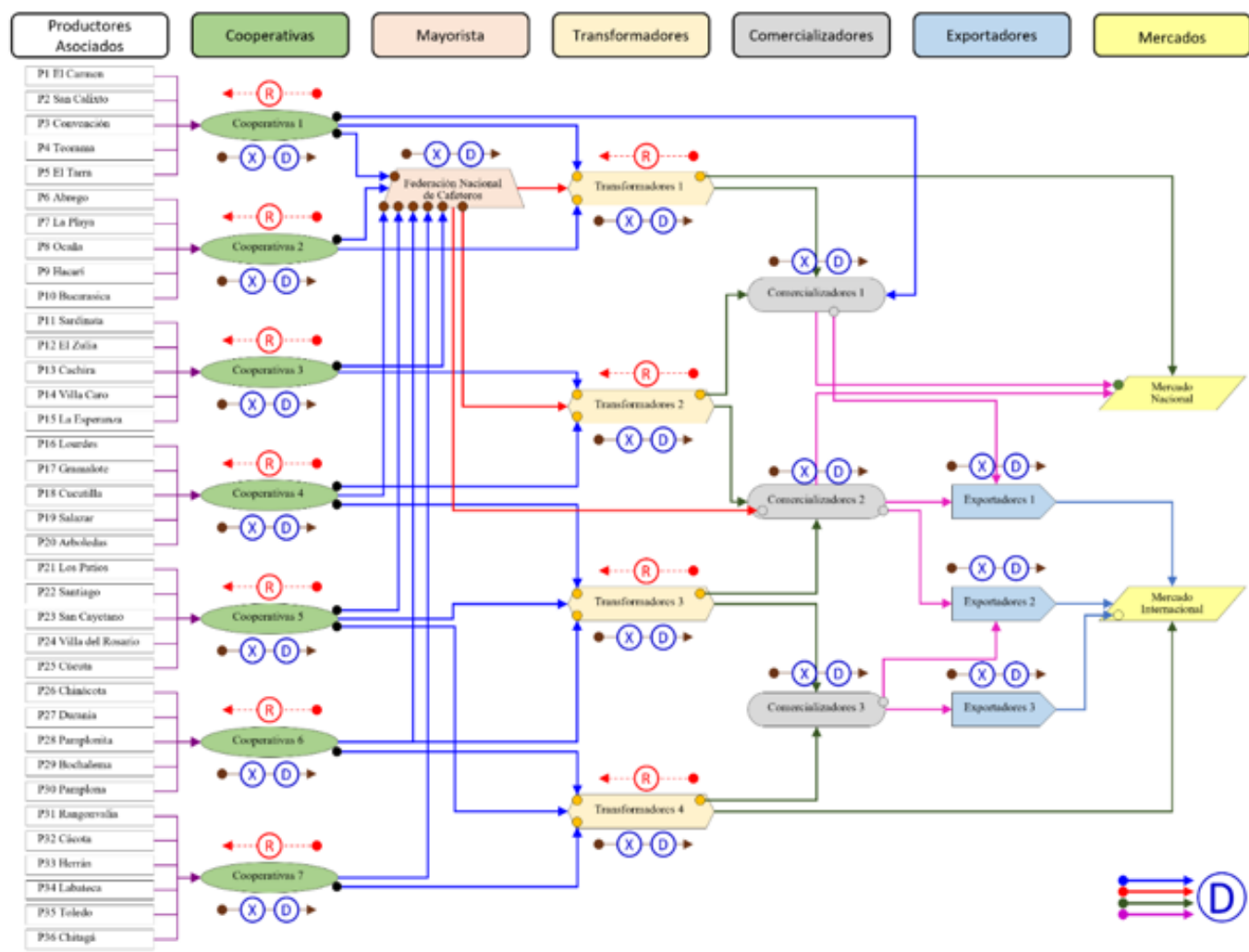






Figura 2. Mapa de hilos – Configuración de la cadena productiva del café.

Para facilitar la interpretación del diagrama de hilos, se presenta la nomenclatura en la Tabla 1.

Tabla 1. Nomenclatura del diagrama de Hilos, explica el significado de cada flujo transaccional entre los eslabones de la cadena productiva.

