

# Café sostenible: innovación y desafíos en la cadena de suministro



## Grupos de investigación:

Grupo de Investigación en Etno-farmacología, Productos Naturales y Alimentos (GIEPRONAL) - UNAD

Grupo de Investigación Alimentos y Agroindustria – Doctorado en Ingeniería – Universidad de Caldas

Grupo de Investigación Finanzas Cuantitativas GIFINC – Universidad del Valle

Grupo de Investigación Cananguchales - UNAD



# CAFÉ SOSTENIBLE: INNOVACIÓN Y DESAFÍOS EN LA CADENA DE SUMINISTRO

## **Autores:**

Alexandra E. Duarte Castillo  
Angélica Yurani Sierra González  
Claudia Marcela Núñez Mejía  
Diego Alberto Marín Idárraga  
Duber Martínez Torres  
Elisa Dayan Henao Rivera

John Wilmer Escobar Velásquez  
Juan Carlos Uribe Hurtado  
July Alexandra Hernández López  
Karen V. Marimon Sibaja  
Óscar Andrés Benavides Parra

## **Grupos de investigación:**

Grupo de Investigación en Etno-farmacología, Productos Naturales y Alimentos (GIEPRONAL) - UNAD

Grupo de Investigación Alimentos y Agroindustria – Doctorado en Ingeniería – Universidad de Caldas

Grupo de Investigación Finanzas Cuantitativas GIFINC – Universidad del Valle

Grupo de Investigación Cananguchales - UNAD

## **UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA (UNAD)**

Jaime Alberto Leal Afanador

**Rector**

Constanza Abadía García

**Vicerrectora académica y de investigación**

Leonardo Yunda Perlaza

**Vicerrector de medios y mediaciones pedagógicas**

Édgar Guillermo Rodríguez Díaz

**Vicerrector de servicios a aspirantes, estudiantes y egresados**

Julialba Ángel Osorio

**Vicerrectora de inclusión social para el desarrollo regional  
y la proyección comunitaria**

Leonardo Eremeleth Sánchez Torres

**Vicerrector de relaciones internacionales**

Claudio Camilo González Clavijo

**Decano Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería**

Martha Viviana Vargas Galindo

**Decana Escuela de Ciencias Sociales, Artes y Humanidades**

Juan Sebastián Chiriví Salomón

**Líder Nacional del Sistema de Gestión de la Investigación (SIGI)**

Martín Gómez Orduz

**Líder Sello Editorial UNAD**

# Versión preliminar

## **Café sostenible: Innovación y desafíos en la cadena de suministro**

**Autores:** Alexandra E. Duarte Castillo, Angelica Yurani Sierra González, Claudia Marcela Núñez Mejía, Diego Alberto Marín Idárraga, Duber Martínez Torres, Elisa Dayan Henao Rivera, John Wilmer Escobar Velásquez, Juan Carlos Uribe Hurtado, July Alexandra Hernández López, Karen V. Marimon Sibaja, Oscar Andrés Benavides Parra

Grupo de Investigación en Etno-farmacología, Productos Naturales y Alimentos (GIEPRONAL) - UNAD  
Grupo de Investigación Alimentos y Agroindustria – Doctorado en Ingeniería Universidad de Caldas  
Grupo de Investigación Finanzas Cuantitativas GIFINC – Universidad del Valle  
Grupo de Investigación Cananguchales - UNAD

### **ISBN:**

### **e-ISBN:**

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnologías e Ingenierías ECBTI

©Editorial

Sello Editorial UNAD

Universidad Nacional Abierta y a Distancia

Calle 14 sur No. 14-23

Bogotá D.C.

Agosto de 2025

**Corrección de textos:** Bibiana Alarcón

**Diagramación:** Roberto Carlos López Castro

**Edición integral:** Hipertexto SAS

**Cómo citar este libro:** Duarte Castillo, A., Sierra González, A., Núñez Mejía, C., Marín Idárraga, D., Martínez Torres, D., Henao Rivera, E., Escobar Velásquez, J., Uribe Hurtado, J., Hernández López, J., Marimon Sibaja, K. y Benavides Parra, O. (2025). Café Sostenible: Innovación y desafíos en la cadena de suministro. Sello Editorial UNAD. DOI PENDIENTE.

Esta obra está bajo una licencia Creative Commons - Atribución – No comercial – Sin Derivar 4.0 internacional.

[https://co.creativecommons.org/?page\\_id=13](https://co.creativecommons.org/?page_id=13).



# CONTENIDO

Reseña del libro.....	6
Reseña de los autores.....	8
Presentación o prefacio.....	11
Prólogo .....	11
<b>Capítulo 1. Contexto y enfoque de sostenibilidad en la cadena de suministro del café (<i>coffea</i>).....</b>	<b>15</b>
Dimensión económica .....	20
Rentabilidad.....	20
Certificaciones.....	20
Dimensión social .....	20
Condiciones laborales .....	20
Empoderamiento de las mujeres .....	20
Dimensión ambiental .....	20
Variabilidad climática.....	20
<b>Conclusiones .....</b>	<b>21</b>
<b>Capítulo 2. Problemáticas y retos actuales en la cadena del café .....</b>	<b>23</b>
<b>Conclusiones.....</b>	<b>28</b>
<b>Capítulo 3. Desafíos de competitividad digital .....</b>	<b>31</b>
<b>Conclusiones.....</b>	<b>36</b>
<b>Capítulo 4. Análisis bibliométrico en relación con las tendencias y características promisorias para una cadena del café sostenible, ágil y viable .....</b>	<b>39</b>
<b>Conclusiones.....</b>	<b>55</b>



Capítulo 5. Análisis cuantitativo sobre patentes desarrolladas en la cadena cafetera .....	57
Conclusiones .....	71
Capítulo 6. Estado del arte de la cadena productiva del café.....	75
Conclusiones .....	82
Capítulo 7. Transformación digital para una cadena de suministro del café ágil .....	85
Conclusiones .....	91
Capítulo 8. Perspectivas de investigación en la producción y comercialización de café verde, más usos alternativos de subproductos como la borra de café de la variedad ( <i>coffea arabica</i> ) .....	95
Denominación de origen .....	100
<b>Conclusiones .....</b>	<b>129</b>
Capítulo 9. Tendencias en la viabilidad y sostenibilidad de CSC: retos y desafíos desde la industria 5.0 .....	131
Conclusiones .....	164
Referencias .....	166
Apéndice .....	221
Análisis de aceptación en grano de café verde .....	221



# RESEÑA DEL LIBRO

El avance de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) en relación con la inequidad y la pobreza, el aumento de la soberanía y seguridad alimentaria y nutricional, la disminución del impacto medioambiental y la preocupación derivada por la crisis climática a raíz de las prácticas presentes en la caficultura cotidiana son temas que están aún por resolver. Para analizar las tendencias y desafíos de sostenibilidad en la cadena de suministro del café — en inglés *coffee supply chain*, y en adelante CSC—, por aquellas razones, se debe involucrar factores en términos sociales, ambientales, económicos, así como su repercusión en el ejercicio de la gobernanza y la toma óptima de decisiones estratégicas, tácticas y operativas. El capítulo 1 aborda el contexto y enfoque de sostenibilidad en la CSC (*Coffea*); el capítulo 2, las problemáticas y retos actuales en la cadena del café, y el capítulo 3, los desafíos de competitividad digital.

Con estas premisas se considera fundamental tener en cuenta en términos económicos la oferta y demanda del producto, disponibilidad de la materia prima y subproductos, el nivel tecnológico, el grado de agroindustrialización, la posible ubicación de los centros de fabricación, el tamaño de las instalaciones, la logística, los medios de transporte, la asignación e inventario y los centros de distribución, que posteriormente permita incluir de manera significativa todas estas operaciones en las conclusiones y recomendaciones para la CSC, entre otros. El capítulo 4 presenta de manera detallada el análisis bibliométrico en relación con las tendencias y características promisorias para una cadena del café sostenible, ágil y viable.

El aprovechamiento de los subproductos está inmerso en las oportunidades potenciales de oferta-demanda a

nivel mundial y nacional de café verde, pergamino seco y tostado cuando sea de tipo especial, orgánico, con sellos y certificaciones, convencional; y sus presentaciones en grano y molido. Adicional, a partir del análisis bibliométrico se configuran los artículos científicos tipo *top* más representativos en la generación de nuevo conocimiento y que fortalecen el trabajo reticular, a partir del fomento de redes de investigación con grupos internacionales y la divulgación pública de la ciencia que se ha realizado a través de *conferences papers* con participación de caficultores y académicos en eventos científico y ferias comerciales de impacto, que promueven la apropiación social y el racionalismo crítico intersubjetivo.

El capítulo 5 expone los resultados del análisis cuantitativo sobre patentes desarrolladas en la cadena cafetera, en consecuencia, se deduce que metodologías para la identificación de las zonas de producción cafeteras, las herramientas para la definición de la población objeto de estudio y el análisis de la CSC basado en modelos matemáticos son aún escasos en la literatura científica, un campo de investigación por explorar que logre integrar aspectos sociales, ambientales y económicos en la gestión de la *supply chain*.

El capítulo 6 presenta el estado del arte de la cadena productiva del café; el capítulo 7, la transformación digital para una CSC ágil; el capítulo 8 profundiza en las perspectivas de investigación en la producción y comercialización de café verde, más usos alternativos de subproductos como la borra de café de la variedad *Coffea arabica*.

Por estas razones, el presente libro aborda las tendencias a nivel científico y la incorporación de tecnologías de última generación como, por ejemplo, la inteligencia artificial (IA), como también el desarrollo de investigaciones que tengan en cuenta el análisis multiobjetivo a partir de escenarios de sostenibilidad y sustentabilidad para un contexto regional cafetero. Por último, el capítulo 9 expone las tendencias en la viabilidad y sostenibilidad de la cadena de suministro de café, retos y desafíos desde la industria 5.0.

# RESEÑA DE LOS AUTORES

## **Alexandra Duarte Castillo**

Ingeniera Química (2006) de la Universidad Nacional de Colombia, Magíster en Ingeniería Química (2010) y Doctora en Ingeniería – Industria y Organizaciones (2016) UNAL. Autor/coautor de más de 15 publicaciones en temas tales como optimización y diseño de cadenas de abastecimiento sostenibles. Actualmente es profesora de planta de la Universidad de Caldas e investigadora adscrita al Grupo de Investigación en Innovación y Desarrollo Tecnológico de la Universidad Nacional Sede Manizales y al grupo Alimentos y Agroindustria de la Universidad de Caldas.

## **John Wilmer Escobar Velásquez**

Ingeniero Industrial, especialista en finanzas, Magíster en ingeniería – Universidad del Valle. PhD. en investigación de operaciones Università e Ricerca – Italia. Integrante del grupo de Investigación Finanzas Cuantitativas GIFINC – Universidad del Valle.

## **Angélica Yurani Sierra González**

Técnica en Agroindustria Alimentaria, Tecnóloga en Procesamiento de Alimentos, Ingeniera de Alimentos de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD. Especialista en Gerencia de la Calidad. Líder en implementación de Sistemas de Gestión de las normas ISO/IEC 17025:2017, ISO 22000:2018 y la ISO 9001:2015 en la industria alimentaria. Semillerista - ingeniería de alimentos, UNAD, CEAD Ibagué. Integrante del Semillero SEPRON-BIOTECAL de GIEPRONAL.

## **Claudia Marcela Núñez Mejía**

Ingeniera de Alimentos de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD. Analista de calidades Senior, con más de 8 años de experiencia en la industria del café y actualmente vinculada a la empresa ALMACAFE. Semillerista – UNAD, CEAD, Ibagué. Integrante del Semillero SEPRON-BIOTECAL de GIEPRONAL.

### **Diego Alberto Marín Idárraga**

Ingeniero Agroindustrial de la Universidad del Tolima. Especialista en Evaluación y Desarrollo de Proyectos de la Universidad del Rosario – Universidad de Ibagué. MA Master of Arts in education online, UNAD, Florida – USA. Estudiante PhD. en Ingeniería de la Universidad de Caldas - Becario Minciencias. Docente de la Escuela de Ciencias Básicas, Tecnologías e Ingenierías, ECBTI. Líder del Semillero de Investigación en Productos Naturales y Biotecnología Alimentaria, SEPRON-BIOTECAL. Líder del Grupo de Investigación en Etnofarmacología, Productos Naturales y Alimentos GIEPRONAL - UNAD.

### **Duber Martínez Torres**

Ingeniero Electrónico, Magíster y Doctor en Ingeniería de la Universidad del Valle. Docente de la Escuela de Ciencias Básicas, Tecnologías e Ingenierías, ECBTI. Integrante del Grupo de Investigación en Desarrollo Tecnológico GIDESTEC y líder del Semillero de Ingeniería Aplicada a la Robótica y Telecomunicaciones – SIART.

### **Elisa Dayan Henao Rivera**

Ingeniera de Sistemas UNAD. Magíster en proyectos educativos mediados por TIC, docente de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD, con experiencia en trabajo con comunidades. Formulación y desarrollo de proyectos sociales y comunitarios para el cierre de brechas sociales, especialmente en los municipios PDET y ZOMAC de Colombia, Así mismo con 5 años de experiencia en el sector público y privado.

### **Karen Vanessa Marimón Sibaja**

Ingeniera de Alimentos Universidad de Córdoba. Msc. en Ciencia y Tecnología de alimentos Universidade Federal de Viçosa – Brasil. PhD. en Ingeniería y Ciencia de Alimentos Universidade Federal de Rio Grande – Brasil. Docente de la Escuela de Ciencias Básicas, Tecnologías e Ingenierías, ECBTI. Integrante del grupo GIEPRONAL y del Semillero de Investigación en Productos Naturales y Biotecnología Alimentaria SEPRON-BIOTECAL.

### **July Alexandra Hernández López**

Docente ocasional de la Cadena de Ciencias Básicas, Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD. Investigadora, estudiante de doctorado en Ciencias Químicas de la Universidad del Quindío, becaria MinCiencias. Magíster en Química, Universidad del Quindío (Armenia – Colombia, 2016). Licenciada en Educación Básica con énfasis en Ciencias Naturales y Educación Ambiental de la Universidad del Tolima (Ibagué, Colombia, 2012). Integrante del grupo de Investigación en Etnofarmacología, Productos Naturales y Alimentos

(GIEPRONAL). Docente de la Escuela de Ciencias Básicas, Tecnologías e Ingenierías ECBTI – UNAD. Integrante del grupo de investigaciones Mellitopolinológicas y Propiedades Fisicoquímicas de Alimentos (GILLEMISFISTO) de la Universidad del Tolima.

### **Juan Carlos Uribe Hurtado**

Ingeniero Químico (2004) de la Universidad Nacional de Colombia, Docente catedrático de la Universidad de Caldas y estudiante de Doctorado en Ingeniería de la Universidad de Caldas (2024). Gerente técnico y socio de la empresa VIDEN S.A.S, empresario con más de 15 años de experiencia y desarrollo de más de 100 proyectos de ingeniería y consultoría especializada, para el diseño de equipos industriales y plantas de tratamiento de aguas. Consultor en más de 50 empresas en revisión de oportunidades de mejora, optimización, sistema de gestión y temas jurídicos ambientales como beneficios tributarios.

### **Oscar Andrés Benavides Parra**

Director UNAD, CEAD Ibagué. Investigador del grupo CANANGUCHALES – ECACEN - UNAD.

# PRESENTACIÓN O PREFACIO

Actualmente, las empresas deben gestionar diversos proveedores, socios y clientes que algunas veces son directos e indirectos, como también los consumidores potenciales que se encuentran en cualquier lugar del mundo; por ejemplo, la pandemia por Covid-19 evidenció que la dinámica de demanda del mercado en general y del café, en particular, es cambiante y que son múltiples los riesgos que puede tener el trabajo cotidiano y fluido en la coffee supply chain (CSC), que han sido abordados en estudios científicos y fueron objeto de análisis en el presente documento. El impacto de esta investigación se refleja en la necesidad de tener una CSC mucho más ágil y dinámica, a partir del abordaje de los retos y desafíos desde una visión agroindustrial.

## PRÓLOGO

El café es mucho más que un simple producto de consumo. En Colombia ha sido una fuerza transformadora que viene incidiendo tanto en la política y economía como en la institucionalidad y la vida social del país (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia [FNC], 2017). Frente a tan significativo impacto, es preciso abordar los avances y retos que vienen transformando la industria cafetera. En este libro *Café sostenible: innovación y desafíos en la cadena de suministro*, se exploran los distintos elementos los distintos elementos que componen esta cadena de valor desde una perspectiva multidisciplinaria que

incluye una postura científica, análisis económicos, tecnológicos y socioculturales. Este libro proporciona una visión integral de cómo la producción cafetera, lejos de ser un simple monocultivo, es una estructura social y productiva con profundos lazos familiares, comunitarios y culturales.

La industria del café puede verse como un claro ejemplo de cómo el imaginario social configura instituciones y prácticas productivas. Donde los actores sociales, en este caso los caficultores, crean una estructura simbólica que no solo les proporciona sustento económico, sino que también da forma a su identidad y relación con la tierra. De este modo, para Castoriadis (1975), la capacidad creativa de una sociedad para imaginar y construir instituciones es lo que le permite crear significados colectivos, que provienen de la sustancia exterior, de esa intelección que se construye alrededor de la caficultura. Desde esta perspectiva, el café no es solo un producto en el mercado global, sino un elemento simbólico que configura la vida social y económica de los caficultores colombianos, en otras palabras, es un testimonio de creación social que estructura la vida de miles de familias, tanto productoras como consumidoras.

Por otro lado, vale la pena repensar las relaciones entre el ser humano y la naturaleza desde una óptica de cuidado y sostenibilidad agrícola. En términos de Escobar (2014), es importante entender los territorios rurales desde una perspectiva no solo productiva, sino también ecológica y de bienestar comunitario. En el contexto de la Cadena de Suministro del Café, (CSC) es pertinente entender cómo se incorporan las prácticas agrícolas que no solo se centren en el rendimiento, sino en la armonización de las necesidades humanas con la protección ambiental. De este modo, la caficultura, es también una manifestación de la necesidad de una ‘relocalización’ del desarrollo, en la que las comunidades cafeteras participen activamente en la creación de un futuro más sostenible.

Esta perspectiva posestructuralista y ecológica promueve una cosmovisión en la que el ser humano no es un dominador de la naturaleza, sino parte integral de ella, lo que exige formas de vivir y producir que reconozcan y respeten los límites ecológicos y las relaciones socioambientales (Escobar, 2014). En el caso de la caficultura, este planteamiento invita a una reflexión profunda sobre cómo las prácticas agrícolas pueden ser reconceptualizadas desde una lógica de sostenibilidad y respeto por el entorno natural; es así como la producción de café no solo involucra la implementación de técnicas agrícolas sostenibles, que integran los conocimientos ancestrales con los avances tecnológicos de la industria 5.0 (evolución de la Industria 4.0, ahora centrada entre la colaboración de humanos y máquinas para crear entornos productivos más inteligentes y eficientes. A diferencia de la Industria 4.0, que se enfocaba en la

automatización y la digitalización, la Industria 5.0 pone a los humanos en el centro del proceso de la producción al analizar la interacción humano-máquina y la personalización desde un enfoque de sostenibilidad).

Al respecto de esto, Capra (1998) plantea una «visión sistémica de la vida», donde los ecosistemas son entendidos como redes complejas e interdependientes en las que cada elemento cumple una función vital. Así, la caficultura sostenible se convierte en un espacio para estar ecológicamente alfabetizado o en términos de Escobar (2014) «sentipensar» con la Tierra. En efecto, esto implica que las innovaciones tecnológicas no se utilicen únicamente para maximizar la producción a corto plazo, sino para asegurar la resiliencia del ecosistema y el bienestar de las comunidades a largo plazo. Este tipo de integración entre saberes locales y tecnologías modernas refuerza la idea de un futuro más sostenible para las zonas rurales, donde la producción agrícola coexiste armónicamente con la naturaleza y las tradiciones culturales.

Sin embargo, la teoría sobre el desarrollo humano de Sen (1999) refuerza esta visión al afirmar que el verdadero progreso económico no se mide solo por el crecimiento del PIB, sino por las oportunidades que se ofrecen a las personas para vivir una vida digna y plena. En este contexto, el desarrollo de la CSC no debe estar orientado únicamente a la maximización del rendimiento, sino también a generar bienestar social en los dos polos de la cadena, es decir, asegurando que los caficultores y sus familias tengan acceso a educación, salud y una vida digna. También garantizándole al consumidor final de café una promesa simbólica de valor, puesto que este desempeña un rol constitutivo y significativo en torno al café, ya que el producto está diseñado no solo para su bienestar y las peculiaridades gustativas de cada consumidor, sino también para integrarse a las dinámicas inherentes de la revolución industrial 5.0.

En este marco, las empresas de base tecnológica (EBT), conocidas como *spin-offs* o *start-ups*, desempeñan un papel clave al impulsar la trazabilidad y la gestión de la calidad integral del café. Estos mecanismos no solo aseguran la excelencia del producto, sino que también generan impactos sociales y culturales significativos, como se refleja en el enfoque del triple *bottom line*, que considera la sostenibilidad económica, social y ambiental. Por lo tanto, desde la academia y la pedagogía, es fundamental crear espacios que promuevan la transformación digital acelerada en la cadena de valor del café, desarrollando nuevas tecnologías, patentes e innovaciones que contribuyan a una mayor sostenibilidad. El respeto por el ambiente y la conservación de los recursos naturales renovables y no renovables deben ser prioritarios para la caficultura, fomentando una sinergia entre la universidad, la empresa y el Estado que promueva el equilibrio con la naturaleza.

Por tanto, este libro invita a reflexionar crítico-analíticamente sobre la importancia de ver la caficultura desde una perspectiva holística. El café no es simplemente un producto agrícola. Es un motor de transformación social y cultural. Implementar nuevas tecnologías como la inteligencia artificial, el blockchain y la digitalización de la CSC pueden mejorar la eficiencia y competitividad del sector, pero debe hacerse en consonancia con los valores de sostenibilidad y justicia social que han caracterizado a la tradición cafetera colombiana. De esta manera, cada capítulo dedica sus páginas al descubrimiento de las tendencias, desafíos e innovaciones que contribuyen a una mayor sostenibilidad de la caficultura. Las siguientes páginas buscan ofrecerle al lector una visión panorámica de la producción de café, lo que permitiría enfrentar los desafíos contemporáneos y futuros.

***Elisa Henao Rivera – Diego Marín Idárraga***

## CONTEXTO Y ENFOQUE DE SOSTENIBILIDAD EN LA CADENA DE SUMINISTRO DEL CAFÉ (COFFEA)

La sostenibilidad en la CSC es hoy día uno de los cuellos de botella en relación con las perturbaciones y los escenarios inciertos en el quehacer cotidiano. La Comisión Brundtland de las Naciones Unidas definió la sostenibilidad como lo que permite “satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la habilidad de las futuras generaciones de satisfacer sus necesidades propias”. El desarrollo sostenible requiere un enfoque integral que tome en consideración las preocupaciones ambientales junto con el desarrollo económico según la ONU (1987). La sostenibilidad abarca varios aspectos ambientales, sociales y económicos; entre estos se encuentran:

1. Incorporación de tecnología en los procesos de producción sostenible: la implementación de tecnologías avanzadas y prácticas agrícolas sostenibles podrían reducir el impacto ambiental del cultivo de café. Esto incluye el uso eficiente del agua, el análisis de la huella hídrica, huella ecológica y huella de carbono, la reducción de pesticidas y fertilizantes de origen químico, y la adopción de métodos de cultivo orgánico y más amigables con el ambiente.