Símbolo	Descripción
	Representa la entrega de producto de un actor del eslabón origen a un actor del eslabón destino.
	Representa la entrega de producto de un actor del eslabón origen al eslabón desecho.
	Representa la devolución de producto de un actor del eslabón destino a un actor del eslabón origen.
	Representa el eslabón desecho, es decir, la pérdida sistémica de producto (no es un actor).

El diagrama está conformado por los siguientes eslabones:

- *Productores asociados:* constituyen el punto inicial de la cadena productiva en los 36 municipios del departamento. Se destacan Ocaña, con una producción anual de 1.537.000 kg y Tarra con 3.000 kg. La Federación Nacional de Cafeteros y otros intermediarios adquieren el café a precios regulados según las normativas vigentes.
- *Cooperativas:* organizadas en siete asociaciones, desempeñan un rol vital al recopilar y almacenar el café (se destaca la asociación 4, que transfiere 2.335.000 kg anuales). Actúan como enlace estratégico entre productores y la Federación Nacional de Cafeteros, facilitando operaciones de recolección y despacho.
- *Mayoristas:* están representados por la Federación Nacional de Cafeteros, que gestiona 6.264.000 kg de producto al año y despliega un papel central en la regulación de precios, distribución de insumos, bonos cafeteros, y normativas de calidad y estándares agrarios.

• *Transformadores:* procesan 5.081.000 kg anuales de café, transformándolo de grano a café molido para satisfacer las demandas del mercado nacional e internacional, este proceso lo realizan las tostadoras que junto con los comercializadores y exportadores distribuyen el producto a 36 firmas nacionales y 3 internacionales.

• *Mercados nacionales e internacionales:* representan los puntos finales de venta, donde el café se coloca directamente para el consumo; se estima que el café colombiano llega a 93 países en los 5 continentes.

• *Desechos:* recopilan los productos no conformes, que no pueden reintegrarse al ciclo productivo debido a fallos en los protocolos de calidad establecidos, pérdidas por transferencia cruzada, contaminación, vencimiento o deterioro de la carga. En el diagrama, se representa este eslabón mediante un punto, aunque simbólicamente cada actor —desde los productores asociados hasta los transformadores— cuenta con su propio punto de desecho.

3.3 Diagnóstico de la cadena productiva del café

Una vez determinada la configuración de la estructura de la cadena productiva del café en Norte de Santander, se realizó un diagnóstico que permitió establecer el comportamiento de las variables del sector caficulator; identificando los defectos, cantidad de producto concentrado en un eslabón, cruce del cultivo por renovación, sustitución o transferencia y el área de café cultivada vs la disponibilidad de terrenos cultivables.

En ese contexto, la cantidad y calidad del café dependen de factores que propician la siembra y cosecha del grano [27], el control de plagas y enfermedades y, la manipulación operativa

en la cadena productiva [19], permitiendo garantizar una producción sostenible y de calidad [15]; paralogual, se hace un análisis del contexto del manejo desde la siembra hasta la postcosecha [20].

Ahora bien, es importante que a estos factores se le agregue el componente de desarrollo sustentable [21], con el fin de asegurar prácticas compatibles con la protección ambiental y la certificación de calidad. En este sentido, se enfatiza la importancia de incluir certificaciones de suelos, de especie de origen y la aplicación de los Incoterms en los procesos de exportación [22].

En el diagrama de Pareto (ver Figura 3) se presentan los ocho principales defectos que afectan con mayor frecuencia al cultivo y a la calidad del café, incrementado la pérdida global en 54,4% atribuibles a enfermedades y deterioro del producto en el sistema productivo.

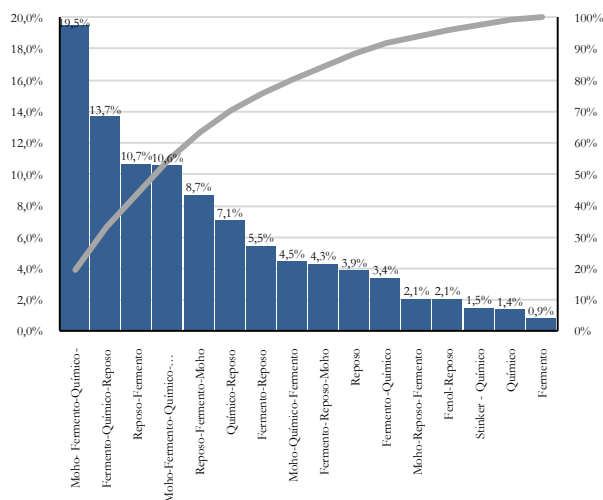


Figura 3. Diagrama Pareto – Defectos del café.

A partir del análisis correlacional de las variables que componen la cadena productiva del café, se establecieron relaciones entre la tipología del cultivo, los procesos de renovación y el área cultivada del grano. Los resultados evidencian que la extensión del cultivo utilizando variedades resistentes y la aplicación de prácticas agrícolas modernas determinan el comportamiento.

En total, se analizaron cinco variables —cultivos renovados, resistentes, susceptibles, cultivos a renovar y tradicionales— en relación con el área de café cultivada, que representa al área objeto de estudio. Por consiguiente, la variable “cultivos renovados” presentó una correlación de 0,990, como se observa en la Figura 4, lo que indica una fuerte asociación con la expansión del área en Café, mostrando una adopción de variedades modernas y técnicas innovadoras de crecimiento en el sector. Municipios como Salazar y Cucutilla reflejan esta tendencia, con importantes áreas de cultivo recientes que contribuyen a su superficie total de café, ya que, para configurar adecuadamente una cadena productiva, se requiere gestionar la demanda [9] permitiendo así mitigar los impactos negativos de la incertidumbre.

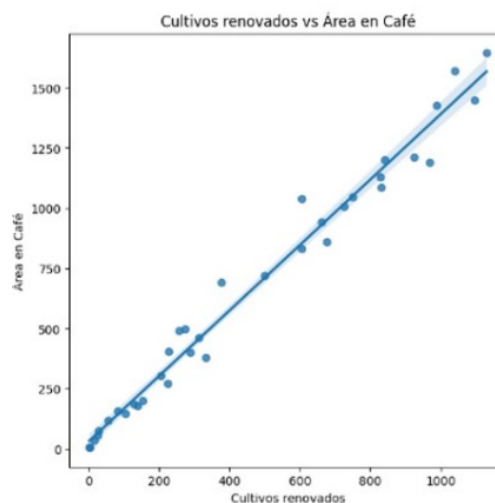


Figura 4. Correlación de variables Cultivos renovados Vs. Área en Café.

Para la variable “Resistente”, en la Figura 5 se presenta una correlación de 0,996, lo que evidencia una fuerte relación positiva con el área total cultivada. Este resultado indica que los cultivos resistentes desempeñan un papel fundamental en la expansión de las grandes extensiones cafeteras. Municipios como Arboledas y Convención destacan por presentar los valores más altos en cultivos resistentes, debido a la amplitud de sus áreas sembradas y la adopción de prácticas agrícolas avanzadas.

En consecuencia, este tipo de cultivo representa una opción para maximizar la productividad, por lo que, se deben llevar a cabo acciones para establecer cadenas productivas resilientes y mejorar la colocación en los mercados internacionales [28] posibilitando incrementar la demanda en el mercado [17].

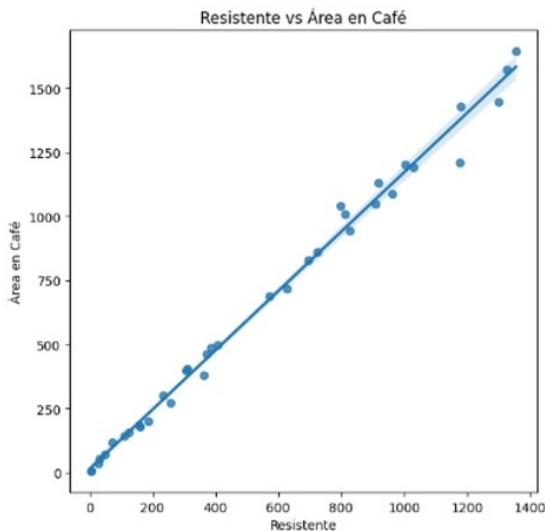


Figura 5. Correlación de variables Resistente Vs. Área en Café.