2. Impacto ambiental y calidad del café: es fundamental minimizar el impacto ambiental en todos los eslabones de la CSC, desde el cultivo hasta la distribución. Esto no solo ayuda a preservar los ecosistemas locales, sino que también contribuye a mejorar la calidad del grano, incrementando la competitividad regional, nacional e internacional.
3. Comportamiento del consumidor y valor agregado: los consumidores están cada vez más interesados en productos sostenibles y éticos. Las empresas de café pueden agregar valor a sus productos al garantizar prácticas sostenibles y transparentes. Trabajar en el aumento de certificaciones de comercio justo y sostenibilidad, implica tener en cuenta mercados más amplios, diversos y conscientes de un producto consumido con altos estándares de calidad.
4. Economía circular y objetivos de desarrollo sostenible: integrar principios de economía circular y alinearse con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, (ODS) ayudaría a las empresas cafeteras a ser más sostenibles. Reciclar y reutilizar recursos, reducir residuos y mejorar la eficiencia energética son problemáticas que están aún por resolver en la industria cafetera.

De acuerdo con lo anterior, la adopción de un enfoque integral y colaborativo mejoraría la sostenibilidad en la CSC. Para ello es menester conocer los siguientes datos que dan un panorama preocupante, pero de interés para la ciencia, según Barómetro del Café (2023):

**Deforestación:** en los últimos 20 años, se han perdido aproximadamente 130,000 hectáreas de bosques anualmente debido a la expansión de tierras de cultivo de café.

**Ingresos de los productores:** en ocho de los diez principales países productores de café, los ingresos de los agricultores están a la par o por debajo de la línea de ingreso digno.

**Emisiones de carbono:** el cultivo de café contribuye significativamente a las emisiones de carbono. Por ejemplo, un estudio reciente mostró que las emisiones promedio ponderadas por área y producción son considerables

Índice de sostenibilidad de tostadoras: solo dos de las once mayores empresas tostadoras de café tienen estrategias completas en cuanto a metas sociales y de sostenibilidad.

Estas cifras subrayan la necesidad de adoptar prácticas más sostenibles en la producción y comercialización del café. Sin embargo, por ejemplo, los baches o discontinuidades por efecto de conflictos políticos como el de Ucrania - Rusia y el de Medio Oriente, los fenómenos naturales y desastres, la pérdida de calidad o de los productos, entre otros, albergan oportunidades que son afrontados por las empresas a partir de una mayor interdependencia y un viraje hacia un entorno influenciado por la transformación digital con base en el estudio de la ciencia de datos, como también las tecnologías de información y comunicación TIC que podrían aliviar cargas relacionadas con estos traumatismos, según autores representativos como lo son Bager et al. (2022); Fontana y Pisalyaput (2022); Jaber et al. (2022); Janakiraman y Ayyanathan (2022); Kittichotsawat et al. (2021); Kshetri, (2018); Sunmola et al. (2021); Tharatipyakul et al. (2022); Thiruchelvam et al. (2018) y Umaran et al. (2022), que resaltan la importancia de la inclusión de temáticas de investigación como lo son el modelado matemático, el *machine learning*, la robótica, la inteligencia artificial, el *blockchain*, la *big data*, el internet de las cosas (IoT) y los sistemas de la cadena de suministro (SCS), que a su vez permiten un mayor grado de automatización, trabajo colaborativo y coordinado entre socios y aliados, dando una mejor y oportuna respuesta en términos de sustentabilidad, al implicar tener que eliminar prácticas indeseables o insostenibles y la adopción de estándares de responsabilidad social empresarial que sean amigables con el ambiente.

En tal sentido, Styles et al. (2012) expresan que los indicadores de gestión relacionados con efectividad, eficacia y eficiencia serán claves para el logro del aumento de la rentabilidad, la calidad de vida, la flexibilidad, un mayor crecimiento o expansión en el mercado con reducción de costos y se relaciona con lo expuesto por Villalva-Catano et al. (2019) que refiere un aumento directo de la competitividad.

Por consiguiente, una mayor adaptabilidad en un entorno cambiante y fluctuante, como lo mencionan Nalau y Cobb (2022), desde una mejora continua y un beneficio sostenible para las organizaciones empresariales, sus colaboradores y, por supuesto, las familias, asociaciones y comunidades en el microterritorio, son clave para los propósitos de progreso y desarrollo cafetero, alineado a las investigaciones realizadas por Nomaguchi et al. (2017) y Toi et al. (2018). Sin embargo, una óptima gestión de la supply chain es un desafío complejo, como lo mencionan Caravelli y Medda (2016), dado que se debe garantizar que los productos lleguen a un precio y tiempo justos, como afirman Grabs y Carodenuto (2021), al tener en cuenta las condiciones de demanda en el mercado, con pleno cumplimiento de calidad y excelencia, que fueron desarrollados por Anders y Fedoseeva (2017); D'Addario (2013); Kanamaru (2020) y Servín-Juárez et al. (2021), respectivamente.

De acuerdo con lo anterior, para Banker et al. (2011), Gupta et al. (2022), Raford, (2015) y Van Hille et al. (2020), la transformación digital para la CSC se refiere al desarrollo paralelo de sistemas dinámicos, herramientas digitales y de gestión del conocimiento, que se utilizan para conectar a los diferentes actores de la CSC, desde los productores hasta los consumidores finales.

Adicional, el desarrollo de *software* puede mejorar la transparencia y la trazabilidad de la cadena, así como facilitar la comunicación y colaboración entre los diferentes actores, teniendo un impacto considerable en el corto, mediano y largo plazo en la dinámica de la cadena de valor, según lo afirman Aristizábal-Marulanda et al. (2022), Estevez et al. (2018), Hakim et al. (2020); Quiñones-Ruiz et al. (2015) y Wang et al. (2022). Considerando que, en la actualidad, según DispatchTrack (2023), la transformación digital es el proceso de cambio que pasa de una sociedad y economía analógica a una digital en la CSC. Se refiere a sistemas de gestión de la información con incidencia directa en la trazabilidad, y sumado a esto, se fomenta la diversificación y el desarrollo de nuevas aplicaciones móviles para todos los actores de la CSC. Por lo tanto, son las plataformas de comercio electrónico un mecanismo innovador para la realización de negocios *online* u *offline*, aunados a los sistemas de trazabilidad y rastreo para efectos de alta calidad y transparencia a partir de redes sociales y estrategias de marketing y por último el registro de patentes que pueden mejorar el proceso de gestión entre estas, donde se incluyen los sistemas de seguimiento y rastreo, sistemas de gestión de inventario, sistemas de automatización de procesos, los sistemas de inteligencia artificial y *machine learning*, acorde con Inouye y Kling (2020); Kennedy et al. (2020), y Kumar y Sharma (2021).

Sumado a esto, se encuentra presente el reto de conocer el Índice de Competitividad Regional Cafetero para Colombia (en adelante ICRC), que compara capacidades de las regiones para generar desarrollo sostenible en producción y a la vez promover bienestar de la familia. De acuerdo con la FNC (2008), los criterios de sostenibilidad económica, social y ambiental para la construcción del ICRC se originan a partir de nueve pilares que son:

- » Infraestructura/localización
- » Recursos naturales
- » Mercado laboral
- » Condiciones de vida
- » Desempeño económico
- » Tecnología

- » Calidad y diferenciación
- » Institucionalidad cafetera
- » Condiciones de seguridad

Del mismo modo, acorde con Carter (2020); Ghoshray y Mohan (2021) y Gupta et al. (2022), el desarrollo de *software* facilita la toma de decisiones estratégicas más acertadas, lo cual es clave para alcanzar el éxito empresarial en un entorno económico global. Este enfoque contribuye a la sostenibilidad y permite aprovechar el potencial de cualquier región, en cualquier país del mundo, donde se gestione una CSC con un enfoque sustentable. Adicional, se afirma, por parte de Hakmaoui et al. (2022), Horvat et al. (2015), Pujadi et al. (2020), Tibola et al. (2018) y Wong et al. (2011), que con el uso de desarrollos tecnológicos se brinda un soporte necesario en la transformación digital de herramientas que contribuyen a dinamizar de forma novedosa el análisis de la oferta-demanda de café a nivel global.

La presente investigación se enfocó en analizar la gestión de la CSC a partir de Carvalho et al. (2016), del modelado matemático y la transformación digital al adaptar las TIC de última generación que aún no se encuentran del todo de manera funcional desarrolladas, por ejemplo, en Latinoamérica para el encadenamiento productivo desde *e-research*, como lo afirman Garcia-Freites et al. (2020) y Ramírez et al. (2019). Sumado a esto, Duarte et al. (2016) expresan que, entre otras acciones, emerge la necesidad de lograr una reconversión de las operaciones agrícolas, a través de la introducción de nuevas tecnologías y el mejoramiento de los procesos actuales, con miras a la generación de productos de alto valor agregado.

Acorde con lo anterior, la sostenibilidad en la CSC es un tema que ha venido tomando mayor relevancia en los últimos días, dado que la producción de café involucra a millones de pequeños agricultores y tiene un impacto significativo en las economías locales y el ambiente. En términos productivos, el café es uno de los productos agrícolas más importantes a nivel mundial, con más de 25 millones de familias dependiendo de su producción. Sin embargo, la industria enfrenta varios desafíos, como la rentabilidad de los agricultores, la fluctuación de los precios del mercado. Entre los enfoques de sostenibilidad se deben por tanto analizar las siguientes dimensiones económica, social y ambiental.

## *Dimensión económica*

### **Rentabilidad**

Es esencial asegurar que los agricultores obtengan ingresos justos para mantener su sustento y continuar produciendo café de calidad.

### **Certificaciones**

Programas como Fair Trade y Rainforest Alliance ayudan a garantizar precios justos y prácticas sostenibles.

## *Dimensión social*

### **Condiciones laborales**

Mejorar las condiciones de trabajo y asegurar salarios justos para los trabajadores es fundamental.

### **Empoderamiento de las mujeres**

Las mujeres representan una parte significativa de la fuerza laboral en la producción de café y su empoderamiento es clave para el desarrollo sostenible.

## *Dimensión ambiental*

Prácticas agrícolas sostenibles que permitan implementar técnicas de cultivo que reduzcan el uso de pesticidas y promuevan la biodiversidad.

### **Variabilidad climática**

Adaptar las prácticas agrícolas para mitigar los efectos de la variabilidad climática y proteger los ecosistemas locales.

Algunos ejemplos de iniciativas son el Global Coffee Platform: esta organización promueve un código de referencia de sostenibilidad que sirve como guía para los caficultores, ayudándoles a evaluar y mejorar sus prácticas. Expocafé: una exportadora colombiana de café verde que ha implementado estrategias de sostenibilidad en su CSC, enfocándose en la economía circular y los objetivos de desarrollo sostenible.

Es decir que la sostenibilidad en la CSC no solo beneficia a los productores y al medioambiente, también asegura la calidad y disponibilidad del café para los consumidores a largo plazo; una cadena con robustez permite consolidarse desde la eficiencia, la eficacia y la efectividad.

## CONCLUSIONES

La sostenibilidad en la CSC es muy importante para enfrentar perturbaciones y escenarios inciertos. Es necesario un enfoque integral que considere aspectos ambientales, sociales y económicos.

La industria del café enfrenta desafíos como la deforestación, bajos ingresos de los productores y altas emisiones de carbono. Sin embargo, la transformación digital y el uso de Tecnologías de Información y Comunicación (TIC) pueden aliviar estos problemas y mejorar la sostenibilidad.

La adopción de tecnologías como el *machine learning*, la inteligencia artificial, el *blockchain* y el Internet de las Cosas (IoT) puede mejorar la automatización, la colaboración y la transparencia en la CSC.

El Índice de Competitividad Regional Cafetero (ICRC) permite evaluar las capacidades de las regiones para generar desarrollo sostenible y promover el bienestar de las familias es esencial. Los pilares del ICRC incluyen infraestructura, recursos naturales, mercado laboral, condiciones de vida, desempeño económico, tecnología, calidad y diferenciación, institucionalidad cafetera y condiciones de seguridad.

El desarrollo de *software* puede mejorar la transparencia y trazabilidad de la CSC, facilitando la comunicación y colaboración entre los diferentes actores y teniendo un impacto considerable en la dinámica de la cadena de valor.

El empoderamiento rural femenino y la mejora de las condiciones laborales permitiría asegurar salarios justos para los trabajadores, así como empoderar a las mujeres en la producción de café, son claves para el desarrollo sostenible. Por tanto, la sostenibilidad en la CSC requiere un enfoque colaborativo, apoyado por la transformación digital, para enfrentar los desafíos actuales y asegurar un futuro sostenible.



## PROBLEMÁTICAS Y RETOS ACTUALES EN LA CADENA DEL CAFÉ

Asegurar la sostenibilidad para la CSC es tarea por cumplir en medio de grandes incertidumbres y perturbaciones de mercado en un mundo pospandémico a raíz del Covid-19; en tal sentido ajustar y reformar la gobernanza, evaluar el efecto ambiental y su impacto son aspectos necesarios y por considerar dentro de los estudios de investigación científica para que haya mejor y más calidad de vida para los caficultores que presentan aún miseria, exclusión y pobreza en el campo por abandono del Estado. Hay una carencia de información general sobre la familia rural cafetera, la caracterización social, económica, la asistencia técnica (información restringida), el encadenamiento productivo y, por supuesto, la retención de mano de obra en el campo desde la renovación generacional.

Según el World Economic Forum (2018) las fincas de café que cultivan bajo luz solar pueden tener problemas de polinización y plagas. Por esta razón, se aumenta la dependencia de pesticidas y, con ello, se perpetúa el deterioro del ecosistema, con reconversión a lo tradicional. De otro lado, es una realidad que el café colombiano se encuentra en auge al experimentar un crecimiento más elevado que Brasil. El volumen nacional de café producido se elevó un 74 %, al pasar de 8,1 a 14,1 millones de sacos de 60 kg en 2020, en medio de la incertidumbre de la vida útil del producto, la caducidad relacionada con la demanda e interrupciones del transporte por situaciones de desastre como

la pandemia por Covid-19. Ello amplificó los riesgos ambientales y económicos para lograr una evolución hacia una *green supply chain* del Café (GCSC), en escenarios de sostenibilidad con una transformación digital paulatina.

No obstante, aunque Colombia es uno de los países comprometidos con el comercio justo del café, según Oruz (2022) en Statista (2023), este nuevo nicho de mercado no ha generado una plena conciencia con la justicia social o la variabilidad climática. De hecho, el país ocupa el segundo lugar de la región con más productores con sello de Fair Trade pero no se sabe a ciencia cierta cuál es el impacto que han tenido estos sellos y certificaciones para las comunidades de influencia del producto.

Por lo tanto, de la literatura consultada y disponible se ha reportado un número limitado de estudios sobre el impacto de las certificaciones y sellos, y a su vez sobre cuál es la huella de carbono que representa el volumen total de gases de efecto invernadero (GEI) que producen las actividades económicas y cotidianas de la CSC y su incidencia en el ambiente. Torabzadeh et al. (2022) plantearon un diseño de sistema multiobjetivo o multiperiodo de red de GCSC para productos perecederos en entornos inciertos, un estudio de caso en la industria de café en Irán, aplicando un modelado matemático para el problema ubicación-asignación-inventario en un SCN de múltiples instalaciones para una red de tres niveles. Sin embargo, solo se consideró minimizar la emisión de CO<sub>2</sub>, varias decisiones estratégicas y tácticas como número y capacidad de centros de fabricación MC (que significa centros de manufactura o de procesos productivos), y de distribución DC (los centros de distribución DC incluyen las redes de comercialización) el flujo de materiales y número de productos almacenados.

En términos de consumo per cápita a nivel mundial de café, según Statista (2023), se beben 2600 millones de tazas de café cada día. Europa, en particular, es la región con el mayor consumo, donde se destaca Finlandia con 12 kg; Noruega, 9,9 kg; EE. UU., 6 kg; Francia, 5,4 kg, y Colombia, 2,8 kg. Estos datos indican que hay una demanda a nivel regional y mundial para suplir.

Sin embargo, en términos de producción y consumo, los canales de venta y los sitios web deben ser más tenidos en cuenta para el diseño de una red que asuma la asignación de cada cliente final a uno de los centros de distribución. Y la situación podría ser más resiliente y eficaz desde la teoría de la credibilidad, el circuito cerrado inverso y el modelo de inventarios de colas para que haya mayor practicidad. Por tanto, estos parámetros de optimización multiobjetivo asociado a la ubicación, producción, inventario y distribución de café molido y en grano, convencional, especial y orgá-

nico no han sido unificados a través de desarrollos tecnológicos, machine learning e IA. Actualmente, el reporte de investigaciones para asegurar una CSC sostenible es difuso, pero fundamental para el progreso y avance regional, como también para los conocimientos gerenciales.

Los trabajos aportados desde organismos institucionales de índole privado o público, se enfocan en analizar estas situaciones complejas, pero el acceso a esta literatura es restringido. Por ejemplo, Wang et al. (2022) plantearon un modelo de pronóstico integrado para la CSC en grano, que solo consideró la optimización precisa de los precios de los granos de café que ayudó a los fabricantes a controlar un mercado impredecible y mejorar la cooperación y desarrollo sostenible. Los autores propusieron un método de pronóstico no lineal gris de Bernoulli para hacer frente a la volatilidad de la demanda “más rápido y mejor” y la incertidumbre en los volúmenes y precios de prohibición de café, pero no se incluyen soluciones ecoeficientes.

Además, Jiménez (2018) plantea un enfoque de sistema dinámico para el modelo del mercado de café en Colombia, pero el estudio no se centra en el *supply chain*. En tanto que Arias et al. (2017) afirman que, en un ejercicio de vigilancia tecnológica, este análisis para la planificación no ha sido completamente abordado, incluso para los departamentos de Antioquia y Tolima. También destacan la importancia de que estas problemáticas sean tratadas desde la Universidad de Caldas y los grupos de investigación, en cuanto a aspectos productivos como: variedades de café, ecotipos, sistemas de beneficio húmedo, secado, intensidad, brillo solar, régimen climático, características del suelo en función de la productividad y áreas reales cultivadas, el estado actual del trabajo en soca y la incidencia de fotoperiodos en las características del café. Sumado a factores del entorno como lo son humedad relativa, control de plagas y edades de plantas; la rentabilidad del producto y su mercado actual, desde la estrategia de inventario-transporte-localización.

Por otro lado, según el World Economic Forum, en 2022, se logró migrar el 60 % del PIB mundial a registros digitales, lo que posibilita la sistematización y centralización de datos. En ese contexto, Tecnósfera (2021) informa que Colombia ocupó el puesto 59 en el escalafón mundial de competitividad digital del International Institute for Management Development (IMD) en el 2021; en el apartado de Conocimiento el puesto fue de 56; 60 en Tecnología, y 53 en Enfoque hacia el Futuro, en el que Estados Unidos ocupó el primer lugar. Este camino de innovación en la era digital afecta la toma de decisiones estratégicas en la CSC permeada por los cambios derivados de la transformación digital y en función de la adopción de tecnologías como *big data*, *blockchain* y *machine learning* que impacten la productividad y competitividad de la CSC (Deina *et al.*, 2022).

Habría que decir también que el Índice de Competitividad Regional Cafetero en promedio es bajo en la mayoría de los departamentos productores de café en Colombia, como lo afirma la FNC (2008). Sumado a esto, Colombia produce el 10% del café mundial y existen problemas de logística, según los Conpes 3963 (2019), 4015 (2020) y 3982 (2020), como también aspectos por mejorar como lo es el ingreso y bienestar socioeconómico de 546 382 familias cafeteras en 23 departamentos y 604 municipios. Estos desafíos, traducidos en el relevo generacional en el campo, no aseguran la mano de obra permanente y se añan a la baja productividad nacional actual que está en 19,4 sacos/ha, siendo poco competitivos frente a otros países productores de la región, según Statista (2023).

Estas áreas influyen en las brechas que persisten en el sector dado que:

- » Sin incorporar *big data* el análisis de grandes volúmenes de datos para detectar patrones ocultos y extraer información relevante se hace complicado; en el contexto de la CSC implica procesar datos sobre variación de precios, producción, distribución, calidad y consumo del café, como lo afirman Bjorvatn et al. (2015).
- » La falta de una optimización de la CSC: según Candelo et al. (2018) afecta directamente los análisis de datos y por ende no se identifican a completitud ineficiencias y áreas de mejora en la CSC, como la gestión de inventario y la logística.
- » La baja incorporación de la tecnología *blockchain* afecta la aplicabilidad en la transparencia, seguridad, trazabilidad, verificación, rastreo, la eliminación de intermediarios innecesarios, la disminución de la ineficiencia y reducción de costos, como también la procedencia y la calidad del café (Flachs, 2022; Sunmola et al., 2021).
- » La escasa introducción del *machine learning* en la CSC, teniendo en cuenta que su uso permitiría a las máquinas aprender sin ser programadas explícitamente; por ejemplo, existe la necesidad de la CSC de tener capacidad de modelar matemáticamente la variación de precios en la oferta y demanda, en ese sentido, es escasa la información de modelos de predicción de precios de CSC basado en datos históricos y factores económicos, sociales y ambientales.

A su vez, entre autores como Deina et al. (2022); Ligar et al. (2024) y Lima Jr. et al. (2015), se argumenta que no se conoce cuál ha sido el grado de incorporación de desarrollo

tecnológico en la CSC y la industria 5.0, el impulso de la bioeconomía, la cobertura en la prestación del servicio de extensionismo agropecuario y los sistemas de trazabilidad (conocimiento de cuántos productores hacen trazabilidad, cuáles son esas variedades trazables y como afectan la calidad del café). En el modelo de tostado del café, según FNC (2021a), no se identifican del todo los procesos de optimización e innovación para un mejoramiento continuo que conlleve a una excelente calidad desde esa gran variedad de matices, sin dejar de lado la suavidad y consistencia que caracterizan, por ejemplo, el café colombiano (Statista, 2023).

Según la empresa Huawei (2023), falta más propensión hacia la generación de redes digitales basadas en la intención en la CSC, mayor diversificación del mercado IoT empresarial, mejoramiento del transporte de manera segura y eficiente, con mayor acceso a redes privadas e inalámbricas que aceleren los servicios integrados y que migren la empresa a inteligente, la videovigilancia satelital y tratamiento posincidencia. Si bien la evidencia de información se presenta de manera desarticulada, poco organizada a nivel del gobierno central y con cierto grado de confusión, son insuficientes los estudios de contrastación sobre investigaciones relacionadas con la eficiencia de la CSC que incorporen indicadores de sostenibilidad social, ambiental y tecnológica, aunque hay algunos adelantos científicos como aquellos desarrollados por Torabzadeh et al. (2022), Wang (2021) y Carvalho et al. (2014, 2016 y 2018) (2016). Entidades públicas y privadas analizan estas situaciones complejas desde la resiliencia, pero se desconoce el alcance real que hayan tenido en el mediano plazo.