La correlación entre los cultivos susceptibles y el área en cultivo de café se presenta en la Figura 6, con una correlación de 0,879, positiva moderada; este tipo de cultivos son menos predominantes en grandes extensiones y podrían estar limitados por factores como la vulnerabilidad a enfermedades.

Siendo así, municipios como Chinácota y Ragónvalia destacan por valores moderados en cultivos susceptibles, lo que confirma esta tendencia. Estos hallazgos evidencian la importancia de garantizar una producción sostenible y de calidad en el café [20], teniendo en cuenta la variación de los factores que propicien la siembra y cosecha.

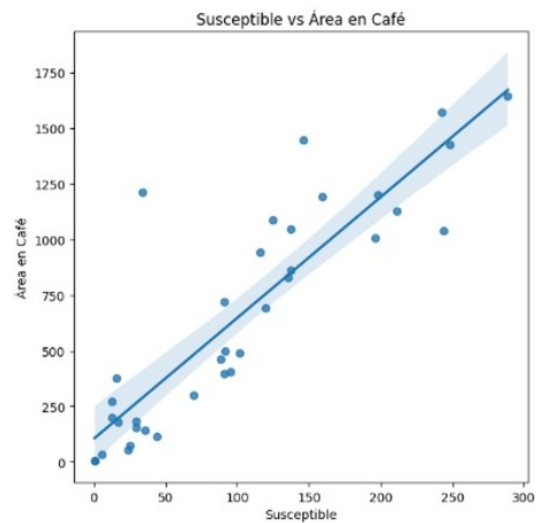


Figura 6. Correlación de variables Susceptible Vs. Área en Café.

En cuanto a la variable “Cultivos a renovar”, la Figura 7 muestra una correlación de 0,963 respecto al área en café. Este resultado indica que, aunque los cultivos antiguos continúan desempeñando un rol relevante en la caficultura, su incidencia es menor en comparación con los cultivos resistentes o recientemente renovados.

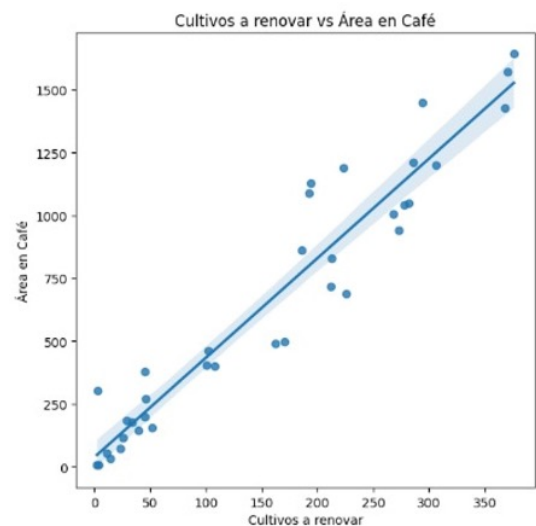


Figura 7. Correlación de variables Cultivos a renovar Vs. Área en Café.

Lo anterior, refleja la aplicación de prácticas tradicionales en ciertas regiones, como en Labateca y Durania, donde los cultivos antiguos mantienen una contribución significativa, permitiendo a los productores analizar las preferencias cambiantes de los consumidores [10], debido a que la modernización es clave, renovar estos cultivos podría ser estratégico en regiones específicas según las adaptaciones de cada área.

De manera que, el tipo de cultivo “tradicional” muestra la correlación más baja (0,546) de acuerdo con el área en café cultivada como se observa en la Figura 8, indicando que su impacto en grandes superficies es limitado, estos cultivos parecen estar más asociados a pequeños productores o zonas con un enfoque más cultural que productivo.

Municipios como Labateca y Lourdes, donde predominan los cultivos tradicionales tienen áreas de café proporcionalmente menores reflejando su rol más complementario que protagónico en el sector, por lo que, posibilita al productor a introducirse en cafés especiales de origen certificado [18].