Por tales razones, la CSC enfrenta varios desafíos y problemáticas que afectan tanto a los productores como a los consumidores. Entre algunos de los más relevantes están:

- a) **La variabilidad climática:** es uno de los mayores desafíos para la producción de café. El aumento de las temperaturas y los patrones climáticos impredecibles afectan la calidad y cantidad de la producción. En ese sentido, las plagas y enfermedades y su incremento en la cotidianidad; como la roya que ha incrementado bajo este tipo de condiciones.
- a) **Precios volátiles:** la fluctuación de los precios internacionales del café puede ser crítica para los pequeños agricultores, dada la baja capacidad de enfrentar las pérdidas a raíz de la volatilidad de precios. La pandemia afectó producción, logística y transporte, lo que generó escasez y aumento de costos.
- a) **Condiciones laborales:** las condiciones laborales en la industria del café pueden ser precarias. Muchos trabajadores reciben salarios bajos y trabajan en condiciones difíciles. Mejorar estas condiciones para la sostenibilidad social es todo un reto y desafío.

- a) **Sostenibilidad ambiental:** la producción de café puede tener un impacto significativo en el ambiente, a través de la deforestación, el uso excesivo de pesticidas y fertilizantes, y la contaminación del agua que son problemas comunes; estos efectos se mitigan a través de prácticas sostenibles.
- a) **Escasez de mano de obra:** se debe trabajar por asegurar el relevo generacional.
- a) **Innovación y tecnología:** en la ruralidad se presentan carencias en relación con la infraestructura y el acceso a artefactos e internet.
- a) **Seguridad y logística:** en algunas regiones, la seguridad y la infraestructura deficiente pueden afectar la producción y el transporte del café. La inestabilidad política y la falta de infraestructura adecuada son desafíos críticos.
- a) **Certificaciones y comercio justo:** son costosas y complicadas para los pequeños caficultores.

## CONCLUSIONES

El impacto de la variabilidad climática afecta significativamente la producción de café, alterando la calidad y cantidad del producto. Las plagas y enfermedades, como la roya, se han incrementado bajo estas condiciones. Sumado a ello, la fluctuación de los precios internacionales del café es crítica para los pequeños agricultores, quienes tienen baja capacidad para enfrentar pérdidas. La pandemia de COVID-19 exacerbó estos problemas, afectando la producción, logística y transporte.

En relación con las condiciones laborales en la industria del café, son a menudo precarias, con muchos trabajadores recibiendo salarios bajos y trabajando en condiciones difíciles. Mejorar estas condiciones es esencial para la sostenibilidad social. Además, en relación con la sostenibilidad ambiental, la producción de café tiene un impacto significativo en el ambiente, incluyendo la deforestación, el uso excesivo de pesticidas y fertilizantes, y la contaminación del agua. Es crucial adoptar prácticas sostenibles para mitigar estos efectos.

Es necesario analizar más a fondo en investigaciones futuras, la problemática de escasez de mano de obra, que permita asegurar el relevo generacional, lo cual es un desafío importante para mantener la mano de obra en el campo.

En relación con la innovación y tecnología, la falta de infraestructura y acceso a tecnología en áreas rurales limita la capacidad de los agricultores para mejorar sus prácticas y aumentar la productividad. No obstante, la seguridad e infraestructura es aún deficiente en algunas regiones y afectan la producción y el transporte del café. La inestabilidad política y la falta de infraestructura adecuada son desafíos críticos, como también las certificaciones y comercio justo, dado que son costosos y algunas veces complicados para los pequeños caficultores, lo que limita su capacidad para beneficiarse de estos programas.

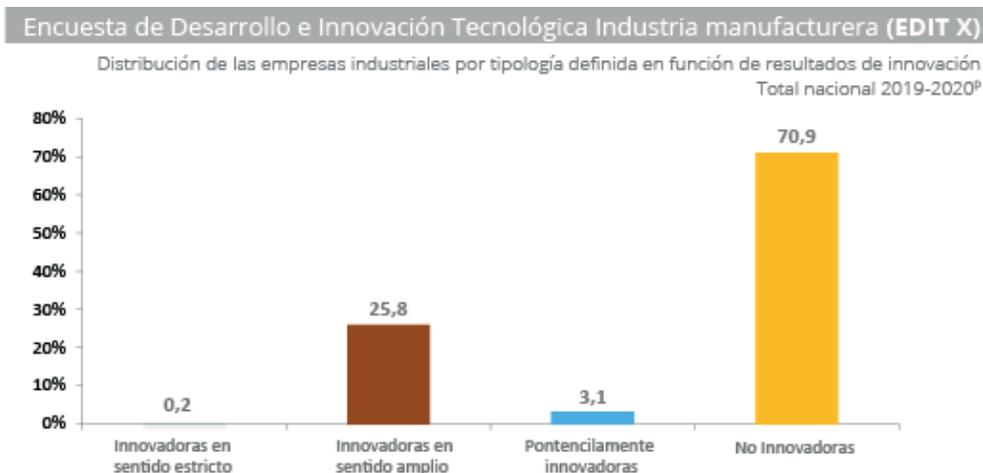
Respecto a la transformación digital, la adopción de tecnologías de vanguardia es fundamental para mejorar la productividad y competitividad de la CSC. Sin embargo, la implementación de estas tecnologías aún es limitada, lo que conlleva a un Índice de Competitividad Regional Cafetero (ICRC) bajo, en la mayoría de los departamentos productores de café en Colombia, lo que refleja desafíos en logística, ingresos y bienestar socioeconómico de las familias cafeteras. Por último, la falta de información y estudios hace que haya una carencia de información general sobre la familia rural cafetera y estudios limitados sobre el impacto de las certificaciones y sellos de comercio justo, en ese sentido, la literatura disponible sobre la sostenibilidad de la CSC es restringida y se encuentra desarticulada.



## DESAFÍOS DE COMPETITIVIDAD DIGITAL

El Ranking de Competitividad Digital 2021 (WDC, por sus siglas en inglés) tiene tres factores para determinar la competitividad digital de un país: conocimiento para descubrir, entender y construir nuevas tecnologías; la tecnología en sí; ¿cómo está el contexto de cada economía en materia tecnológica? y ¿qué tanto permite el desarrollo de tecnologías digitales?, y el enfoque hacia el futuro de cada nación que se refleja en el avance educativo o nivel de preparación para sacar provecho de la transformación digital. Para ilustrar mejor, por ejemplo, las fortalezas de Colombia, según el International Institute for Management Development (IMD), se fundamentan en la productividad de su investigación y desarrollo, la inversión en telecomunicaciones (dado que Colombia se ubicó tercero a nivel mundial en este rubro) y en alianzas público-privadas. No obstante, las debilidades en las que debe concentrar sus esfuerzos, en efecto, se relacionan con la conectividad y la calidad de la red de banda ancha, número de usuarios, el desarrollo de patentes de alta tecnología, la cantidad de usuarios de celulares inteligentes y el fortalecimiento de los contratos.

**Figura 1.** Distribución de empresas por tipología definida en función de resultados de innovación, total nacional 2019-2020

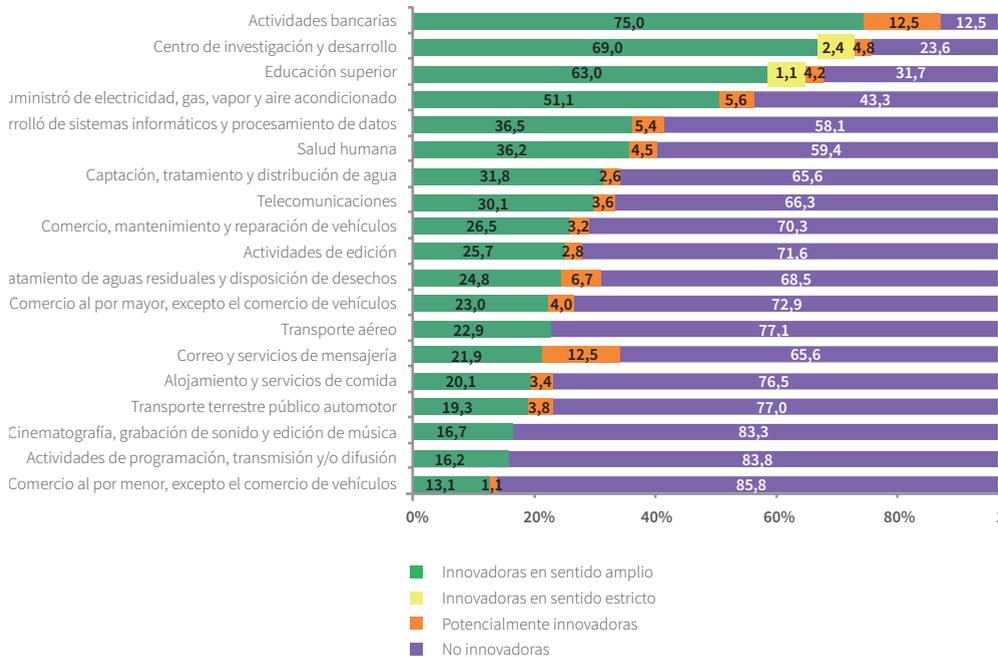


**Fuente:** DANE (2021).

De acuerdo con la figura 1, la encuesta de desarrollo e innovación tecnológica para la industria manufacturera auspiciada por el DANE (2021) y realizada durante 2019-2020 (periodo que incluye el inicio de la pandemia por Covid-19) se puede constatar que el 70,9% de las empresas se consideran no innovadoras, el 25,8% clasifican como empresas innovadoras en sentido amplio, el 3,1%, potencialmente innovadoras y tan solo el 0,2% se piensan innovadoras en sentido estricto.



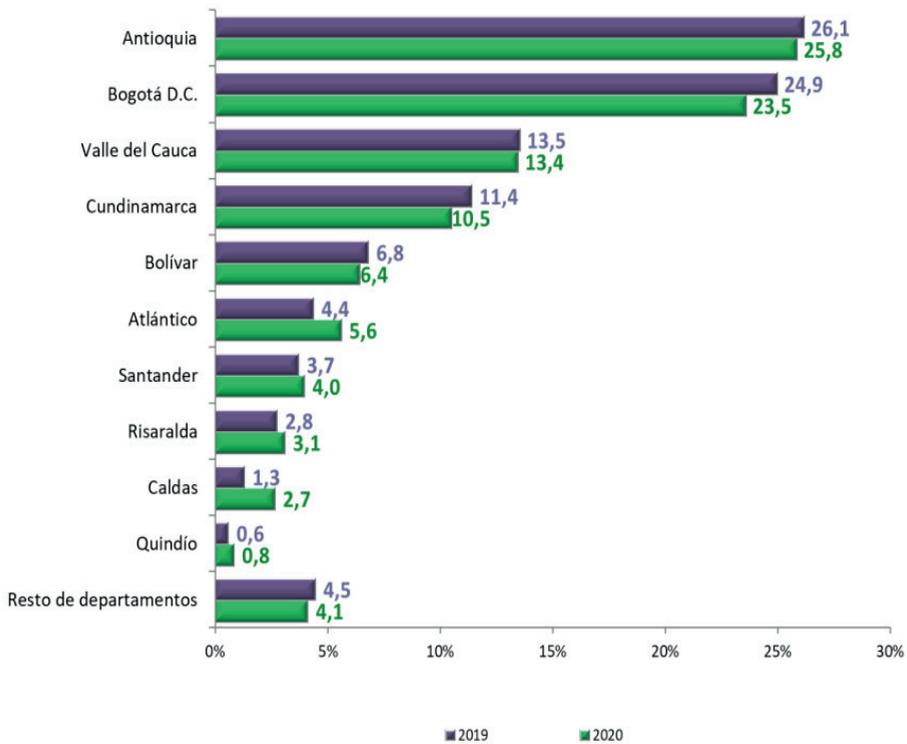
**Figura 2.** Distribución porcentual de las empresas por tipología definida en función de resultados de innovación, según actividad económica, total nacional 2020-2021



**Fuente:** DANE (2021).

Precisamente, en la figura 2 se refleja una preocupación porque hay una gran cantidad de áreas que en mayor proporción son consideradas o definidas como no innovadoras, entre estas el transporte aéreo con el 77,1%, comercio al por mayor 72,9%, comercio al por menor 85,8%, como también las actividades de actividades de programación, transmisión y difusión con 83,8%, que refleja probablemente que el camino hacia la innovación aún está pendiente por transitarse en diversos sectores.

**Figura 3.** Personal relacionado con actividades científicas, tecnológicas y de innovación (ACTI) por principales departamentos, total nacional 2019-2020

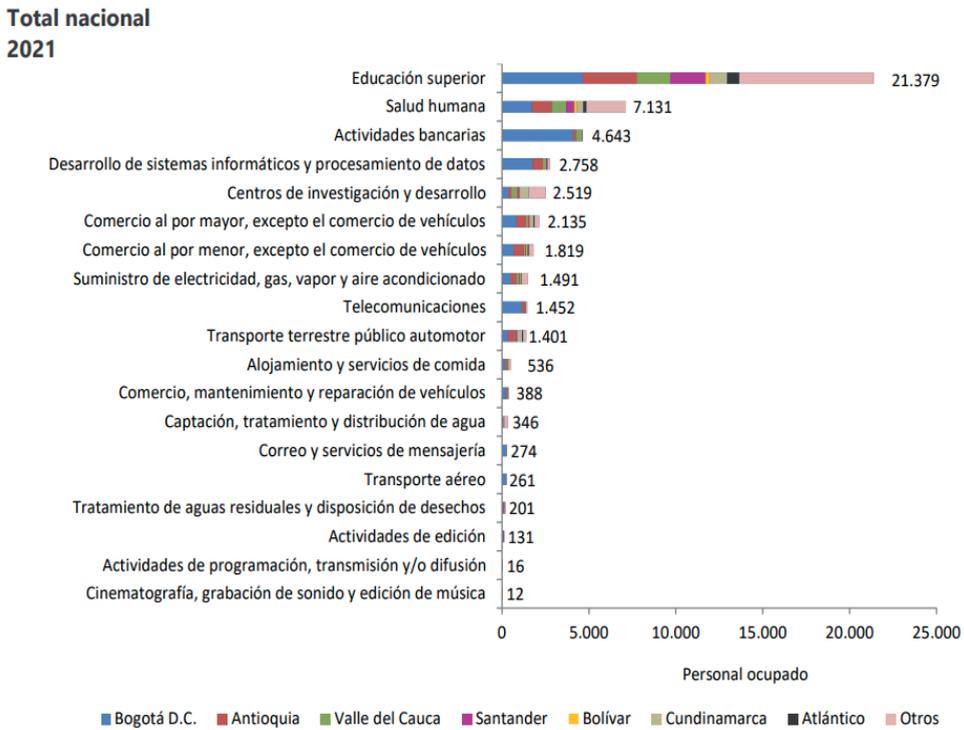


**Fuente:** DANE (2020).

Con el propósito de evidenciar el escaso capital humano que trabaja en Colombia para dar respuestas innovadoras desde la ciencia a situaciones complejas en el microterritorio, la figura 3, en particular, refleja que el personal relacionado con actividades científicas, tecnológicas y de innovación (ACTI), considerando los principales departamentos de las métricas del DANE (2020), sobresale el departamento de Antioquia con el mayor número de personas trabajando en actividades científicas, tecnológicas y de innovación que para el 2019 fue de 26,1 % y para el 2020, 25,8 %. El departamento del Tolima aparece con una cifra que suma al resto de departamentos, que se traduce en un desafío si desea superar las problemáticas estructurales para que luego se genere progreso y desarrollo regional.



**Figura 4.** Personal relacionado con actividades científicas, tecnológicas y de innovación (ACTI) por principales departamentos



**Fuente:** DANE (2021).

De manera semejante, la figura 4 presenta el personal relacionado con actividades científicas, tecnológicas y de innovación (ACTI) por principales departamentos (DANE, 2021), donde Bogotá D.C., Antioquia, Valle del Cauca y Santander son los que más están aprovechando las capacidades humanas ante los desafíos actuales; sin embargo, las actividades de programación, transmisión y/o difusión, el transporte aéreo, las telecomunicaciones y el comercio al por mayor y por menor tienen un número bajo de personal ocupado; seguramente para el aumento de índices de innovación se debe invertir en educar y formar para los cambios en el marco de la transformación digital.

Dentro de este contexto, junto con otras variables de decisión, parámetros y restricciones a analizar que se conocen quizá de forma empírica, al estar la disponibilidad de las métricas reducidas, se deduce que estas caracterizaciones no se encuentran integradas, ni han sido estructuradas bajo desarrollos tecnológicos, *machine learning* e IA. En definitiva, no se sabe con exactitud, por ejemplo, el índice de productividad

regional y mecanismos cosecha-poscosecha; dado que los sistemas dinámicos de la cadena de café no han tenido en el foco estos aspectos tecnológicos que repercuten en la toma subóptima de decisiones estratégicas y se traducen en menor beneficio económico-social al afectar el desarrollo, progreso, bienestar y un mejor futuro para las nuevas generaciones de ciudadanos en la ruralidad.

## CONCLUSIONES

**Factores de competitividad digital:** el Ranking de Competitividad Digital 2021 del WDC se basa en tres factores: conocimiento para desarrollar nuevas tecnologías, el contexto tecnológico de cada economía y el enfoque hacia el futuro reflejado en el avance educativo y preparación para la transformación digital.

**Fortalezas de Colombia:** Colombia destaca en la productividad de su investigación y desarrollo, la inversión en telecomunicaciones y las alianzas público-privadas. Sin embargo, debe mejorar en conectividad, calidad de la red de banda ancha, desarrollo de patentes, número de usuarios de celulares inteligentes y fortalecimiento de contratos.

**Innovación empresarial:** según la encuesta del DANE (2021), el 70,9% de las empresas en Colombia no son innovadoras, el 25,8% son innovadoras en sentido amplio, el 3,1% potencialmente innovadoras y solo el 0,2% innovadoras en sentido estricto. Esto indica una necesidad urgente de fomentar la innovación en el sector empresarial.

**Distribución de innovación por sector:** sectores como el transporte aéreo, comercio al por mayor y menor, y actividades de programación y difusión tienen una alta proporción de empresas no innovadoras, lo que refleja un camino pendiente hacia la innovación en estos sectores.

**Capital humano en innovación:** Antioquia, Bogotá D.C., Valle del Cauca y Santander son los departamentos con mayor personal dedicado a actividades científicas, tecnológicas y de innovación. Sin embargo, hay una necesidad de aumentar la inversión en educación y formación para enfrentar los desafíos de la transformación digital.

**Integración de tecnologías avanzadas:** la falta de integración de desarrollos tecnológicos *machine learning* e inteligencia artificial en la CSC afecta la toma de decisiones estratégicas y reduce los beneficios económicos y sociales.

**Desafíos en la productividad regional:** la falta de datos precisos sobre la productividad regional y los mecanismos de cosecha-postcosecha limita la capacidad de mejorar la eficiencia y sostenibilidad de la CSC.

**Necesidad de transformación digital:** la transformación digital es crucial para mejorar la competitividad y sostenibilidad de la CSC.

Por consiguiente, Colombia enfrenta varios desafíos en términos de competitividad digital, incluyendo la necesidad de mejorar la conectividad, disponibilidad y cobertura, fomentar la innovación empresarial y aumentar la inversión en educación y formación. La integración de tecnologías avanzadas sirve para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de la CSC y otros sectores económicos.

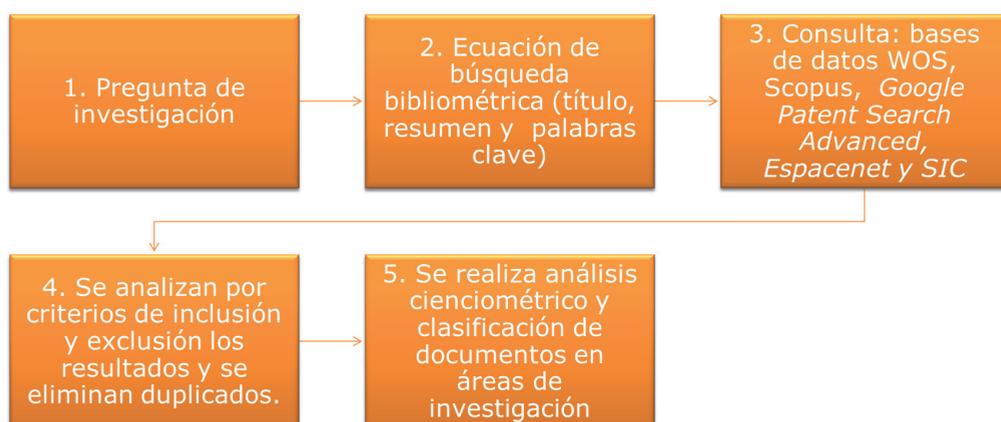


# CAPÍTULO 4

## ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO EN RELACIÓN CON LAS TENDENCIAS Y CARACTERÍSTICAS PROMISORIAS PARA UNA CADENA DEL CAFÉ SOSTENIBLE, ÁGIL Y VIABLE

El análisis bibliométrico se llevó a cabo de manera exhaustiva fundamentado en el método PRISMA (2020), que se presenta a continuación en la figura 5.

**Figura 5.** Método Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses - PRISMA (2020).



Las palabras clave fueron las siguientes: modelos matemáticos, cadena de suministro de café, sostenibilidad, agilidad, resiliencia, escenarios de sostenibilidad y sustentabilidad. La tabla de términos se visualiza a continuación en la Tabla 1, y la cadena o ecuación de búsqueda fue la siguiente: (“supply chain\*” OR “generalized supply chain” OR “flexible supply chain” OR “supply chain network design” OR “optimize superstructure”) AND (coffee OR “coffee chain simulation” OR “coffee supply chain” OR “coffee producers” OR “coffee value chain”).

**Tabla 1.** Términos o componentes

Componente 1	Componente 2	Componente 3	Componente 4	Componente 5
Modelado	Cadena suministro en general	Variables económicas, sociales, ambientales, tecnológicas	Escenarios de sostenibilidad y sustentabilidad	Optimización
Modelos matemáticos	Cadena de suministro de café	Bioeconomía circular	Planeación	Modelos de optimización
Modelamiento	Metodología	Variables financieras, socioeconómicas, comunitarias	Planificación	MILP
Descripción matemática	Redes de valor	Gobernanza,	Mujeres rurales	MINLP
Representación	Cadenas de valor	Factores económicos	Asociatividad	Sostenibilidad
		Parámetros	Ruralidad	Agilidad
		Indicadores	Decisiones estratégicas	Transformación digital
			Decisiones operativas	Industria 5.0
			Decisiones tácticas	Resiliencia
			Ecodesarrollo	Robustez
			Género y poder	
			Desigualdad e Inequidad	

**Fuente:** elaboración propia.

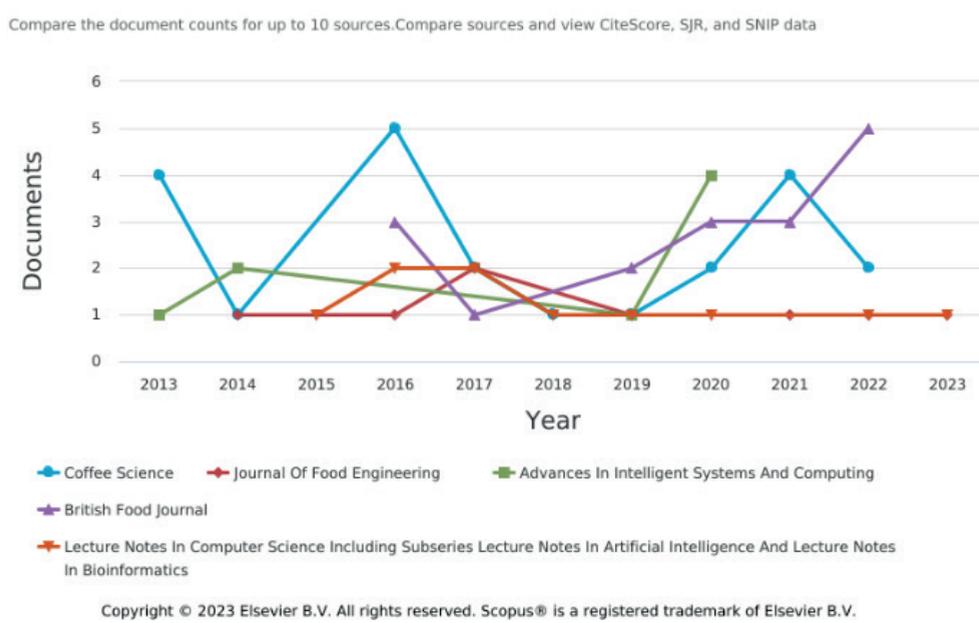
El análisis global y los criterios de inclusión/exclusión se trabajaron acorde con la Universidad Católica de Pereira (s/f), en la revisión sistemática de técnicas no convencionales para la evaluación de la calidad del agua de ríos contaminados con plaguicidas, estos criterios fueron: fueron título, resumen y palabras clave. La selección de tipos de trabajo solo correspondió a artículos científicos a través de Scopus y Web of Science (WoS). Los documentos publicados en Scopus se producen en Estados Unidos (130),



seguidos de Brasil (103), Reino Unido (64), Francia (63), Colombia (61), Indonesia (47), Alemania (42), Italia (41), India (36), Australia (31), Costa Rica (31), México (31), España (29), China (27) y Vietnam (25). Esta productividad es patrocinada o financiada principalmente por la Universidade Federal de Lavras con 34 documentos, seguidos del Centro de Cooperación Internacional en Investigación Agronómica para el Desarrollo (Cirad), con 31; Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (Catie), con 26; Université de Montpellier, con 22; Universidade Federal de Viçosa, con 21; Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), con 12; Wageningen University & Research, con 11; Universidade de São Paulo, con 11; el IRD Centre de Montpellier, con 11, y el Centre INRAE Occitanie-Montpellier, con 11.

De acuerdo con la figura 6 es necesario realizar mayor inversión científica en los países productores de café, a partir del fomento de la ciencia, tecnología e innovación, ello demuestra un bajo número de contribuciones investigativas a diversas problemáticas que afectan la cadena de valor.

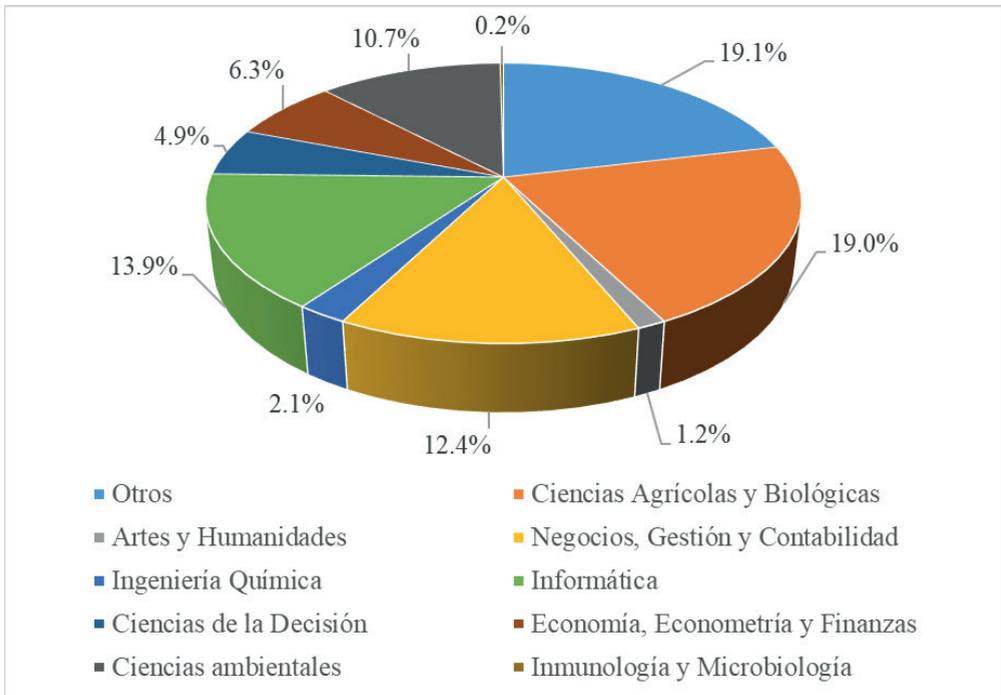
**Figura 6.** Documentos por año y por fuente, relacionados con la gestión de la CSC



Fuente: Elsevier - Scopus (2023).

La fuente de los documentos que se detallan en la figura 6 principalmente proviene de las revistas *Coffee Science* (22) *British Food Journal* (17), *Lecture Notes in Computer Science including subseries lectures notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics* (10), *Advances in Intelligent systems and computing* (8) y, por último, *Journal Of Food Engineering* (8). Seguidamente, se detallan los documentos generados por área temática en la figura 7, y se deduce, a partir de estos, que se deben aumentar los esfuerzos de la ciencia, en el desarrollo de generación de productos de nuevo conocimiento a partir de publicaciones científicas que logren aumentar el impacto desde el área de ingeniería con 10,7% a la cadena de café, para una mayor comunicación y visibilidad.

**Figura 7.** Documentos por área temática, relacionados con la gestión de la CSC



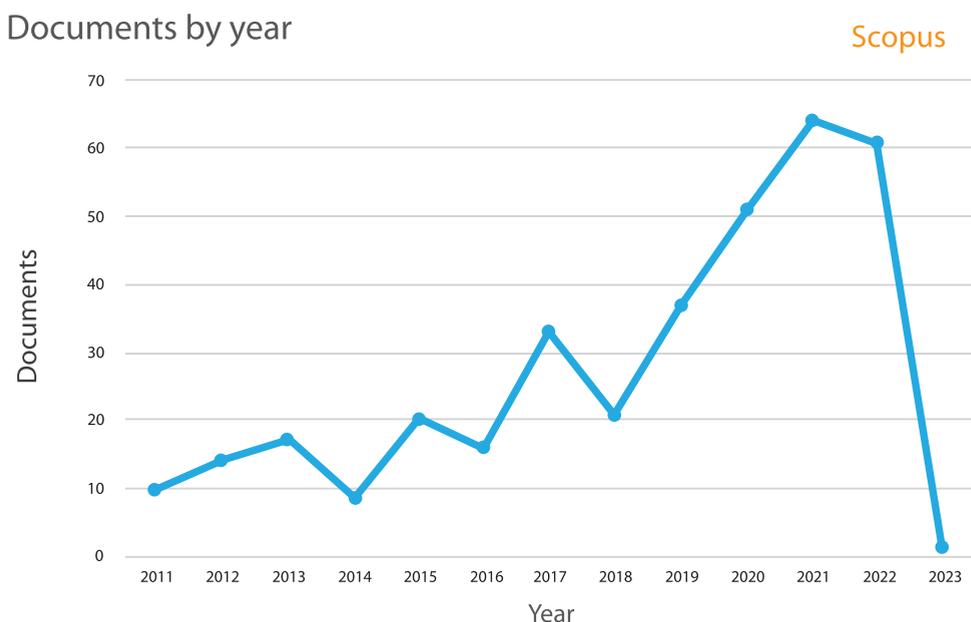
Fuente: Elsevier - Scopus (2023).

Además del análisis de documentos por área temática, donde sobresalen aquellos relacionados con los documentos publicados sobre las Ciencias Agrícolas y Biológicas (250), Artes y Humanidades (16), Negocios, Gestión y Contabilidad (163), Ingeniería Química (28), Informática (183), Ciencias de la Decisión (64), Economía, Econometría y Finanzas (83), Ciencias ambientales (135) Inmunología y Microbiología (2), Ciencia de los Materiales (28), Matemáticas (69), Multidisciplinar (28), Neurociencia (7), Psicología

(4), Ingeniería (141), Ciencias Sociales (116), se deduce que estas dos últimas áreas temáticas tienen un alto potencial de ser mucho más aprovechadas, igualmente el registro de documentos analizados data del 2013 (con 51 documentos) y conlleva a un incremento substancial de más de 40 documentos producidos entre 2021-2022; ahora bien, la secuencia de productividad por año es el siguiente 2023 (45), 2022 (138), 2021 (98), 2020 (105), 2019 (82), 2018 (69), 2017 (67), 2016 (59), 2015 (43), 2014 (32) y 2013 (51), respectivamente.

De otro lado, es interesante analizar el incremento de la productividad investigativa por diversos autores a nivel mundial entre los años 2013 y 2023, relacionados con la CSC, como se observa en la figura 8. No obstante, esta cifra debería ser mayor. Para ser más específicos, acorde con Scopus, se debe promover el desarrollo de proyectos de CTI en la CSC desde las instituciones de educación superior (IES); por ejemplo, actualmente son liderados a nivel mundial por la Universidade Federal de Lavras, seguidos de Cirad y Catie, la Université de Montpellier, Universidade Federal de Viçosa y el CNRS. En Suramérica Brasil siendo un referente importante por sus contribuciones y patrocinios.

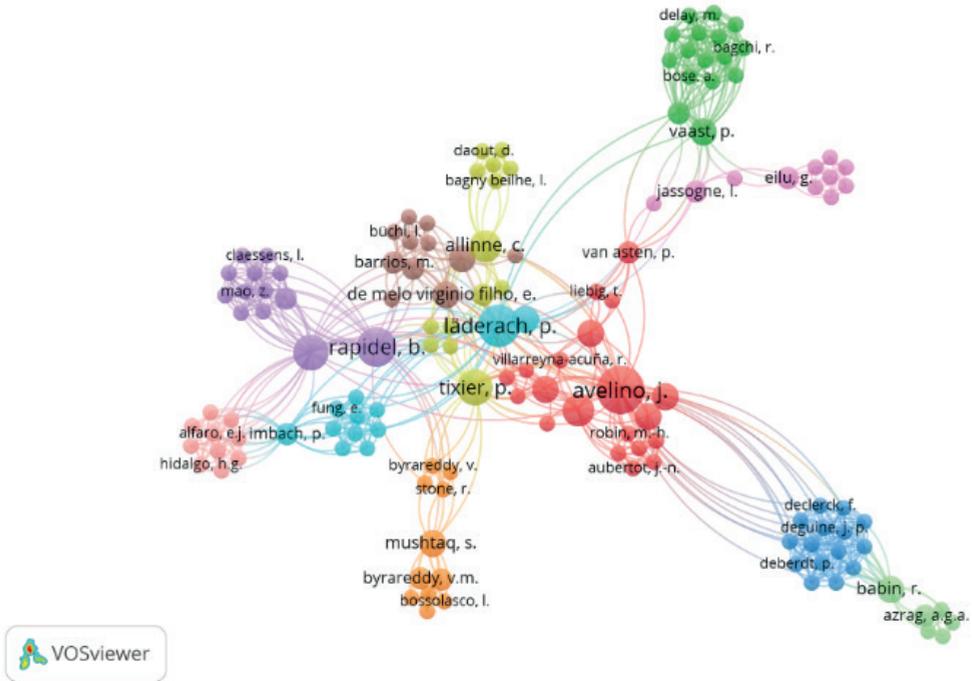
**Figura 8.** Documentos por año, relacionados con la gestión de la CSC



Fuente: Elsevier - Scopus (2023).

En cuanto a la categoría de tipos de documentos hallados, los artículos científicos son los más representativos con 550 documentos; de conferencia, con 131, como también los capítulos de libro, con 48.

**Figura 9.** Diagrama de visualización de la red de autores de documentos científicos sobre CSC



**Fuente:** VOS-viewer by Scopus (2023).

De acuerdo con las figuras 8 y 9, se establece que existe una interacción reticular entre los autores científicos más representativos en la CSC a nivel mundial, donde sobresale el trabajo adelantado por Avelino, Rapidel, Tixier, Laderach (han realizado contribuciones significativas a la CSC, cada uno desde diferentes perspectivas y enfoques; Avelino ha trabajado en la mejora de la calidad de vida de los caficultores; Rapidel ha investigado sobre la sostenibilidad y la eficiencia en la producción de café; Tixier ha contribuido al entendimiento de la dinámica de las plagas y enfermedades en los cultivos de café y Laderach se ha enfocado en el impacto del cambio climático en la producción de café y en el desarrollo de estrategias de adaptación), entre otros. Se puede, entonces, deducir que los autores encontrados son aún escasos,

como también las investigaciones y desarrollo orientadas al diseño de metodologías ágiles con enfoque triple bottom line y operación de prototipos computacionales, desarrollos tecnológicos, machine learning e IA y plataformas tecnológicas que permitan el mejoramiento de la toma de decisiones estratégicas frente a la resiliencia, la agilidad y viabilidad desde la teoría general de viabilidad, al considerar escenarios de sostenibilidad.

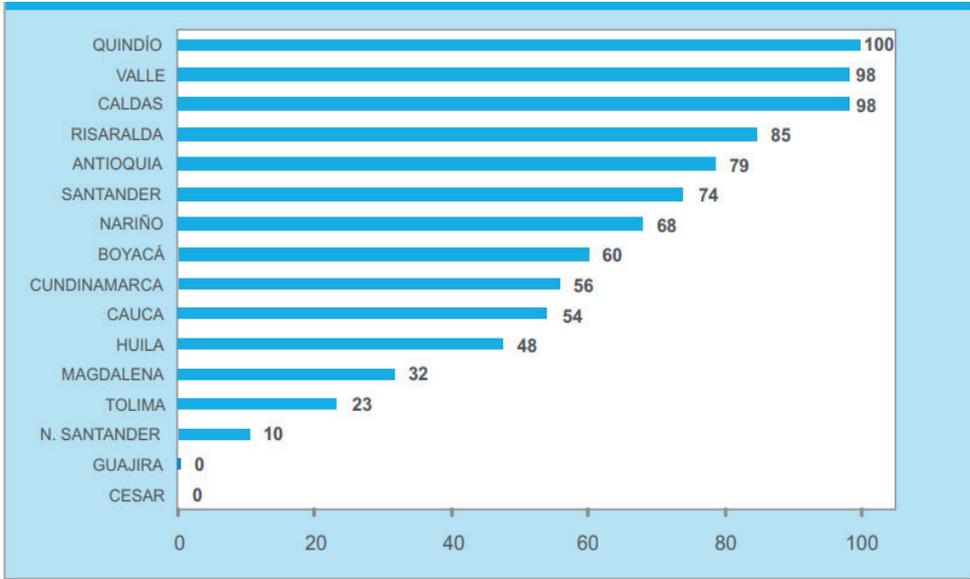
Entre las tendencias y características más prometedoras para la CSC se encuentran los “certificaciones sostenibles” dado que la demanda de café certificado, como el de comercio justo, Rainforest Alliance y UTZ, está en aumento. Estas certificaciones aseguran prácticas agrícolas sostenibles y condiciones laborales justas, lo que atrae a consumidores conscientes.

Otra característica promisorias es la transparencia y tecnología dado que la adopción de tecnologías como blockchain está revolucionando la CSC. Estas tecnologías permiten una mayor transparencia y trazabilidad, asegurando que los consumidores puedan conocer el origen y las prácticas de producción de su café. También la economía circular que permite integrar estos principios, como el reciclaje y la reutilización de subproductos del café, como también la conciencia por el uso racional de agua y del suelo. Esto no solo reduce el desperdicio, sino que también puede generar nuevas fuentes de ingresos para los productores, como por ejemplo también la captura de carbono.

De acuerdo con el análisis bibliométrico, se presenta también una tendencia hacia la diversificación de productos, y en ese sentido, los productores están diversificando sus ofertas más allá del café tradicional, incluyendo productos como el café especial, orgánico y de origen. Esto ayuda a satisfacer la demanda de nichos de mercado y a aumentar los ingresos per cápita y asociativos. Bajo esa misma línea de trabajo, el apoyo a los productores es muy importante, dado que reconfigura las iniciativas para mejorar las condiciones de vida y de trabajo de los productores de café; esto incluye programas de capacitación, investigación e innovación, acceso a financiamiento y mejores precios por los productos generados.

Ahora bien, la información a nivel de Colombia orientada a la competitividad del café también es escasa, en efecto, según la FNC (2008), el ICRC en Colombia data del estudio de factores de competitividad y el desarrollo de indicadores que se miden desde la década de 1990; en la figura 10 se observa el ICRC por departamento, se evidencia que el Quindío tiene un puntaje 100/100, Antioquia cuenta con 79/100 y Tolima tiene 23/100, ello muestra que se debe trabajar por el incremento de este índice en las regiones donde este valor es menor.

**Figura 10.** Índice de Competitividad Regional Cafetero por departamento en Colombia



**Fuente:** FNC (2008).

De acuerdo con los pilares que miden el ICRC, según FNC (2008), se evidencia el valor porcentual por pilar, en ese sentido se observa que en algunos pilares el valor es de cero, por tanto, los esfuerzos se deben concentrar en incrementar estos números (ver figura 11).

Figura 11. Composición del índice de competitividad regional de la caficultura

**Cuadro 2. Composición del índice de competitividad regional de la caficultura - ICRC**

	RECURSOS NATURALES	INFRAESTRUCTURA / LOCALIZACIÓN	MERCADO LABORAL	CONDICIONES DE VIDA	TECNOLOGÍA	CALIDAD Y DIFERENCIACIÓN	DESEMPEÑO ECONÓMICO	CONDICIONES DE SEGURIDAD	INSTITUCIONALIDAD CAFETERA	ÍNDICE GLOBAL
QUINDÍO	100	63	0	100	91	29	51	90	80	100
VALLE	62	82	23	84	67	25	95	72	95	98
CALDAS	77	56	29	86	100	37	45	75	100	98
RISARALDA	88	59	5	88	99	25	37	70	86	85
ANTIOQUIA	49	34	30	72	84	28	100	63	83	79
TOLIMA	49	58	39	68	55	0	35	0	47	23
SANTANDER	42	19	34	73	85	68	64	90	44	74
BOYACÁ	51	23	100	62	25	24	51	100	29	60
CUNDINAMARCA	48	34	32	68	64	24	75	93	19	56
N. SANTANDER	35	0	41	52	55	13	19	64	28	10
NARIÑO	48	21	73	70	79	100	27	33	43	68
CAUCA	57	60	63	58	65	53	18	40	33	54
HUILA	52	12	47	69	78	47	41	27	61	48
MAGDALENA	18	100	11	56	0	84	0	77	19	32
GUAJIRA	0	49	67	0	23	38	8	75	14	0
CESAR	9	45	39	28	21	27	28	75	0	0

	RECURSOS NATURALES	INFRAESTRUCTURA Y LOCALIZACIÓN	MERCADO LABORAL	CONDICIONES DE VIDA	TECNOLOGÍA	CALIDAD Y DIFERENCIACIÓN	DESEMPEÑO ECONÓMICO	CONDICIONES DE SEGURIDAD	INSTITUCIONALIDAD CAFETERA	ÍNDICE GLOBAL
QUINDÍO	100	63	0	100	91	29	51	90	80	100
VALLE	62	82	23	84	67	25	95	72	95	98
CALDAS	77	56	29	86	100	37	45	75	100	98
RISARALDA	88	59	5	88	99	25	37	70	86	85
ANTIOQUIA	49	34	30	72	84	28	100	63	83	79
TOLIMA	49	58	39	68	55	0	35	0	47	23

SANTANDER	42	19	34	73	85	68	64	90	44	74
BOYACÁ	51	23	100	62	25	24	51	100	29	60
CUNDINAMARCA	48	34	32	68	64	24	75	93	19	56
N. SANTANDER	35	0	41	52	55	13	19	64	28	10
NARIÑO	48	21	73	70	79	100	27	33	43	68
CAUCA	57	60	63	58	65	53	18	40	33	54
HUILA	52	12	47	69	78	47	41	27	61	48
MAGDALENA	18	100	11	56	0	84	0	77	19	32
GUAJIRA	0	49	67	0	23	38	8	75	14	0
CESAR	9	45	39	28	21	27	28	75	0	0

**Fuente:** FNC (2008).

La figura 11 de la FNC (2008) presenta la información relacionada con estos índices de competitividad por departamento, sin embargo, la información actual es restringida, se espera en la ejecutoria de esta investigación poder tener acceso a esta información a partir de alianzas estratégicas con la FNC, el sector gubernamental y productivo, para revisar el estado actual de este ICRC que se desconoce.

Para resumir, el Índice de Competitividad Regional Cafetero (ICRC) se compone de varias dimensiones y factores que permiten evaluar y comparar la competitividad de las regiones productoras de café. A continuación, se presenta una composición típica basada en los componentes generales de los índices de competitividad regional, entre las dimensiones principales se encuentran:

#### 1. Productividad

- Rendimiento agrícola: medición de la producción de café por hectárea.
- Tecnología y prácticas agrícolas: nivel de adopción de tecnologías y prácticas agrícolas modernas.
- Capacitación y educación: acceso a programas de capacitación y educación para los agricultores.

#### 2. Calidad de vida

- Ingresos de los agricultores: nivel de ingresos y estabilidad económica de los productores de café.

- Condiciones laborales: calidad de las condiciones de trabajo y bienestar de los trabajadores.
- Acceso a servicios básicos: disponibilidad de servicios como salud, educación y vivienda en las comunidades cafetaleras.

### 3. Sustentabilidad

- Prácticas sostenibles: implementación de prácticas agrícolas que minimicen el impacto ambiental.
- Gestión de recursos naturales: uso eficiente y sostenible de recursos como agua y suelo.
- Adaptación a la variabilidad climática: medidas tomadas para mitigar y adaptarse a los efectos adversos.

De acuerdo con el análisis bibliométrico a continuación se presenta la Tabla 2 de resumen de artículos científicos relacionados con la Inteligencia artificial e industria 5.0 en la CSC.