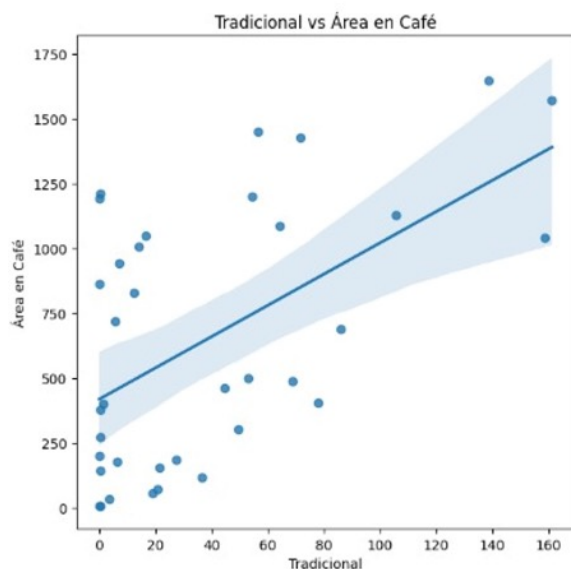


Figura 8. Correlación de variables Tradicional Vs. Área en Café.

Por otro lado, el análisis de la asociación entre la extensión del cultivo de café y dos tipos específicos de prácticas agrícolas permitió identificar un coeficiente de correlación de Pearson de 0,9959, con un valor de p muy bajo ($3,3092892455259347E-37$), demostrando una asociación altamente representativa (ver Figura 9). Asimismo, se visualiza una correlación significativa de 0.9898 para el cultivo reciente, sustentada por un valor de p igualmente bajo ($2,2815993013159705E-30$).

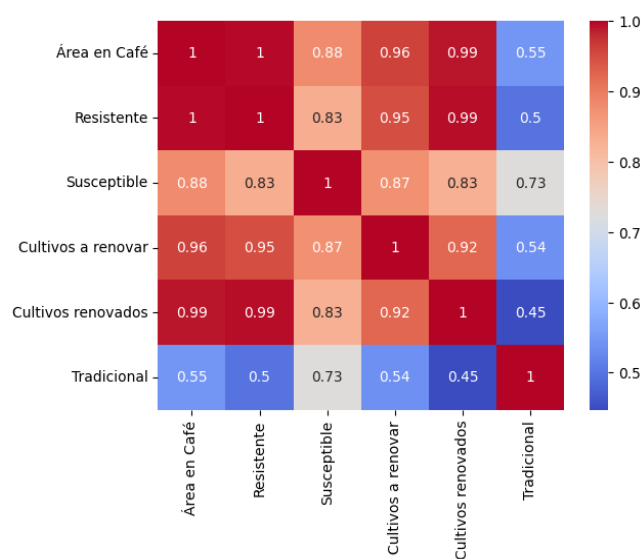


Figura 9. Mapa de calor de variables de cultivos de café.

Por otro lado, se analizó la relación entre los kilogramos de café pergamino seco comprados y la presencia de defectos, mediante un gráfico de pares como se visualiza en la Figura 10, donde la correlación es de 0,12, lo que indica que otros factores tienen un impacto más representativo en la calidad del café, enfatizando la necesidad de una gestión integral de la calidad del mismo, independientemente de la cantidad producida o comprada, lo que destaca la complejidad inherente a la cadena productiva.

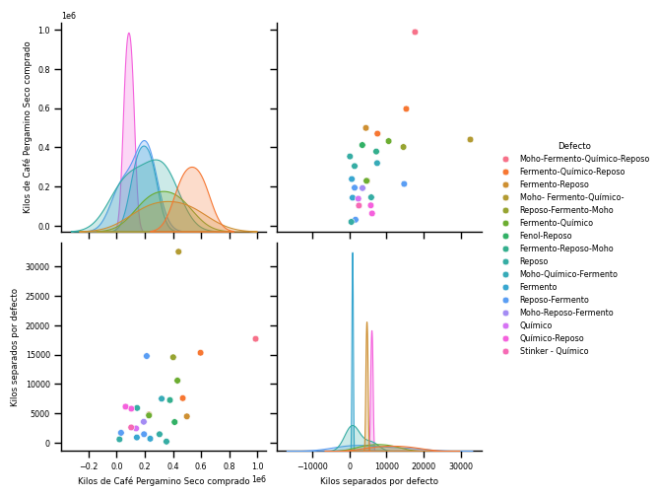


Figura 10. Relación defectos vs kilogramos producidos. Fuente. Autores.