**Tabla 2.** Resumen de artículos sobre Inteligencia Artificial e industria 5.0 en la CSC

Industria 5.0	Inteligencia Artificial y ciencia de datos			Herramienta tecnológica		Consideraciones sobre la CSC	Estudio de casos	Autores
	BC	BD	ML	Presenta una solución	Usaron algoritmos			
Transparencia, rastreo y trazabilidad	x				✓	Sistema descentralizado - RCSC (Real Coffee Supply Chain).	India	(Rai et al., 2024)

Rendimiento y calidad del producto	x		x		✓	Aseguramiento de la calidad de la producción de granos de café: red Ethereum Virtual Machine BC basada en Ethereum. El algoritmo del modelo ML se basa en una red neuronal convolucional (CNN) que utiliza YOLOv5m, YOLOv6m y YOLOv7.	Indonesia	(Ligar et al., 2024)
Eficiencia, transparencia, adaptabilidad y escalabilidad	x				✓	Concepto de interacción de contrato inteligente que facilita la automatización y gestión de interacciones con alta eficiencia.	Indonesia	(Saputra et al., 2024)
Garantía de calidad		x		✓		Características relevantes de la cadena de valor y bienestar de caficultores	Uganda	(Arslan et al., 2024)
Cadenas de valor digitalizadas		x		✓		La pandemia de COVID-19 revela barreras en infraestructura, los ciclos de pobreza, las políticas esporádicas de desarrollo de la fuerza laboral y las presiones financieras que deben redefinirse para que la producción y el consumo de café sean más sostenibles en el futuro.	Filipinas	(Opoku et al., 2023)



**ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO EN RELACIÓN CON LAS TENDENCIAS Y CARACTERÍSTICAS PROMISORIAS  
PARA UNA CADENA DEL CAFÉ SOSTENIBLE, ÁGIL Y VIABLE**

Impacto social, trazabilidad y justicia económico-social	x			✓		Los hallazgos evidencian reducción de asimetría de información, establecimiento de conexiones más sólidas entre clientes y caficultores, y generación de diversos beneficios económicos y sociales.	Reino Unido	(Chen, 2023)
Gestión del conocimiento sobre sostenibilidad y aprendizaje en SCS		x			✓	Múltiples ciclos de aprendizaje entre la gestión del conocimiento del proveedor y el aprendizaje en supply chain sustainability SCS de los compradores, impulsando así la sostenibilidad	Francia	(Silva et al., 2023)
Trazabilidad, seguridad y calidad del producto	x			✓		Análisis del caso de Lavazza, importante empresa italiana de café tostado que ha introducido en el mercado un producto rastreado mediante blockchain, incluyendo todos los pasos que hicieron posible la aplicación de la tecnología y cómo finalmente se llevó a cabo.	Italia	(Gazzola et al., 2023)



Estructura de red, diferencias de poder y estabilidad de alianzas		x			✓	Utilización de un modelo reflexivo formativo como herramientas analíticas y la posible mediación por diferencias de poder y otros factores que influirían en la estabilidad de alianzas estratégicas.	Indonesia	(Murwani et al., 2023)
Trazabilidad	x			✓		Modelo para transformar un proceso de negocio de CSC en un flujo de trabajo blockchain, se desarrolló una aplicación para permitir que cada actor de la CSC contribuya a la recopilación de datos y monitoree el estado de cada lote de café.	Indonesia	
Sistemas de información digital		x		✓		Método de análisis del Modelo de Ecuaciones Estructurales (SEM). La educación en tecnología digital ha mejorado significativamente la economía de los caficultores.	Indonesia	(Panggabean y Arsyad, 2023)



**ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO EN RELACIÓN CON LAS TENDENCIAS Y CARACTERÍSTICAS PROMISORIAS  
PARA UNA CADENA DEL CAFÉ SOSTENIBLE, ÁGIL Y VIABLE**

Impacto de la escasez de agua		x		✓		El consumo de café se concentra en el "Norte Global", mientras que la producción se ubica principalmente en el "Sur Global". Esta dependencia impulsada por el comercio conduce a la explotación de los recursos naturales.	Dinamarca	(Sporchia et al., 2023)
Resiliencia		x		✓		Modelado híbrido para el diseño resiliente de redes de suministro	Colombia	(Clavijo-Buritica et al., 2022)
Indicador geográfico, distribución justa del valor y la procedencia	x			✓		Marco teórico institucional y de stakeholders para comprender la implementación de un proyecto blockchain integrado en una lógica territorial para una CSC.	India	(Sharma, 2021)

**Fuente:** elaboración propia.

Este tipo de sistematización reveló oportunidades de investigación en estas áreas y se pueden encontrar vacíos que posiblemente no han sido abordados por la literatura técnica suficientemente, según las bases de datos consultadas.

## **FACTORES Y VARIABLES DEL ICRC**

Dentro de estas dimensiones, se agruparon varios factores y variables que se miden para obtener una visión integral de la competitividad. Por ejemplo:

- Innovación y tecnología: número de fincas que utilizan tecnologías avanzadas.
- Infraestructura: calidad de las carreteras, acceso a mercados y facilidades de transporte.



- Certificaciones: proporción de productores con certificaciones de comercio justo y sostenibilidad.
- Diversificación económica: grado de diversificación de ingresos en las comunidades cafetaleras.

Ejemplo de composición:

- Productividad: 40 %
  - Rendimiento agrícola: 20 %
  - Tecnología y prácticas agrícolas: 10 %
  - Capacitación y educación: 10 %
- Calidad de vida: 30 %
  - Ingresos de los agricultores: 15 %
  - Condiciones laborales: 10 %
  - Acceso a servicios básicos: 5 %
- Sustentabilidad: 30 %
  - Prácticas sostenibles: 15 %
  - Gestión de recursos naturales: 10 %
  - Adaptación a la variabilidad climática: 5 %

El ICRC, por tanto, permite identificar las fortalezas y debilidades de cada región dentro de la geografía colombiana y aunque se desconocen las cifras actuales o posteriores al año 2008, en su momento facilitó la toma de decisiones informadas y la implementación de políticas para mejorar la competitividad de la caficultura colombiana.

## CONCLUSIONES

Del capítulo 4 sobre el análisis bibliométrico en relación con las tendencias y características promisorias para una cadena del café sostenible, ágil y viable, se presentan las siguientes conclusiones:

**Método PRISMA:** el análisis bibliométrico se realizó utilizando el método PRISMA (2020), con palabras clave relacionadas con modelos matemáticos, cadena de suministro de café, sostenibilidad, agilidad y resiliencia.

**Productividad científica:** la mayoría de los documentos sobre la gestión de la CSC se producen en Estados Unidos, Brasil y Reino Unido. Colombia también tiene una presencia significativa, pero se necesita mayor inversión científica en los países productores de café.

**Fuentes y áreas temáticas:** las principales fuentes de documentos incluyen revistas como Coffee Science y British Food Journal. Las áreas temáticas más representadas son Ciencias Agrícolas y Biológicas, Negocios, Gestión y Contabilidad, e Informática.

**Colaboración internacional:** existe una red de colaboración entre autores científicos a nivel mundial, destacando el trabajo de instituciones como la Universidade Federal de Lavras y CIRAD. Sin embargo, se necesita más investigación orientada al diseño de metodologías ágiles y el uso de tecnologías avanzadas.

A continuación, se presentan las tendencias y características promisorias:

Certificaciones sostenibles, transparencia y tecnología, economía circular, diversificación de productos, apoyo a los productores, incremento de la competitividad regional en Colombia, dado que el Índice de Competitividad Regional Cafetero (ICRC) muestra variaciones significativas entre departamentos, con Quindío liderando. Es necesario trabajar en incrementar este índice en regiones con valores más bajos.

En relación con la productividad y sustentabilidad, la medición de la producción de café por hectárea, adopción de tecnologías y programas de capacitación. Frente a la calidad de Vida destaca el nivel de ingresos, condiciones laborales y acceso a servicios básicos en las comunidades cafetaleras, también la implementación de prácticas agrícolas sostenibles, gestión eficiente de recursos naturales y adaptación a la variabilidad climática. El análisis bibliométrico destaca la necesidad de mayor inversión en ciencia, tecnología, investigación y desarrollo en la CSC, la adopción de tecnologías de vanguardia y el apoyo a los productores para mejorar la sostenibilidad, agilidad y viabilidad de la industria.



## ANÁLISIS CIENCIOMÉTRICO SOBRE PATENTES DESARROLLADAS EN LA CADENA CAFETERA

Para el análisis de patentes se incluyeron los inventores de estas, los solicitantes, las prioridades, la Clasificación Internacional de Patentes (CIP), la Clasificación Cooperativa de Patentes (CPC), el espacio donde está publicada la patente, la fecha de la primera publicación y el número de la familia según su clasificación. Luego, se clasificó la información obtenida en las bases de datos BD de Google Patent Search Advanced, así “patente emitida”, número de clasificación tipo “B”. En la BD de la SIC, igualmente, se analizó el estado de patentes bajo el término “concesión”. En relación con las tendencias se realizó a través de clasificación internacional, ajustado a los sectores técnicos que más se consultaron en el marco de los criterios de la búsqueda efectuada. En cuanto al país de origen se tuvo en cuenta “el titular o solicitante”, lugar de procedencia y a través de internet se logró la ubicación de esta.

En la BD de la SIC se realizó la consulta desde la gaceta de propiedad industrial, donde se encuentran publicadas las solicitudes relacionadas con patentes

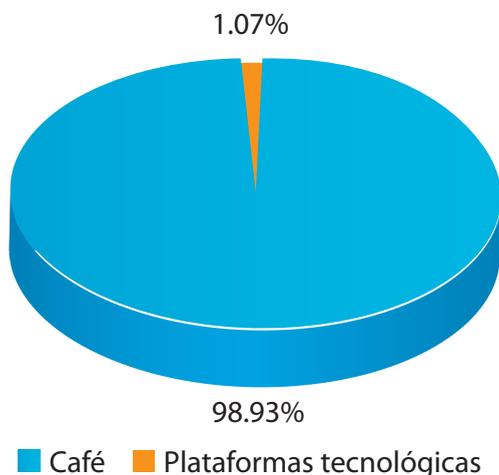
de café, *supply chain* y prototipos computacionales relacionados, al soportar el análisis a nivel individual y organizacional en relación con la concesión. Se tomaron las primeras seis patentes de la familia Latipat, luego se identificaron los países donde están registradas y fecha de publicación, teniendo en cuenta la nomenclatura de las oficinas de patentes en el mundo acorde con los códigos en Espacenet y Google Patent Search Advanced: US (Estados Unidos de América), KR (República de Corea), CN (China), DE (Alemania), BR (Brasil), CO (Colombia), FR (Francia), ES (España), IS (Israel), JP (Japan), RU (Rusia), CH (Suiza) e IT (Italia).

Al realizar la extracción de cada patente a partir del resumen y las especificidades mencionadas previamente, se procederá a organizar y procesar los datos en MS Excel. Esto permitirá la construcción de tablas dinámicas, las cuales facilitarán el análisis estadístico. Además, se generarán diagramas de frecuencia y gráficos, tales como barras y diagramas circulares, que facilitarán la interpretación de los resultados y la toma de decisiones basadas en las consideraciones estadísticas obtenidas.

Posteriormente, se examinaron las patentes desarrolladas a nivel mundial corelacionadas con las cadenas de suministro basadas en prototipos computacionales, identificando a autores representativos como Kamran (2017), Harrington (2019), García (2015), Da Costa (2008), Chin (2017a), Aleksandrovich (2016), Bryant (2019), Chin (2017b), Etter (2020) y Float (2009); al identificar entre ellas la cadena de valor del café, según Min (2013), Halonen (2016), Gussmann (2007), Spring (2014), Deasy (2012), Anliker (2008), Baumgart (2006) y Fain (2019), a través de un ejercicio de trazabilidad, según Castro (2009), Cho (2014) y Bielefeldt (2014), se pudo comparar el estado de las patentes de Colombia, frente el nivel internacional, afines con estas temáticas desarrolladas también por Gupta (2019), Ephraim (2011), Benzatti (2017), Hong (2014) y Berti (2017).

La figura 12 expone la distribución total de solicitudes de patentes en Colombia, según la SIC, para lo cual se estipula que el 98,93 % tienen relación con el café y solo el 1,07 % con plataformas tecnológicas y prototipos computacionales.

**Figura 12.** Distribución del total de solicitudes de patentes encontradas en la BD de la SIC, relacionadas con el café, plataformas tecnológicas y prototipos computacionales

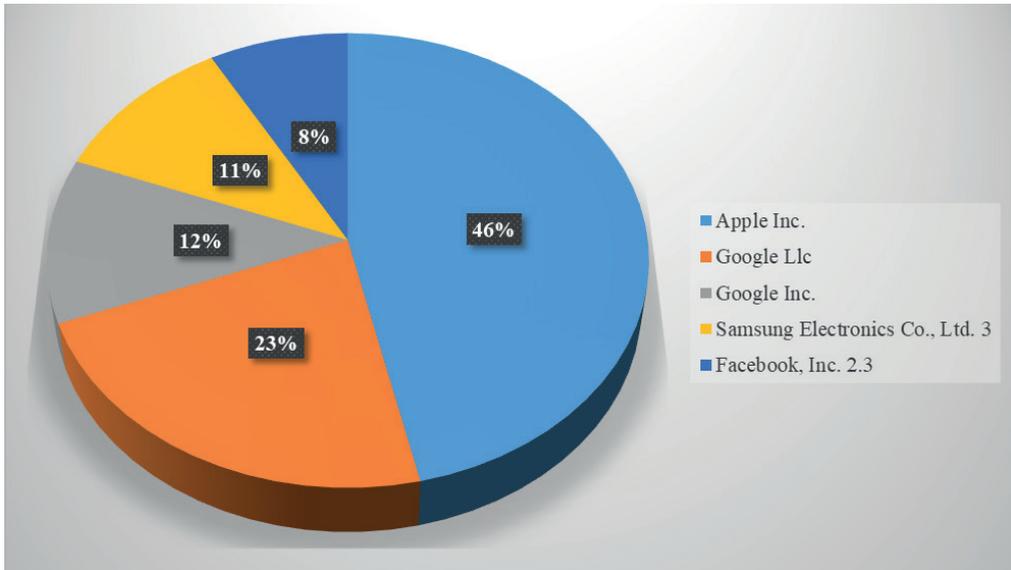


**Fuente:** Google Patent Search Advanced (2023).

En la figura 13, se observan los principales solicitantes de patentes relacionadas con el café, según *Google Patent Search Advanced*, en lo cual sobresale Apple Inc (46 %), Google LLC (23%), Google Inc (12 %), Samsung electronics 11 % y Facebook, Inc. (8 %), aunque estas empresas son de base tecnológica, han desarrollado artefactos para café; por ejemplo, Apple desarrolló una cafetera denominada TopBrewer. De otro lado, Google Inc. desarrolló la patente denominada *Compositions and Methods for Reducing Caffeine Content in Coffee Beans*: esta patente se centra en métodos para reducir el contenido de cafeína en los granos de café mediante el uso de técnicas de biotecnología. También la patente *Coffee Extraction Process and Coffee Product*: que describe un proceso de extracción de café y una composición de café instantáneo que incluye una fracción de sedimento insoluble.

Samsung Electronics desarrolló la patente Coffee Maker: es una patente para el diseño de cafetera que incluye varias vistas y detalles del diseño ornamental. También el Coffee-Making Apparatus, que es otra patente de Samsung que describe un aparato para hacer café que incluye un contenedor de agua separado del contenedor de la bebida, con un sistema de calentamiento de flujo. Las patentes de Facebook sirven indirectamente a la industria cafetera a partir del fomento de redes sociales.

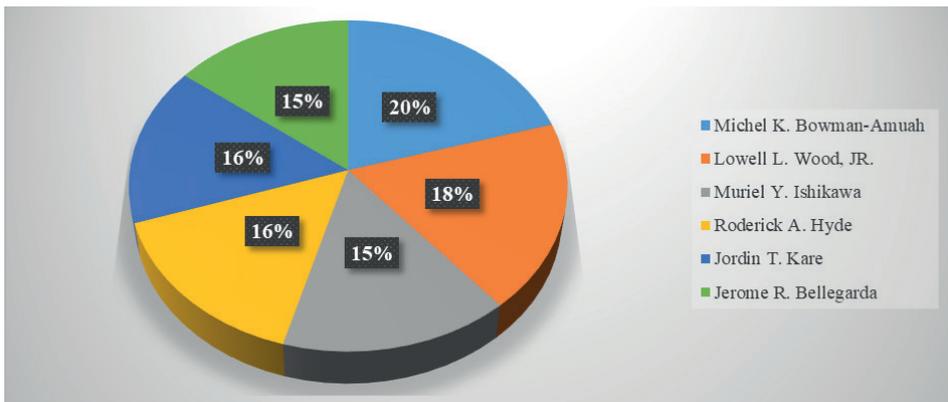
**Figura 13.** Figura 13. Solicitantes (persona jurídica) con patentes de café (2023)



**Fuente:** Google Patent Search Advanced (2023).

En la figura 14 se observan los inventores más representativos según *Google Patent Search Advanced*, estos autores se encuentran en países del primer mundo; sin embargo, se infiere que en los países en vía de desarrollo se debe propender por tener mayores desarrollos en el número de patentes, teniendo en cuenta la visión productiva en torno a la economía cafetera de países en América Latina, África y Asia.

**Figura 14.** Inventores con la búsqueda “café” (2023)

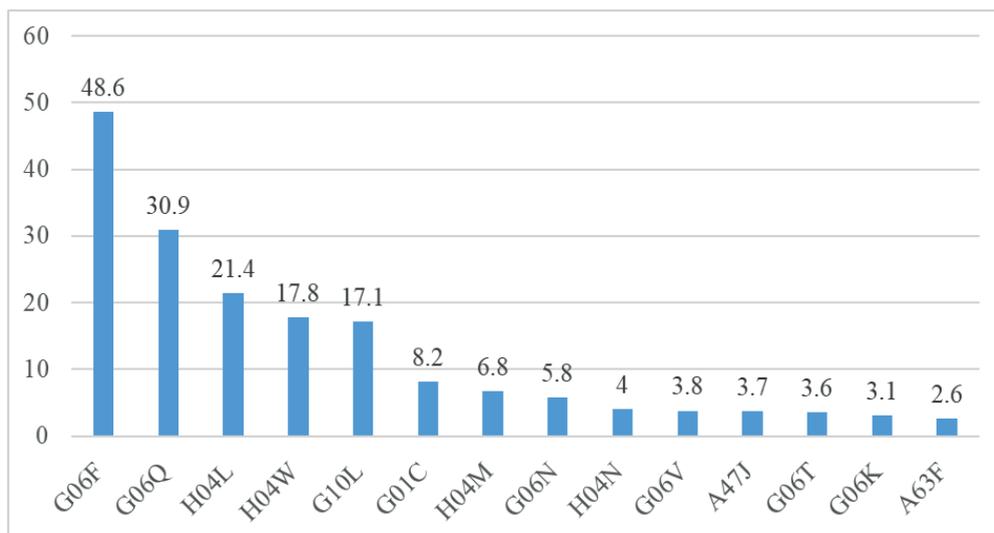


**Fuente:** Google Patent Search Advanced (2023).



A continuación, en la figura 15, se observa la Clasificación Cooperativa de Patentes CPC según *Google Patent Search Advanced*, relacionadas con la palabra “café”. De acuerdo con el diagrama de barras sobresalen los códigos CPC: G06F (48), G06Q (30,9), H04L (21,4) y H04W (17,8), ello permite que los investigadores a futuro tengan un panorama sobre los códigos de patentes que más se están desarrollando actualmente a nivel global.

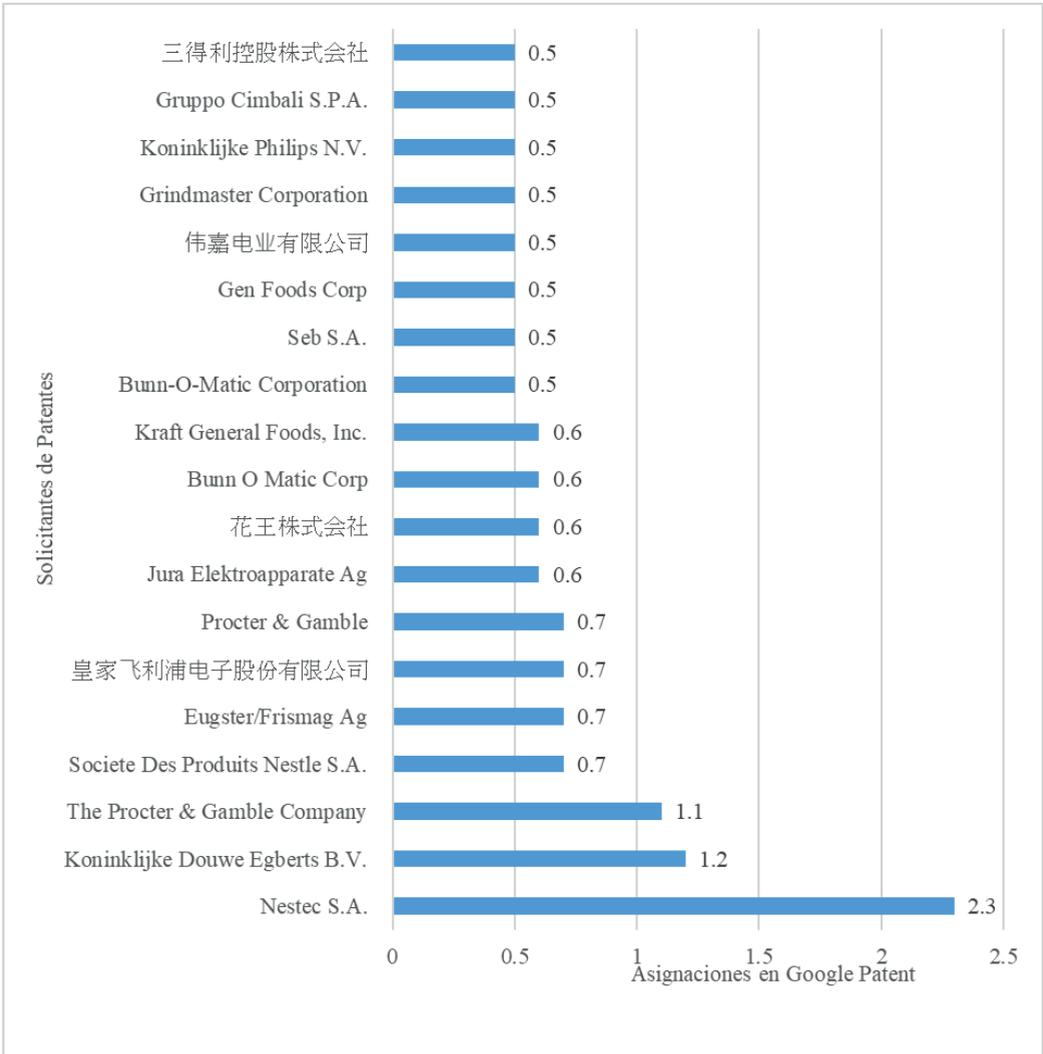
**Figura 15.** CPC según la búsqueda «café»



**Fuente:** Google Patent Search Advanced (2023).

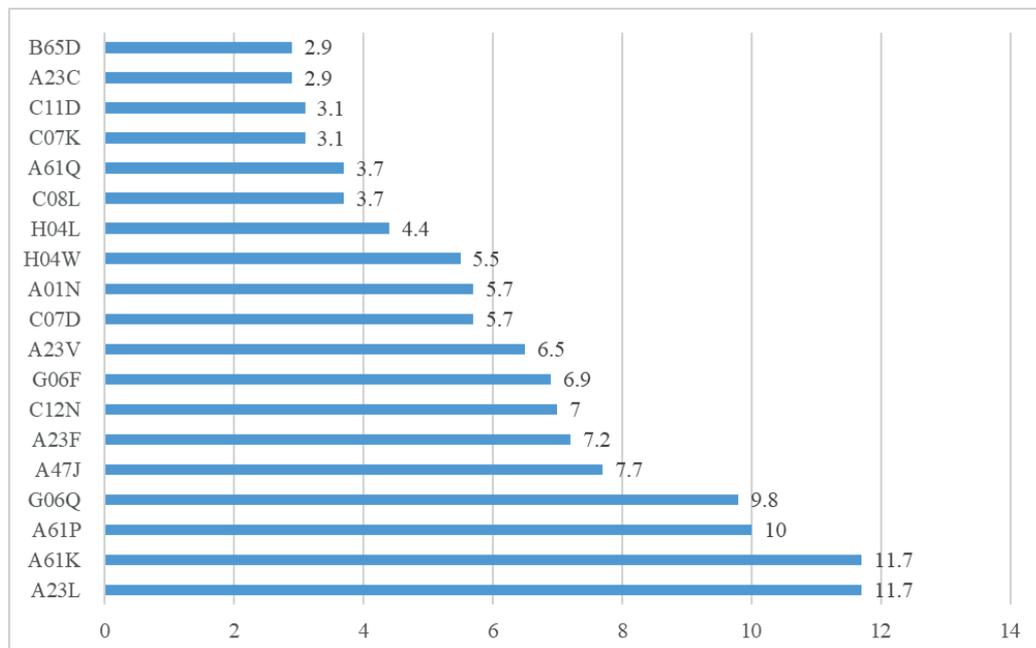
Ahora bien, en la figura 16 se detallan los principales solicitantes de patentes, donde sobresalen las compañías Nestec S. A. (2,3), Koninklijke Douwe Egberts B.V. (1,2) y The Procter & Gamble Company (1,1), respectivamente, demostrando que la industria de los países en vía de desarrollo debe preocuparse más por generar las condiciones necesarias para que los departamentos de investigación, innovación y desarrollo puedan tener patentes para la industria del café. Consideración: la escala numérica de las figuras de los principales solicitantes de patentes en Google Patent Search Advanced se refiere a la clasificación y cuantificación de las solicitudes de patentes presentadas por diferentes entidades detectadas. Esta escala permite identificar y comparar el volumen de patentes solicitadas por diversas empresas, instituciones o individuos en un período específico. Por ejemplo, si una figura muestra que el solicitante “X” tiene un valor de 100 en la escala, significa que ha presentado 100 solicitudes de patentes en el período analizado. Esta información es útil para entender la actividad de innovación y la competitividad en el sector agroindustrial cafetero.