Finalmente, se evidencia la necesidad de establecer políticas o estrategias encaminadas a mejorar la capacitación en prácticas agrícolas, tecnología para la cosecha-postcosecha y recambio de los cultivos tradicionales que posibiliten incrementar el potencial de producción del grano y por ende mejorar la colocación en los mercados nacionales e internacionales.

4. Conclusiones

La configuración de las cadenas productivas permite identificar un contexto estructural y relacional en el que se articulan los flujos entre los diferentes eslabones y actores de un sector agrícola específico. En el caso del sector caficultor del departamento de Norte de Santander, se presenta un diagrama con siete eslabones estructurales, que mediante una red de conexiones describe la articulación entre los diferentes actores. En esta red, las cooperativas destacan como principal gestor entre los cultivadores y los grandes agentes dinamizadores del sector (transformadores, comercializadores y mercados).

El diagnóstico realizado permitió determinar que la cantidad de actores que poseen áreas de café con cultivos tradicionales oscilan en un 40%, generando una alerta para la red de caficultores en la medida que la renovación ha sido tardía e impacta directamente en la capacidad de producción del grano; por otra parte, se identifica la necesidad de incorporar estrategias de capacitación para el empleo de las prácticas agrícolas en el eslabón de los productores en el departamento.

Finalmente, se concluye que la colaboración y coordinación entre los actores de la cadena —a través del uso compartido de tecnología, recursos y medios logísticos— favorece el crecimiento sectorial sostenido, mejora la comunicación entre los flujos relacionales y contribuye a la reducción de reprocesos y pérdidas en la cadena productiva del café en Norte de Santander.

Referencias

- [1] Comité de Cafeteros de Norte de Santander, "Generalidades de la Caficultura en el Departamento de Norte de Santander," Publicaciones FNC, Cúcuta-Colombia, 2022.
- [2] A. Samoggia and A. Fantitni, "Revealing the Governance Dynamics of the Coffee Chain in Colombia: A State of the Art Review," Sustainability Review, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/su151813646>.
- [3] D. Jacobi J., S. Sabine C. and N. Yeretizian Ch., "Making Specialty Coffee and Coffee-Cherry Value Chains Work for Family Farmers Livelihoods: A Participatory Action Research Approach," World Development Perspectives, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wdp.2023.10055>.