**Figura 16.** Solicitudes de patentes con la búsqueda «coffee»



**Fuente:** Google Patent Search Advanced (2023).

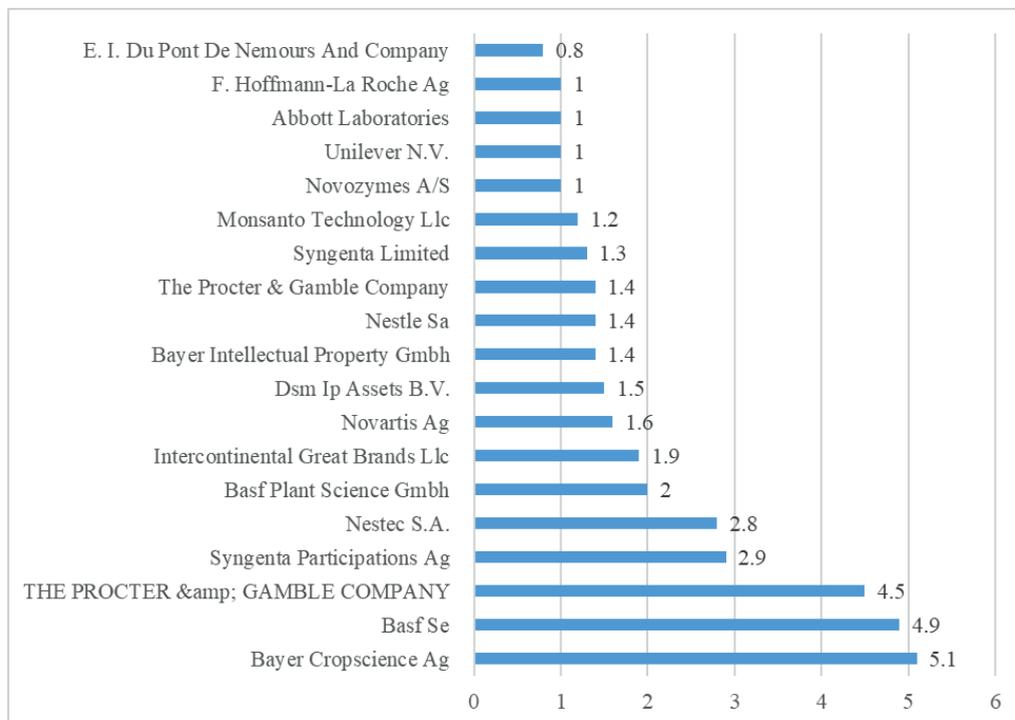
Enseguida, en la figura 17 se pueden observar los códigos de patentes disponibles cuando se realiza la búsqueda con el término «Coffee chain», sobresale los códigos: A23L, A61K, A61P,y G06Q, esto permite que, al momento de establecer el desarrollo de una nueva patente para la cadena del café, se tenga plenamente identificadas cuales son los códigos más representativos.

**Figura 17.** CPC según patentes con el término «coffee chain»

**Fuente:** Google Patent Search Advanced (2023).

En la figura 18 se pueden visualizar las solicitudes de patentes con el término en español “cadena café”. Las multinacionales son las empresas que tienen un mayor número de representatividad en relación con el número de solicitudes presentadas; ello evidencia que las empresas locales y regionales deben trabajar de manera mancomunada para que, a partir de alianzas estratégicas con las grandes empresas, generar sinergias que posibiliten desarrollos tecnológicos de tipo patente, que les permita ser más competitivas en el mediano y largo plazo.

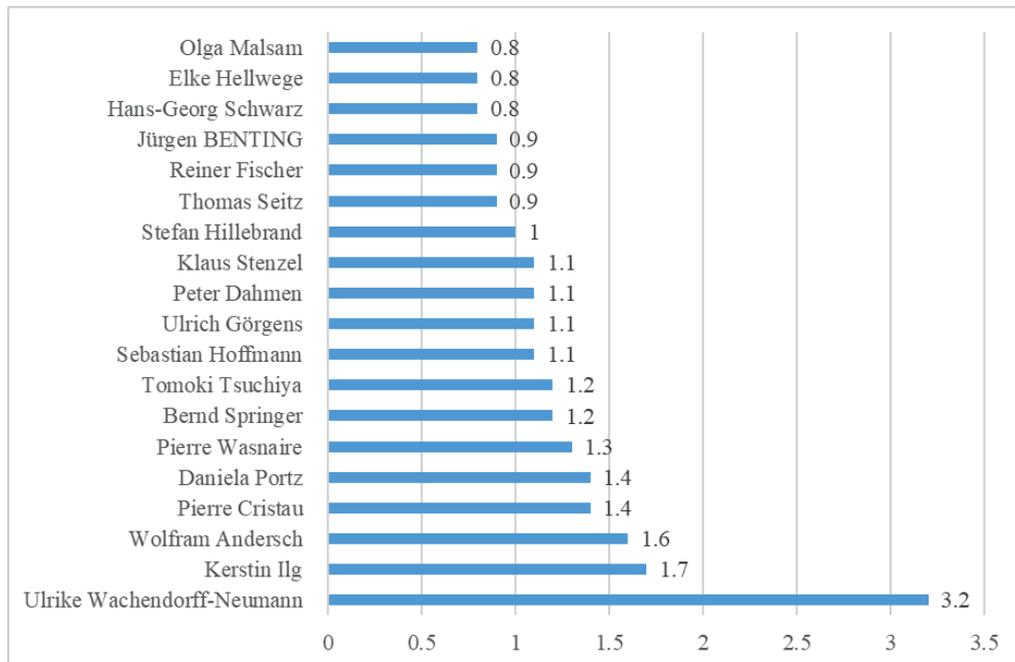
**Figura 18.** Solicitudes de patentes con el término «cadena café»



**Fuente:** Google Patent Search Advanced (2023).

En la figura 19 se presentan los inventores con el término «cadena café». Se observa que el más representativo es Ulrike Wachendorff-Neumann (3,2). No obstante, se visualizan inventores de países del primer mundo. Es importante que en los países en vía de desarrollo se promuevan, fomenten y financien estudios que posibiliten tener un mayor número de inventores que estén presentes en Latinoamérica, Asia y África.

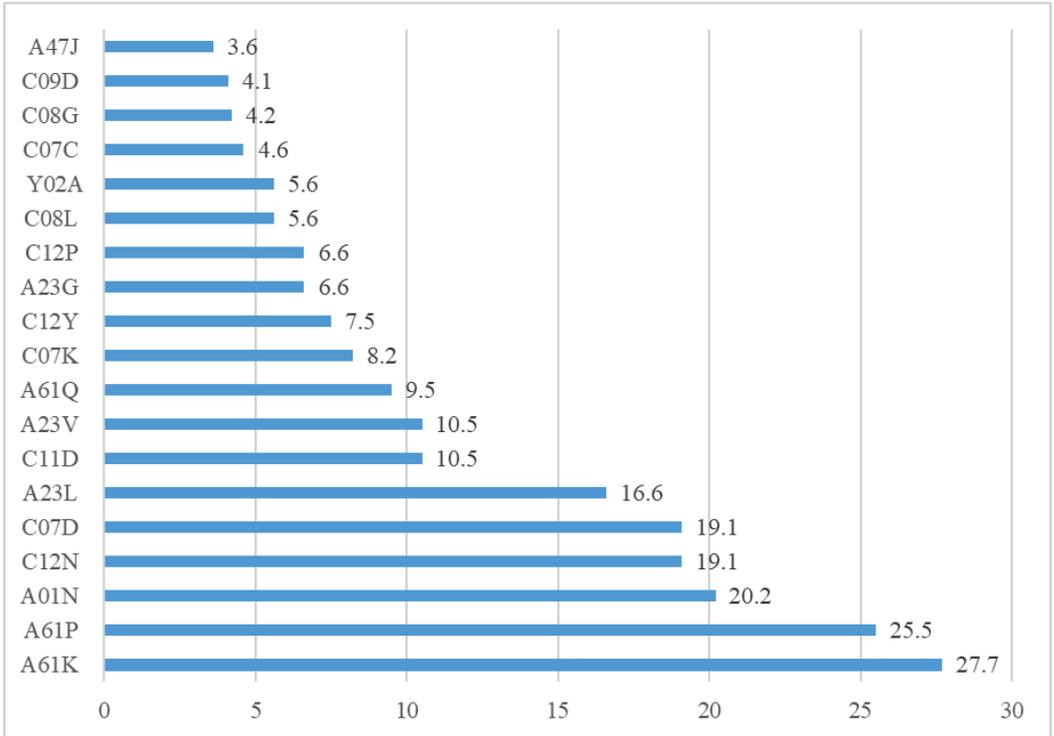


**Figura 19.** Inventores de patentes con el término «cadena café»

**Fuente:** Google Patent Search Advanced (2023).

En la figura 20 se presentan las CPC de patentes, según *Google Patent Search Advanced*, con el término “cadena café”, siendo la más representativa la A61K (27,7). Ello permite tener debidamente identificados los códigos para en el futuro cercano presentar patentes que estén alineadas a este tipo de códigos.

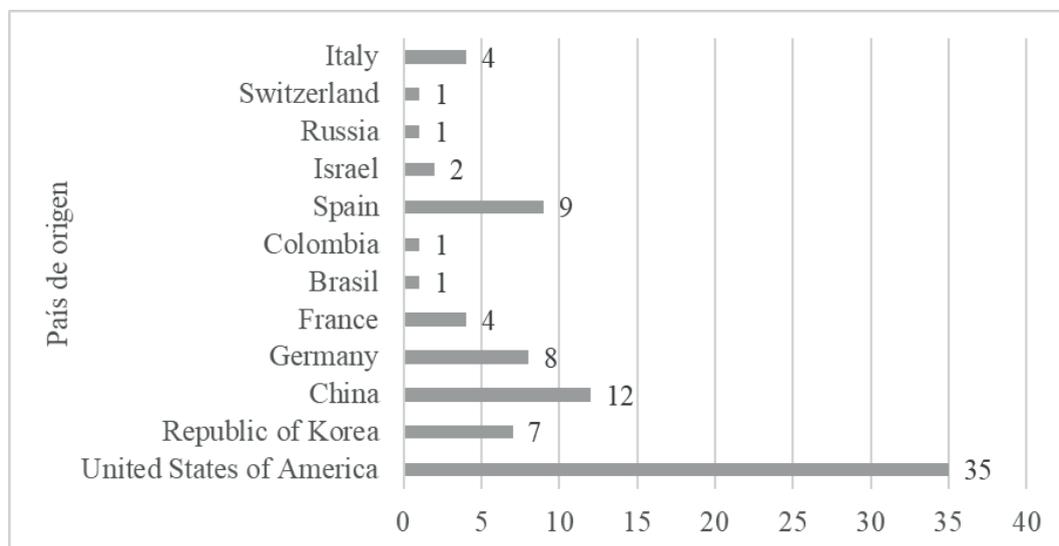
**Figura 20.** CPC según patentes con el término «cadena café»



**Fuente:** Google Patent Search Advanced (2023).

En la figura 21 se especifican los países de origen de las patentes relacionadas con CSC; sobresalen Estados Unidos (65), China (21) y España (18), respectivamente. Los países en vías de desarrollo de continentes como Asia, América o África no figuran en este listado, siendo un campo fértil de investigación para científicos en estas latitudes.



**Figura 21.** Cantidad y países de origen de las patentes relacionadas con CSC

**Fuente:** Google Patent Search Advanced (2023).

De acuerdo con lo anterior, aunque existe un número significativo de contribuciones científicas detectadas en Scopus y WOS sobre CSC, estas se centran en factores económicos y ambientales, pero son escasos los estudios que los integren todos incluyendo los sociales, como el rol de la mujer cafetera y la transformación digital. De otra parte, Estados Unidos, Brasil, Reino Unido, Francia y Colombia lideran la productividad científica obtenida de la cadena de búsqueda para antecedentes, mientras que en la contribución y desarrollo de patentes en CSC lo lideran EE. UU., China y España, respectivamente.

### Patentes sobre CSC soportado en plataformas tecnológicas y prototipos computacionales

Las patentes en plataformas tecnológicas, prototipos computacionales, desarrollos tecnológicos, *machine learning* e IA para la CSC pueden ser de gran importancia para las empresas que operan el sector cafetero, además que son escasas y necesarias, dado que, según la SIC (2023), las patentes son derechos exclusivos otorgados por el Estado a una persona o empresa para fabricar, usar y vender una invención durante un periodo de tiempo determinado. Es por ello por lo que en el ámbito de la *supply chain* las patentes pueden estar relacionadas con tecnologías específicas que mejoran

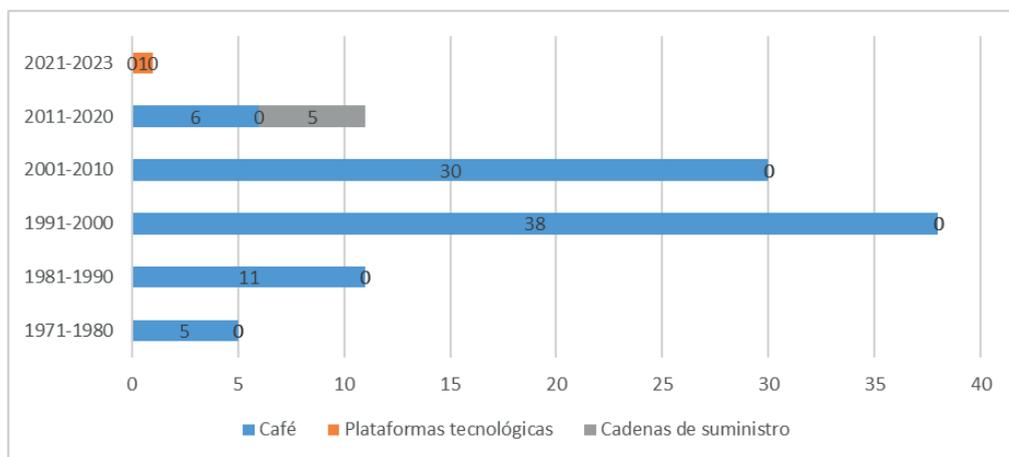
el proceso de gestión de la cadena de suministro de este valioso producto, según Harper (2006), Wu (2016) y Yap (2012).

Algunas de las áreas en las que se pueden encontrar patentes relacionadas con la cadena de suministro de café incluyen los sistemas de seguimiento y rastreo; de acuerdo con Zeine (2019), Yves (2018) y Wohler (2016), estas patentes pueden incluir tecnologías que permiten el seguimiento y rastreo de productos y envíos en tiempo real bajo modelos síncronos e IA acorde con Benzatti (2017), Yi (2010) y Hasan (2017), lo que puede mejorar la visibilidad y la eficiencia de la gestión de *supply chain* del café como lo afirman Float (2009), Bielefeldt (2014), Saito (2007) y Brown (2020).

También se detectaron patentes sobre sistemas de gestión de inventario desarrollados por Kennedy (1996), Gupta (2019) y Young (2006), que pueden incluir tecnologías que mejoran la precisión y la eficiencia bajo modelos de gestión optimizados (incluido el *stock y standby*), según Brown (2020), Simons (2022) y Salman (2019), como sistemas automatizados de reabastecimiento y análisis de datos de inventario en tiempo real. Ahora bien, para los sistemas de automatización de procesos las patentes pueden incluir tecnologías que automatizan procesos específicos de la cadena de suministro, como la recepción, el almacenamiento y la entrega de productos. De manera significativa, se han desarrollado patentes en relación con los sistemas de IA y aprendizaje automático, con patentes que pueden incluir tecnologías que utilizan IA y *machine learning* que mejoran la toma de decisiones y la gestión de la cadena de suministros, de acuerdo con Young (2006) y Yap (2012).

A continuación, en la figura 22 se relacionan los resultados obtenidos en el rastreo realizado en SIC (2023). Se resalta que la única patente registrada sobre plataformas tecnológicas lleva por título: Metodología para realizar terapia de lenguaje utilizando plataforma tecnológica con realidad aumentada, aplicación móvil y web, esta se encuentra en estado “publicada sin pago” y el titular es Matrix Software Ltda.

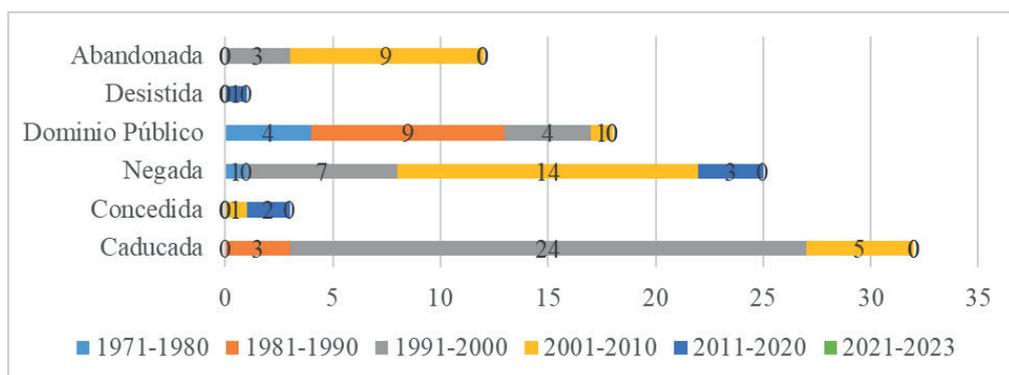
**Figura 22.** Cantidad de solicitudes de patentes acorde con los términos relacionados (CSC, plataformas tecnológicas y prototipos computacionales) en la SIC (2023)



**Fuente:** elaboración propia

En la figura 23 se visualiza el estado actual de las solicitudes de las patentes en la SIC relacionadas con café, cadenas de suministro, plataformas tecnológicas y prototipos computacionales, donde el estado «caducado» es el más representativo.

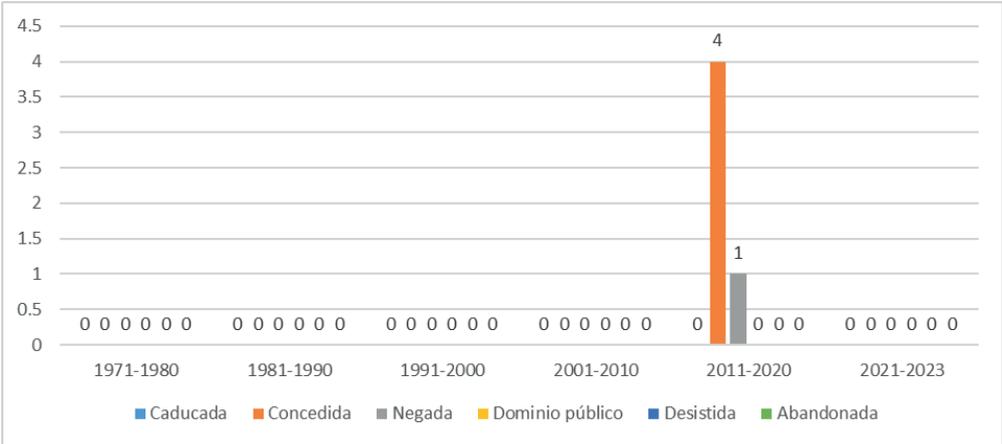
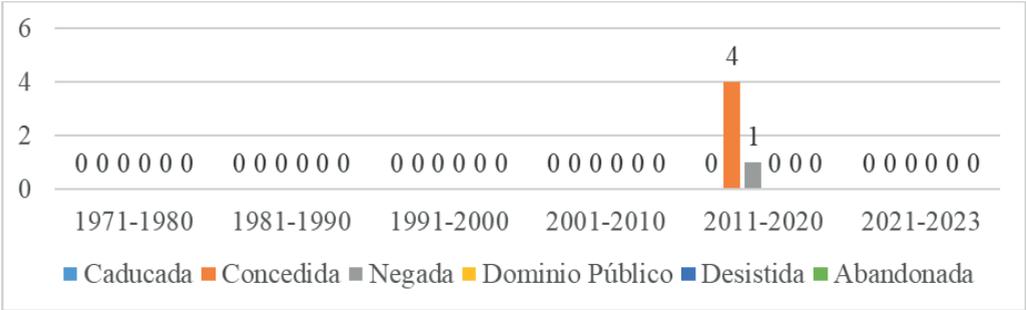
**Figura 23.** Estado actual de las solicitudes de las patentes en la SIC relacionadas con el café (2023)



**Fuente:** elaboración propia

En la figura 24 se puede visualizar el estado actual de las solicitudes de las patentes en la SIC relacionadas con las cadenas de suministro; se observa que en el periodo comprendido entre 2011-2020 se han efectuado estas solicitudes.

**Figura 24.** Estado actual de las solicitudes de las patentes en la SIC relacionadas con las cadenas de suministro (2023)

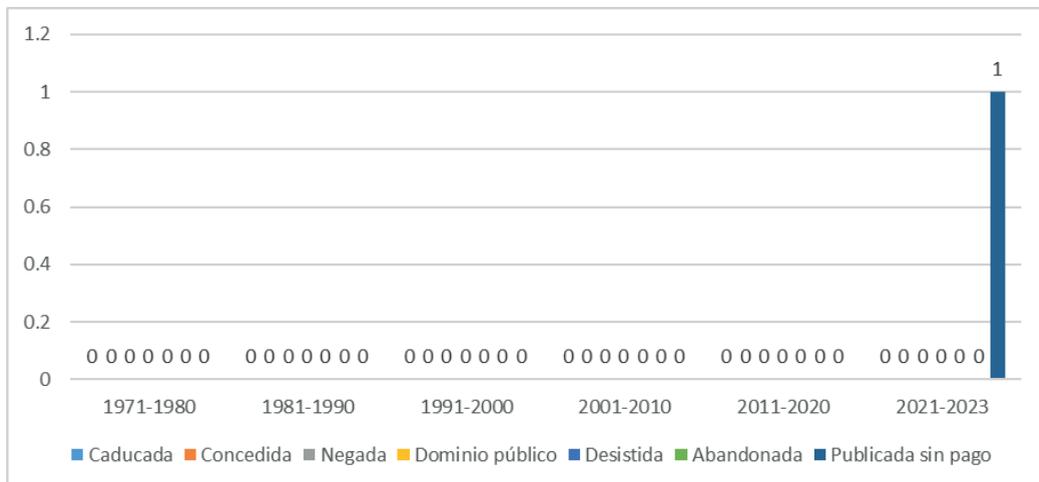


Fuente: elaboración propia

En la figura 25 se refleja el estado actual de las solicitudes de las patentes en la SIC relacionadas con las plataformas tecnológicas y prototipos computacionales; en el periodo 2021-2023 se puede detallar que solo hubo una solicitud que se encuentra caducada.



**Figura 25.** Estado actual de las solicitudes de las patentes en la SIC relacionadas con las plataformas tecnológicas y prototipos computacionales (2023)



**Fuente:** elaboración propia

Ahora bien, los grupos empresariales que más solicitaron patentes ante la SIC, en relación con la temática abordada, se presentan en la figura 26, donde sobresalen Nestlé (17), Nestec (11) y la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (10).

## CONCLUSIONES

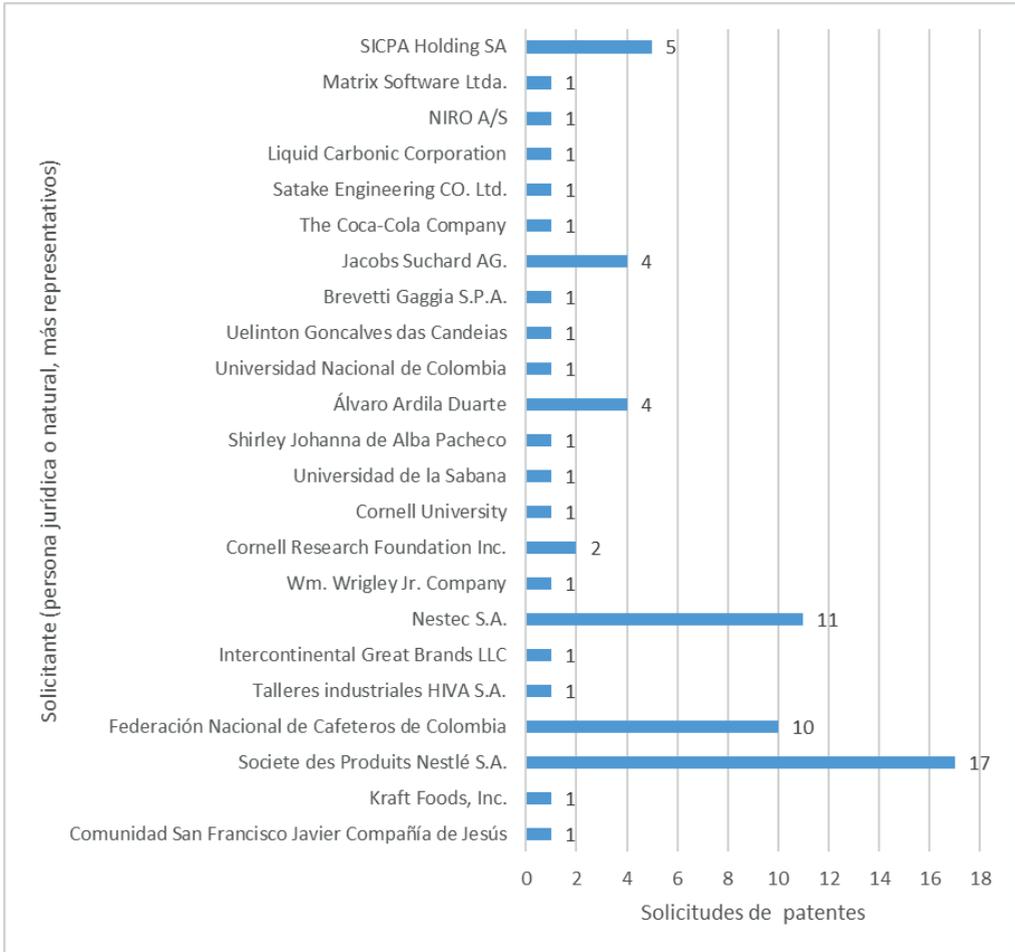
Las conclusiones del Capítulo 5 sobre el análisis cuantitativo de patentes desarrolladas en la cadena cafetera se presentan a continuación:

**Distribución de patentes:** la mayoría de las solicitudes de patentes en Colombia relacionadas con el café (98.93 %) se centran en el producto en sí, mientras que solo el 1.07 % están relacionadas con plataformas tecnológicas y prototipos computacionales.

**Solicitantes principales:** empresas como Apple Inc., Google LLC, Samsung Electronics y Facebook Inc. son los principales solicitantes de patentes relacionadas con el café a nivel global, según *Google Patent Search Advanced*.

**Inventores representativos:** los inventores más destacados en el ámbito de las patentes relacionadas con el café incluyen nombres como Ulrike Wachendorff-Neumann.

**Figura 26.** Solicitantes que han registrado solicitudes sobre el café, cadenas de suministro, plataformas tecnológicas y prototipos computacionales ante la SIC (2023)



**Fuente:** elaboración propia

**Clasificación Cooperativa de Patentes (CPC):** las patentes relacionadas con el café se clasifican principalmente bajo códigos como A61K, que se refiere a preparaciones para uso médico, dental o de tocador.

**Países de origen:** Estados Unidos, China y España lideran en la cantidad de patentes relacionadas con la CSC.



**Patentes en la CSC:** las patentes en plataformas tecnológicas, prototipos computacionales, *machine learning* e IA son escasas pero cruciales para mejorar la gestión de la CSC. Estas tecnologías pueden incluir sistemas de seguimiento y rastreo, gestión de inventario, automatización de procesos y toma de decisiones basada en IA.

**Estado de las patentes en Colombia:** la mayoría de las solicitudes de patentes en Colombia relacionadas con el café y las cadenas de suministro están en estado “caducado”. Solo una patente sobre plataformas tecnológicas está registrada y se encuentra en estado “publicada sin pago”.

**Solicitantes en Colombia:** Nestlé, Nestec y la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia son los principales solicitantes de patentes en relación con el café, CSC, plataformas tecnológicas y prototipos computacionales ante la SIC.

Necesidad de investigación y desarrollo: aunque hay un número significativo de contribuciones científicas sobre la CSC, se necesita más investigación que integre factores económicos, ambientales y sociales, incluyendo el rol de la mujer cafetera y la transformación digital.

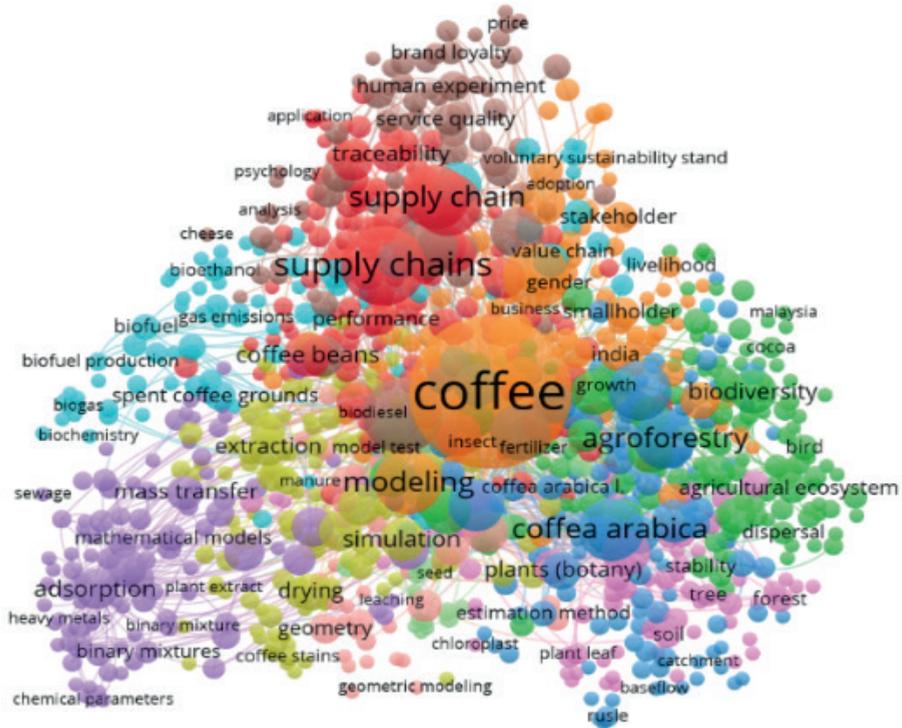
Acorde con todo lo anterior, el análisis cuantitativo revela una necesidad urgente de aumentar la inversión en investigación y desarrollo de tecnologías de última generación para la CSC. Esto incluye fomentar la innovación en plataformas tecnológicas y prototipos computacionales para mejorar la eficiencia, sostenibilidad y competitividad de la cadena cafetera.



## ESTADO DEL ARTE DE LA CADENA PRODUCTIVA DEL CAFÉ

El estado del arte sobre la cadena productiva del café se basa en iniciativas gubernamentales y no gubernamentales; por ejemplo, en Colombia está el proyecto educativo rural Escuela y Café de la FNC (2017), que contribuye al progreso social y comunitario, así como a la preservación de la familia cafetera en el relevo generacional, de acuerdo con Browning y Moayyad (2017), donde se adeuda por parte de la institucionalidad una mayor significancia y protagonismo en el empoderamiento de la mujer rural cafetera, dentro de la dinámica de la cadena de suministro desde una perspectiva de género en estudios desarrollados por Bilfield (2022) y Bilfield et al. (2020), en este aspecto, algunas regiones del mundo evidencian una mayor cultura y avance que otras, hacia la vocación e identidad femenina en las prácticas de cogestión del café.

**Figura 27.** Diagrama de visualización de la red de palabras clave en documentos científicos sobre CSC



**Fuente:** VOS viewer by Scopus (2023).

Por consiguiente, en la figura 27 se presenta el diagrama de la red de palabras clave que han sido trabajadas y desarrolladas por los autores identificados en la figura 9, donde las más representativas son: *Coffee*, *modelling*, *Supply Chains*, trazabilidad, biodiversidad, agroforestería y modelos matemáticos. Ahora bien, también existe una necesidad de desarrollo de nuevas tecnologías en machine learning, big data y blockchain que beneficien a la cadena del café pero que, a su vez, contribuyan a la conservación de recursos no renovables como el agua y suelo, al promover certificaciones bajo estándares de alta calidad.

De acuerdo con la figura 27, para la CSC es difícil establecer cuáles son las variables representativas para el modelado matemático bajo escenarios de sostenibilidad, por lo tanto, el diseño de desarrollos tecnológicos *machine learning* e IA podrían ser útiles para estos propósitos y la toma óptima de decisiones. En consonancia con los

autores de documentos sobre la CSC, el mapa de densidad arrojado por VOS-viewer de Scopus corrobora que Avelino, Rapidel, Tixier, Laderach, Vaast, Babin tienen una mayor influencia respecto a los autores más representativos, como se analizó en el diagrama de visualización de la red de autores que se identificaron en las figuras 8 y 9, y en el diagrama de la red de palabras claves en documentos científicos sobre la CSC (ver figura 26).

## Eje económico y variables

En el ámbito económico del café, es fundamental impulsar nuevas investigaciones que aborden la relación entre este sector y la financiación de su cadena de suministro. Según Moretto y Caniato (2021), se deben abrir nuevos caminos para facilitar la adopción y la incorporación de los caficultores locales a los ecosistemas empresariales descritos por Spaniol y Rowland (2022). Esta adopción incluye las mejores prácticas agrícolas en función de la productividad verde acorde con Marimin et al. (2018) y, a partir del análisis ágil de los costos de producción, la incidencia del precio y el cambio de divisa y sus efectos en ingresos netos estudiados por Battistella et al. (2017), bajo el modelo de extensionismo agropecuario, el manejo eficiente de la finca cafetera y el acceso a nuevas tecnologías en recolección y acopio. Por ende, es crucial la disminución de costos logísticos en la comercialización, como expresan Zhou et al. (2022).

De la misma forma, se debe continuar en el esfuerzo de promover la denominación de origen DO (certificación que garantiza su autenticidad y calidad, vinculándolo a una región geográfica específica y a sus métodos de producción única. Esta certificación asegura que el café proviene de una zona particular y que posee características distintivas derivadas de esos entornos). En el caso del Café de Colombia, la DO subraya la superioridad de su sabor, aroma y cuerpo, únicos en el mundo. Este reconocimiento no solo protege la autenticidad del café colombiano, sino que también establece estándares de producción y calidad que deben seguirse desde el cultivo hasta su posterior procesamiento, distribución y comercialización), con un enfoque de diferenciación y posicionamiento de cafés especiales y orgánicos en nichos de mercado desde la *Corporate foresight* (CF) o previsión prospectiva corporativa que se refiere a la capacidad de una organización para anticipar y prepararse para futuros cambios y tendencias. Esta capacidad es crucial para fomentar un clima de innovación dentro de las empresas, abordada por Marinković et al. (2022) mediante prácticas de protección del precio-negociación futura y mecanismos de estabilización implementados por la FNC (2017). Por último, es imperativo el desarrollo de estudios sobre la incidencia de externalidades en entornos heterogéneos y fluctuantes (Tan et al., 2022a). Estas variables podrían ser representadas en un modelado matemático acorde con

diversos autores, como Kouadio et al. (2021), soportado en un desarrollo tecnológico, *machine learning* e IA que impacten la toma de decisiones de forma asertiva y coherente conforme a lo expuesto por Ferri *et al.* (2015); Steger et al. (2021) y Van Hille et al. (2020). Por tanto, reconocer y disminuir los riesgos para la sostenibilidad dentro de las cadenas de suministro es un componente importante en el anhelo de comprender la logística, también por los miles de procesos productivos y empleos involucrados directa o indirectamente, en el marco de un paradigma de modelado de simulación comúnmente utilizado para evaluar sistemas complejos afirmado por Bashiri *et al.*, (2021).

### Componente sociotecnológico

Simultáneamente, desde la metodología de investigación cualitativa, se ha implementado la investigación acción sociocultural en la cadena cafetera en adelantos investigativos socializados por Feher y Katona (2021), sumados a estudios sobre logística humanitaria de Henrique de Moura et al. (2020), análisis de problemas sociotécnicos citados por Yáñez-Sandivari et al. (2021) y la incorporación de prácticas que potencialicen la asociatividad identificadas en estudios de Kunsiripunyo y Sathirakul (2021) en el marco del desarrollo rural y el extensionismo agropecuario, la conciencia hacia la variabilidad climática, según Ramírez-Villegas et al. (2012), las prácticas sociales en relación con la percepción de sostenibilidad (Rich et al., 2018) y equidad de género (Kangile et al., 2021).

El café juega un papel clave en el mantenimiento de millones de medios de vida en todo el mundo, afirman Noponen et al. (2012), por ello, en el eje social se debe procurar el desarrollo integral de la familia y la comunidad, con acceso a escolarización infantil y a educación superior, según Akoyi et al. (2020). Por ejemplo, según la FNC (2017), se destaca el programa de educación superior denominado Universidad en el campo, al promover desde la formación integral, el trabajo colaborativo y solidario, que ha sido objeto de estudio por Fontana y Pisalyaput (2022). Por otro lado, la renovación de la infraestructura es perentorio para el desarrollo de obras en zonas cafeteras, principalmente vías terciarias y vivienda rural. También la protección social e incidencia en la política pública que promueva la formalización laboral y la vinculación al sistema integral de salud a los caficultores y trabajadores del sector cafetero. Por último, lograr más apoyo para la participación comunitaria, la asociatividad y la cooperatividad ha sido abordado por Mojo et al. (2017), así como la adaptación de las buenas experiencias, dado el trabajo unido que es promovido en las cooperativas de caficultores exitosas, de acuerdo con la FNC (2017), y que es una responsabilidad de todos impulsarlo, para propiciar la felicidad en los caficultores al ser un fin en términos de paz y bienestar común definido por Habaradas and Mia (2021).

## Variables ambientales

El sector cafetero está siendo fuertemente impactado por la variabilidad climática, ello quedó en evidencia en el evento COP26 ONU-2021, donde se ha corroborado que las **tecnologías** digitales y la gestión de la información son herramientas que cada vez serán más utilizadas en relación con la variabilidad climática, acorde con Dwivedi et al. (2022), en función, por ejemplo, de la productividad, el mercado y el manejo arbóreo del café, según Bote y Vos (2017).

Hay que mencionar, además, que comprender las emisiones de gas de efecto invernadero (GEI), investigado por Ortiz-Gonzalo et al. (2017), en la CSC es trascendental para evaluar las opciones de mitigación de la variabilidad climática dentro del sector, de acuerdo con Noponen et al. (2012). Por consiguiente, es necesario en la gestión ambiental, como afirman Zhou et al. (2013), continuar con el trabajo transdisciplinario realizado por Steger et al. (2021b) para la protección, cuidado y buen uso de los recursos naturales que conlleven a la adaptación y supervivencia humana, como mencionan Torres Castillo et al. (2020), desde la gestión óptima de los recursos naturales en investigaciones llevadas a cabo por Guido et al. (2022) y Guido et al. (2020), las cuales propiciaron el desarrollo de nuevas tecnologías para reducir el uso de agua, según Sporchia et al. (2021), y su descontaminación, en adelantos presentados por Byrareddy et al. (2020), como también la gestión del suelo, al ser factores clave en la CSC, para generar una mayor cobertura en la adopción de prácticas de sostenibilidad, acorde con Nalau y Cobb (2022).

Al mismo tiempo, es necesario modelar matemáticamente la cadena de suministro a partir de **System Dynamics** (SD), con el fin de analizar y describir el cambio o evolución que experimentan estas variables a lo largo del tiempo, incluyendo una vez más la logística y su relación con la variabilidad climática, según Pham et al. (2020). Y, por consiguiente, desde las perspectivas del sur global, examinar la promoción de la valoración plural de la naturaleza para la equidad y la sostenibilidad (Zafra-Calvo *et al.*, 2020). Debido a que la cadena del café aún no está del todo adaptada a la variabilidad climática, es clave introducir el manejo del sombrero, la reforestación y protección real de fuentes hídricas y de suelos, que se reflejan en los documentos de avances técnicos desarrollados en los últimos años, según FNC (2017).

Estas configuraciones de red de la CSC son abordadas desde el diagnóstico y evaluación de sus particularidades. A continuación, se explora en detalle los diferentes eslabones de la CSC, desde la obtención de las materias primas hasta la entrega final al consumidor:

- 1. Obtención de la materia prima:** la red de suministro comienza con la supervisión y adquisición de las materias primas necesarias para la producción del café (material genético), luego de la cosecha se obtienen los granos de café verde (Neilson y Pritchard, 2007). Los proveedores desempeñan un papel fundamental en esta etapa, ya que son responsables de distribuir y suministrar la materia prima a las empresas. (Ayyanathan and Kannammal, 2015).
- 2. Fabricación de productos:** una vez que se obtiene el café pergamino seco y verde, comienza el proceso de fabricación del café tostado y molido. Los fabricantes se encargan de convertir los granos de café verde en un producto terminado que esté listo para su consumo (Wang et al., 2021).
- 3. Producción:** esta etapa implica toda la red de procesos productivos necesarios para transformar los granos de café a tostado. La producción garantiza la calidad y diversidad del café que se ofrece en el mercado (Bravo et al., 2022).
- 4. Distribución y transporte:** cuando el café está listo ingresa a la red de distribución y transporte desde los depósitos de las empresas hasta los puntos de venta o directamente a los consumidores. El transporte juega un papel fundamental en esta etapa, ya que garantiza que el producto llegue en óptimas condiciones y en el momento adecuado (De Assis y Camponogara, 2016; Shemer et al., 2022).
- 5. Entrega:** finalmente, el café es entregado a los consumidores finales, ya sea a través de tiendas minoristas, cafeterías, supermercados o ventas en línea. La entrega eficiente y oportuna es esencial para satisfacer las necesidades de los clientes y mantener la satisfacción del consumidor (Mohammadi *et al.*, 2023; Vodenicharova, 2020).

Es decir que la eficiencia en la CSC, según Olafsdottir y Sverdrup (2019), para los eslabones de la red de la cadena, tiene como objetivo principal garantizar la fabricación y distribución de un producto de calidad que satisfaga las necesidades de los consumidores. Del mismo modo, falta fortalecer en la CSC la estructura de soporte y de implementación de nuevas propuestas de valor a través de talento humano, con competencias necesarias enmarcadas en una cultura de innovación y resultados mediante uso de TIC, que incluyan herramientas digitales como aquellas presentadas por la FNC (2017).

De todos modos, es necesario propiciar ambientes de resiliencia desde el rol gobierno analizados por Shaw et al. (2019), por lo que si se evalúan las políticas de desarrollo y programas público-privados, acorde con Golinucci et al., (2022), podrían influir en una mayor inestabilidad de la seguridad alimentaria y nutricional dentro de las fincas cafeteras, lo que afectaría diversos aspectos clave en la cadena de producción

y comercialización del café. Esto incluiría la compra-venta del café, la ampliación de redes colaborativas, las operaciones de café pergamino seco, así como la logística y el transporte. Además, impactaría en el control estricto de calidad del fruto de café y su posterior almacenamiento, en la producción de café soluble liofilizado de buen sabor y aroma (Servín-Juárez et al., 2021), también en el transporte del café, que debe ser custodiado y monitoreado desde los puntos de despacho hasta los puertos de exportación. Este proceso requiere personal altamente capacitado en la recepción y control de calidad. En el caso del café de Colombia, este recorrido comienza con destino a más de 60 países.