- [4] J. Hurtado, *Metodología de la Investigación Holística*, Caracas-Venezuela: Fundación Sygal, 2006.
- [5] Comité Cafetero de Norte de Santander, "Generalidades de la Caficultura en el Departamento Norte de Santander," Federación Nacional de Cafeteros, Norte de Santander, 2022.
- [6] K. Rubio, "Coffee production networks in Costa Rica and Colombia: A systems analysis on voluntary sustainability standards and impacts at the local level," *Journal of Cleaner Production*, Volume 445, 141196, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141196>.
- [7] F. Ceballos y S. Dall, "The effect of climate variability on Colombian coffee productivity: A dynamic panel model approach," *Agricultural Systems*, vol. 190, p.103126, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103126>.
- [8] M. Bavorová, A. Ullah, Y. García and D. Cavicchioli, "Factores que influyen en las decisiones de sucesión de fincas: evidencia de productores de café de Colombia," *Environment, Development and Sustainability*, 2024, doi: <https://doi.org/10.1007/s10668-023-04433-0>.
- [9] M. Wang and J. Yao, "Optimizing the configuration of personalized service supply chain under resource orchestration mechanism," *Electronic Commerce Research*, 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s10660-023-09792-4>.
- [10] J. Zhong, H. Cheng, and F. Jia, "Supply chain resilience capability factors in agri-food supply chains," *Operations Management Research*, 2024, doi: <https://doi.org/10.1007/s12063-024-00470-8>.
- [11] M. Çelik, C. Archetti and H. Süral, "Inventory routing in a warehouse: The storage replenishment routing problem," *European Journal of Operational Research*, vol. 301, Issue 3, pp. 1117-1132, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.11.056>.
- [12] B. Dharma, M. Churiyah, I. Suputra and A. Basuki, "The Effect of Cloud Tracking-Based Integrated Supply Chain Learning Devices on Critical Thinking Skills, Learning Behavior, Student Career Development with Variable Moderation Learning Media," *Revista de Gestão Social e Ambiental*, vol. 18, nº8, e06196, 2024, doi: <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n8-013>.
- [13] Q. Wang, Z. Zhou y G. Wan, "Exact Evaluation and Optimization of Integer-Ratio Policies for Stochastic One-Warehouse Multiple-Retailer Inventory Systems," *Operations Research Letters*, p. 107132, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.orl.2024.107132>.
- [14] F. Alawneh and G. Zhang, "Dual-channel warehouse and inventory management with stochastic demand," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 112, pp. 84–106, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.12.012>.
- [15] O. Aloo, F. Gemechu, H. Oh, E. Kilel, R. Chelliah, G. Gonfa and D. Oh, "Harnessing fermentation for sustainable beverage production: A tool for improving the nutritional quality of coffee bean and valorizing coffee byproducts," *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, vol. 59, p. 103263, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103263>.
- [16] F. Hidalgo, X. Quiñones, A. Birkenberg, T. Daum, C. Bosch, P. Hirsch and R. Birner, "Digitalization, sustainability, and coffee. Opportunities and challenges for agricultural development," *Agricultural Systems*, vol. 208, p. 103660, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103660>.
- [17] K. Tamilselvan et al., "Sustainable valorisation of coffee husk into value-added product in the context of circular bioeconomy: Exploring potential biomass-based value webs," *Food and Bioproducts Processing*, vol. 145, pp. 187–202, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2024.03.008>.

- [18] V. Freitas et al., "Coffee: A comprehensive overview of origin, market, and the quality process," *Trends in Food Science & Technology*, vol. 146, p. 104411, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104411>.
- [19] E. Bagnulo et al., "Industrial food quality and consumer choice: Artificial intelligence-based tools in the chemistry of sensory notes in comfort foods (coffee, cocoa and tea)," *Trends in Food Science & Technology*, vol. 147, p. 104415, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104415>.
- [20] J. Mérillon and K. Ramawat, *Co-Evolution of Secondary Metabolites*, Springer, Cham. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-96397-6>.
- [21] A. León, C. Unigarro and H. Balaguera, "Can prolonged conditions of water deficit alter photosynthetic performance and water relations of coffee plants in central-west Colombia," *South African Journal of Botany*, vol. 149, pp. 366–375, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2022.06.03>.
- [22] Y. Barrios et al., "Integrated effect of yeast inoculation and roasting process conditions on the neoformed contaminants and bioactive compounds of Colombian roasted coffee (*Coffea arabica*)," *Food Research International*, vol. 164, p. 112380, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112380>.
- [23] Centro Nacional de Investigaciones del Café, "Descripción del proceso productivo y del beneficio del café," *Guía tecnológica del cultivo*, 2020. [Online]. <https://federaciondecafeteros.org/static/files/8Capitulo6.pdf>.
- [24] Federación Nacional de Cafeteros, "Compro Café de Colombia," 2024. [Online]. <https://comprocafedecolombia.com/cuales-el-mejor-cultivo-de-cafe-en-colombia/>.
- [25] K. Castellanos, "Estudio de las Mermas Logísticas Empleando Modelamiento Matemático en la Cadena Productiva del Café en Norte de Santander," Universidad de Pamplona, 2024.
- [26] SICA, "Sistema de Información Cafetero," 2022. [Online]. <https://sicanuevo.cafedecolombia.com/login>.
- [27] K. Cloete et al., "Physico-elemental analysis of roasted organic coffee beans from Ethiopia, Colombia, Honduras, and Mexico using X-ray micro-computed tomography and external beam particle induced X-ray emission," *Food Chemistry: X*, vol. 2, p. 100032, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2019.100032>.
- [28] L. Cai, "Decision-making of transportation vehicle routing based on particle swarm optimization algorithm in logistics distribution management," *Cluster Computing*, vol. 26, no. 10, pp. 3707–3718, 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s10586-022-03730-z>, 2022.