Las patentes han sido determinantes en la consolidación de la CSC, al proteger innovaciones y fomentando el desarrollo tecnológico en la industria desde las siguientes ópticas:

- 1. Innovaciones en procesamiento y maquinaria:** las patentes protegen nuevas tecnologías y métodos de procesamiento del café; en 1884, Angelo Moriondo desarrolló una máquina de vapor para la preparación de café, esta fue la precursora de las máquinas modernas de expreso, posteriormente las técnicas de filtración tuvieron una evolución interesante.
- 2. Cápsulas de café:** las cápsulas de café, como las de Nespresso, también están protegidas por patentes. Estas patentes cubren tanto el diseño de las cápsulas como el método de preparación del café; la marca Nestlé tiene uno de los mayores números de patentes relacionadas con café frente a cápsulas de competidores en el mercado.
- 3. Variedades de café y biotecnología:** las patentes también pueden aplicarse a nuevas variedades de plantas de café desarrolladas mediante biotecnología.
- 4. Propiedad intelectual en marcas y diseño:** además de las patentes, la propiedad intelectual en la industria del café incluye marcas registradas y diseños industriales, para el caso es fundamental la protección de identidad de marca.
- 5. Impacto en la competitividad:** las patentes y otras formas de propiedad intelectual son esenciales para la competitividad en la cadena del café, para la recuperación de inversiones.

Ejemplos de patentes en la industria del café:

- Máquinas de expreso: patentes para tecnologías que mejoran la eficiencia y calidad de las máquinas de expreso.
- Métodos de procesamiento: patentes para nuevos métodos de procesamiento que mejoran el sabor y la calidad del café.
- Cápsulas de café: patentes que cubren el diseño y funcionalidad de las cápsulas de café.
- Para finalizar, las patentes son una herramienta poderosa para proteger y fomentar la innovación en la industria del café, asegurando que las nuevas tecnologías y métodos puedan ser desarrollados y utilizados de manera efectiva.

## CONCLUSIONES

Del Capítulo 6 sobre el estado del arte de la cadena productiva del café, se derivan las siguientes conclusiones:

**Iniciativas gubernamentales y no gubernamentales:** proyectos como “Escuela y Café” de la FNC en Colombia contribuyen al progreso social y la preservación de la familia cafetera. Sin embargo, se necesita un mayor empoderamiento de la mujer rural cafetera en la CSC.

**Eje económico:** es crucial proyectar nuevas investigaciones sobre la financiación de la CSC, promover la denominación de origen y estudiar la incidencia de externalidades en entornos fluctuantes. La adopción de tecnologías y prácticas agrícolas modernas puede mejorar la productividad y reducir costos logísticos.

**Componente socio-tecnológico:** la investigación acción sociocultural y la logística humanitaria son importantes para abordar problemas sociotécnicos y promover la asociatividad en el desarrollo rural. Programas como “Universidad en el Campo” son esenciales para la educación y el desarrollo integral de la comunidad cafetera.

**Variables ambientales:** la variabilidad climática impacta fuertemente el sector cafetero. Es necesario comprender las emisiones de gases de efecto invernadero

y continuar con la gestión óptima de recursos naturales. La adopción de prácticas sostenibles y la protección de fuentes hídricas y suelos son fundamentales.

**Eslabones de la Cadena de Suministro:** la CSC incluye la obtención de materias primas, fabricación de productos, producción, distribución y transporte, y entrega al consumidor final. La eficiencia en estos eslabones es crucial para garantizar la calidad y satisfacción del consumidor.

**Fortalecimiento de la estructura de soporte:** es necesario fortalecer la estructura de soporte en la CSC mediante el uso de TIC y herramientas digitales. La resiliencia y la colaboración público-privada pueden mejorar la seguridad alimentaria y la estabilidad en las fincas cafeteras.

**Patentes e innovación:** las patentes protegen innovaciones en procesamiento, maquinaria, cápsulas de café, variedades de plantas y propiedad intelectual en marcas y diseño. Estas patentes son esenciales para la competitividad y recuperación de inversiones en la industria del café.

Por consiguiente, el estado del arte de la cadena productiva del café destaca la importancia de la innovación tecnológica, la sostenibilidad, el empoderamiento social y la eficiencia en la CSC. La colaboración entre actores públicos y privados, junto con el desarrollo de nuevas tecnologías, será determinante para enfrentar los desafíos y mejorar la competitividad de la industria cafetera a futuro.



## TRANSFORMACIÓN DIGITAL PARA UNA CADENA DE SUMINISTRO DEL CAFÉ ÁGIL

La transformación digital, según Jackson (2019), es fundamental para el desarrollo óptimo de la CSC, los efectos y su análisis, acorde con Vocke et al. (2020), junto con las tecnologías de plataforma, se están haciendo cada vez más acentuados en las empresas (Gupta et al., 2022). Sumado a esto, la IA y el progreso de prototipos computacionales colaborativos basados en la nube para la gestión de desastres, clima extremo y operaciones de emergencia deben ser consideradas en escenarios flotantes o cambiantes en el corto y mediano plazo y podrían ser adaptativas, expresado por Nayak et al. (2022).

Mientras tanto, se podría a través de la incorporación de TIC generar un aumento significativo de las ventajas competitivas en la cadena cafetera a futuro (Nguyen et al., 2017), dado que en la actualidad los retos del sector cafetero aún no están siendo del todo atendidos por la institucionalidad, para lograr el liderazgo inspirador, como también el empoderamiento de la mujer que es fundamental en la equidad y democracia, desde la óptica de la transformación digital y todas sus potencialidades, ello implica la integración de tecnologías digitales en todos los aspectos de las operaciones intrínsecas para aumentar la eficiencia, mejorar la precisión y optimizar el flujo de bienes desde los proveedores hasta los clientes. Este proceso abarca varias características clave:

**Automatización de procesos:** uso de tecnologías como la robótica y el *software* de gestión para automatizar procesos manuales, lo que reduce errores y aumenta la eficiencia (Lara Estrada et al., 2017; Nurhazizah et al., 2023).

**Integración de sistemas:** conexión de diferentes sistemas de TI, como sistemas de planificación de recursos empresariales (ERP), sistemas de gestión de almacenes (WMS) y sistemas de gestión de transporte (TMS), para permitir una visibilidad y coordinación completas a lo largo de la cadena de suministro (Acosta-Alba et al., 2020; Nguyen et al., 2021a; Ramos et al., n. d.; Ramos, et al., 2019).

**Análítica avanzada y big data:** según Janakiraman y Ayyanathan (2022), el empleo de herramientas de analítica avanzada para analizar grandes volúmenes de datos y obtener *insights* permiten mejorar la toma de decisiones y prever tendencias del mercado (Aprilia et al., 2021a).

**Internet de las cosas (IoT):** uso de dispositivos IoT para monitorear y rastrear productos en tiempo real, lo que mejora la gestión del inventario y la calidad del servicio al cliente (Groth, 2013).

**Inteligencia artificial (IA) y machine learning (ML):** aplicación de IA y ML para prever demandas, optimizar rutas de entrega y gestionar inventarios de manera más eficiente (Bettín-Díaz *et al.*, 2018; Taylor, 2023).

**Blockchain:** implementación de la tecnología *blockchain* para aumentar la transparencia, la trazabilidad y la seguridad en las transacciones y en el intercambio de información dentro de la CSC (Köhler et al., 2022; Li et al., 2022; Surarityothin et al., 2022).

**Plataformas en la nube y ciberseguridad:** migración de infraestructuras de TI a la nube para mejorar la escalabilidad, la flexibilidad y la colaboración entre los participantes de la CSC, desde el refuerzo de la seguridad de los sistemas de información para proteger datos sensibles y operaciones de la CSC contra ciberataques y amenazas digitales (Gupta et al., 2022; Nascimento et al., 2020).

**Sostenibilidad y responsabilidad social:** integración de prácticas sostenibles y éticas en la CSC, aprovechando la tecnología para minimizar el impacto ambiental y mejorar las condiciones laborales (Bray, 2019; Jones et al., 2023).

Por tanto, según Sunmola et al. (2021); Wang y Sarkis (2021) la transformación digital en la CSC no solo se trata de adoptar tecnología, sino también de cambiar la cultura

organizacional para ser más ágil, adaptable y orientada a datos. Esto requiere un enfoque estratégico, inversión y un cambio en la mentalidad tanto de los líderes como de los empleados de la organización Kittichotsatsawat et al. (2021); Lianghui y Reeveerakul (2019).

Por ende, el abordaje de la resiliencia en la CSC en la triada gestión-organización-ambiente, según Jiang et al. (2021), establecería la transversalidad de los aspectos tecnológicos para la construcción de un desarrollo tecnológico, *machine learning* e IA. De esta forma, también aspectos relacionados con una *green coffee supply chain* (GCSC) hicieron parte del impacto derivado de esta investigación dentro del entorno cafetero. Adicional, en la CSC las decisiones estratégicas tienen un impacto significativo en los aspectos económicos, sociales y ambientales que repercuten en una GCSC promisoría Neilson y Pritchard (2007); Torabzadeh et al. (2022). A continuación, se presentan algunos ejemplos relevantes desde un plano económico, social y ambiental:

**Económico:** según David et al. (2017) y Sembiring et al. (2022), uno de los factores clave en la economía cafetera es el precio del café, ya que la fijación de precios afecta directamente a los productores y a la economía de los países productores. Un precio justo es fundamental para garantizar la sostenibilidad de los agricultores y la calidad del producto final. Además, las inversiones en tecnologías innovadoras, como la automatización de la producción y el uso de herramientas como blockchain, big data y machine learning, pueden mejorar la eficiencia y trazabilidad en la cadena de suministro (Jaber et al., 2022; Kittichotsatsawat et al., 2021a).

**Social:** las condiciones laborales, como los salarios, el entorno del trabajo y los derechos laborales afectan a los trabajadores en las plantaciones de café. Garantizar condiciones justas y seguras es fundamental, también las decisiones sobre inclusión y diversidad de grupos marginados, como mujeres rurales cafeteras y comunidades indígenas, pueden tener un impacto social positivo (Lee y Rammohan, 2017; Schaa-fsma et al., 2023).

- » **Ambiental:** prácticas agrícolas sostenibles, que significa decidir adoptar prácticas respetuosas con el ambiente, como la agroforestería o la reducción de pesticidas, afecta la biodiversidad y la salud del suelo. También, la gestión del agua desde decisiones sobre el uso eficiente en la producción de café es esencial para la conservación de este recurso natural (Partelli et al., 2022; Zhou et al., 2022).

En efecto, las decisiones estratégicas en la cadena del café deben considerar no solo los aspectos económicos, sino también los sociales y ambientales para lograr un equilibrio sostenible (Torabzadeh et al., 2022). Sumado a esto, la transformación digital presenta varios retos y desafíos clave en la CSC entre los más importantes están:

- » **Cambio cultural y mentalidad:** afirman Biotto et al. (2012); Flórez et al. (2022) y Hindsley et al. (2020) que adoptar tecnologías digitales requiere un cambio en la mentalidad y la cultura organizacional. Las empresas deben estar dispuestas a abandonar prácticas tradicionales y abrazar nuevas formas de trabajar. Ejemplo: pasar de registros en papel a sistemas digitales para rastrear la trazabilidad del café.

Inversión inicial y costos continuos: la implementación de tecnologías digitales puede ser costosa. Las empresas deben estar dispuestas a invertir en infraestructura, capacitación y mantenimiento. Ejemplo: desarrollar una plataforma de seguimiento basada en *blockchain* para rastrear el origen del café como lo hicieron Bager et al. (2022); Bettín-Díaz et al. (2018); Sunmola et al. (2021) y Thiruchelvam et al. (2018).

- » **Resistencia al cambio:** los empleados pueden resistirse al cambio, especialmente si están acostumbrados a procesos manuales. La capacitación y la comunicación son esenciales para superar esta resistencia. Ejemplo: convencer a los agricultores de adoptar nuevas prácticas agrícolas basadas en datos (Candelo et al., 2018; Schroth et al., 2015; Vochozka et al., 2022).
- » **Seguridad y privacidad de datos:** la transformación digital implica el manejo de grandes cantidades de datos. Las empresas deben garantizar la seguridad y la privacidad de estos datos. Ejemplo: proteger la información de los agricultores y los consumidores en una plataforma de *blockchain* (D'Addario, 2013; Pandey et al., 2019; Sayogo et al., 2016).
- » **Integración de sistemas heredados:** muchas empresas tienen sistemas heredados que deben integrarse con las nuevas tecnologías digitales. Esto puede ser complicado y requerir una planificación cuidadosa. Ejemplo: integrar un sistema de gestión de inventario existente con una solución de análisis de *big data*. (Janakiraman y Ayyanathan, 2022; Kitchichatsawat et al., 2021).

- » **Capacitación y habilidades:** los empleados deben adquirir nuevas habilidades para aprovechar al máximo las tecnologías digitales; por ejemplo, el uso de herramientas de análisis de datos o en la interpretación de resultados de *machine learning* (Okamura et al., 2021; Tallyn et al., 2018).

De acuerdo con estos seis puntos, la transformación digital es necesaria para la sostenibilidad y la competitividad en la CSC al cambiar el modelo tradicional hacia uno que incorpore estas tecnologías, lo cual permite a las empresas tomar decisiones más informadas y mejorar su impacto económico, social y ambiental (Nguyen et al., 2022). Por lo tanto, las plataformas digitales o tecnológicas y los prototipos aún necesitan de esfuerzos conjuntos de comunidades de investigación como una forma efectiva de optimizar resultados en beneficio de la resiliencia y gobernanza en CSC, según Liao et al. (2023). Esta transformación digital disruptiva en la CSC será fundamental para las métricas de análisis y el modelado matemático en la próxima década, al afianzar un mundo ecológico e interconectado (Johnsson, 2014; Kolk, 2012). Por último, este tipo de investigaciones conducen a la generación de este conocimiento que fortalece los grupos de investigación de la UNAD, la Universidad del Valle y la Universidad de Caldas (Colombia), desde estas líneas o temáticas innovadoras en beneficio de las comunidades cafeteras en el microterritorio.

### **Big data para la cadena cafetera: desarrollo tecnológico e innovación**

La aplicación de análisis de big data y el uso de tecnologías modernas para aumentar la eficacia y efectividad de la CSC, revela que varias herramientas se pueden aplicar dentro de la gestión, al constituir una mayor ventaja competitiva en las organizaciones mediante el suministro de datos. Ayuda, además, a examinar las características de los datos interconectados y su relación e impacto desde las decisiones que se tomen. De la misma manera, contribuye con el monitoreo y la gestión ágil de los riesgos de la cadena de suministro en el marco de gestión de procesos. Por tanto, el big data asegura la sostenibilidad, según Kittichotsatsawat et al. (2021).

Por lo tanto, la agilidad en la CSC permite, para responder rápidamente a las demandas del mercado, mejorar la eficiencia operativa y mantener la calidad del producto. Para lograr una cadena de suministro ágil es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos:

- 1. Tecnología y digitalización:** entre estas, internet de las cosas, *blockchain* y sistemas de gestión de la CSC, la información en tiempo real hará mucho más confiable la relación entre los *stakeholders* del mercado. Esto mejora la transparencia y la trazabilidad, al facilitar una respuesta rápida a cualquier problema que surja.
- 2. Optimización logística:** la optimización de la logística es fundamental para reducir tiempos y costos, en relación con el ruteo, eficiencia en la gestión de investigación y la dinámica transparente entre actores de la cadena. El uso de algoritmos y análisis de datos puede ayudar a predecir y gestionar mejor la demanda.
- 3. Colaboración y comunicación:** lograr una comunicación fluida entre todos los actores es una tarea indispensable para una operación que sea considerada ágil. Plataformas colaborativas y herramientas de comunicación en línea pueden facilitar esta interacción.
- 4. Sostenibilidad:** integrar prácticas sostenibles no solo mejora la resiliencia de la CSC, sino que también puede aumentar su agilidad y sostenibilidad.

Ejemplos de estrategias ágiles:

- Uso de drones: monitorea las plantaciones y optimiza el uso de recursos.
- *Blockchain*: asegura la trazabilidad y transparencia en toda la CSC.
- Análisis predictivo: anticipa la demanda y ajusta la producción y distribución en consecuencia.

Implementar estas estrategias puede ayudar a las empresas cafeteras a ser más ágiles, al responder de manera efectiva a los desafíos y oportunidades del mercado global.

## Transformación digital y agilidad

Con base en el análisis cuantitativo, se estudiaron las particularidades de la transformación digital con base en café pergamino seco, además de elementos de tipo logístico que se relacionan a continuación:

- » Identificación de la oferta-demanda y su comportamiento histórico: asociado a los productos del café, derivados y subproductos, y los canales de exportación-importación establecidos, potencialmente definidos y por definir.

- » Identificación de medios de transporte para la CSC y costos respectivos frente a la transformación digital: detección de puntos de consumo y distribución de productos del café desde un punto de vista logístico, distancias, infraestructura, tecnología, normatividad, medios, mediciones utilizadas y por utilizar. Sumado a ello, el tipo de costos y su estructura transversal en la consideración de las redes de transporte y de distribución para la CSC.
- » Caracterización del impacto medioambiental en las redes de transporte y distribución de la CSC: al analizar factores ambientales en el marco del triple bottom line con incidencia en la red de distribución, entre estos, incidencia de la CSC en el suelo y el agua, huella de carbono y gases por efecto invernadero que inciden en la variabilidad climática.
- » Identificación de impactos sociales: en el marco del triple bottom line, a partir de la identificación de las zonas de producción, se establecieron indicadores de impacto social que afectan de forma significativa la red de distribución; por ejemplo, la familia cafetera y el relevo generacional, la resiliencia, equidad de género para mujeres rurales cafeteras y el impacto laboral a partir de contratos.

## CONCLUSIONES

La transformación digital es esencial para optimizar la CSC. Según Jackson (2019), esta transformación permite una mayor eficiencia y precisión en las operaciones. Vocke et al. (2020) y Gupta et al. (2022) destacan que las tecnologías de plataforma están cada vez más integradas en las empresas, mejorando la gestión y la adaptabilidad. La inteligencia artificial (IA) y los prototipos computacionales colaborativos basados en la nube son cruciales para la gestión de desastres y operaciones de emergencia, como indican Nayak et al. (2022). Estas tecnologías permiten una respuesta rápida y adaptativa a escenarios cambiantes.

Se destaca la importancia de la transformación digital clave para el desarrollo óptimo de la CSC. La integración de tecnologías digitales mejora la eficiencia, precisión y optimización del flujo de bienes desde los proveedores hasta los clientes. La automatización e integración de sistemas mediante robótica y *software* de gestión, junto con la integración de sistemas de TI como ERP, WMS y TMS, permite una visibilidad y coordinación completas a lo largo de la CSC.

La incorporación de tecnologías de la información y comunicación (TIC) puede aumentar significativamente las ventajas competitivas en la cadena cafetera, como sugieren Nguyen et al. (2017). Esto es vital para abordar los retos actuales del sector, mejorar el liderazgo y empoderar a las mujeres en la industria. La automatización de procesos, la integración de sistemas, el uso de analítica avanzada y **big data**, IoT, IA, **machine learning**, **blockchain**, y plataformas en la nube, son componentes clave de esta transformación. Estas tecnologías no solo mejoran la eficiencia y la transparencia, sino que también promueven la sostenibilidad y la responsabilidad social.

El uso de herramientas de analítica avanzada y **big data** permite analizar grandes volúmenes de datos para mejorar la toma de decisiones y prever tendencias del mercado, también, la implementación de dispositivos IoT y tecnología **blockchain** mejora la transparencia, trazabilidad y seguridad en la CSC, facilitando una gestión más eficiente del inventario y la calidad del servicio al cliente. La aplicación de IA y ML optimiza la previsión de demandas, rutas de entrega y gestión de inventarios, aumentando la eficiencia operativa.

Las plataformas en la nube y ciberseguridad permiten mejorar la escalabilidad, flexibilidad y colaboración entre los participantes de la CSC, mientras que la ciberseguridad protege datos sensibles y operaciones contra amenazas digitales.

La transformación digital requiere un cambio cultural y organizacional, inversión estratégica y un enfoque en la capacitación de los empleados. Además, es fundamental para la resiliencia de la CSC, integrando aspectos tecnológicos y sostenibles para crear una Green Coffee Supply Chain (GCSC). Por lo tanto, la transformación digital en la CSC es un proceso integral que abarca la adopción de tecnologías avanzadas, la mejora de la eficiencia operativa, la sostenibilidad y la equidad social. Este enfoque holístico permite enfrentar los desafíos y aprovechar las oportunidades en el mercado global del café.

La integración de prácticas sostenibles y éticas en la CSC minimiza el impacto ambiental y mejora las condiciones laborales, contribuyendo a una CSC más responsable; por estas razones, la adopción de tecnologías digitales requiere un cambio en la mentalidad y cultura organizacional, promoviendo una actitud más ágil, adaptable y orientada a datos.

Los principales desafíos incluyen el cambio cultural, la inversión inicial y costos continuos, la resistencia al cambio, la seguridad y privacidad de datos, la integración de sistemas heredados y la capacitación de habilidades. La agilidad en la CSC es crucial

para responder rápidamente a las demandas del mercado, mejorar la eficiencia operativa y mantener la calidad del producto. Esto se logra mediante la tecnología y digitalización, optimización logística, colaboración y comunicación, flexibilidad en la producción y sostenibilidad. La aplicación de *big data* y tecnologías modernas aumenta la eficacia y efectividad de la CSC, proporcionando una ventaja competitiva mediante el suministro de datos y la gestión ágil de riesgos.



## **PERSPECTIVAS DE INVESTIGACIÓN EN LA PRODUCCIÓN Y COMERCIALIZACIÓN DE CAFÉ VERDE, MÁS USOS ALTERNATIVOS DE SUBPRODUCTOS COMO LA BORRA DE CAFÉ DE LA VARIEDAD (*COFFEA ARABICA*)**

### **Café verde**

Según Sierra (2022), Colombia se posiciona como el tercer mayor productor de café en el mundo. En 2005 recibió la denominación de origen Café de Colombia; actualmente, es uno de los productos agrícolas más exportados a países como Estados Unidos, Japón y la Unión Europea.

Para determinar la calidad del café de alta gama, se evalúan diversos factores intrínsecos y extrínsecos de los granos. Basado en estos análisis, las cooperativas

o empresas que comercializan café fijan el precio conforme al valor establecido por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, el cual está influenciado por las fluctuaciones en la Bolsa de Nueva York. Además, se otorga un bono al caficultor por la calidad del café.

El propósito de esta revisión bibliográfica fue identificar los métodos utilizados para analizar la calidad del grano en su estado verde. Cada tipo de análisis tiene criterios de aceptación mínimos que deben cumplirse; si el grano no alcanza estos parámetros, no puede clasificarse como café de alta calidad para la cata.

Este trabajo sirvió como una herramienta de consulta y guía para los caficultores. Sin embargo, se debe destacar que la información disponible en el país sobre la calidad del café está bastante limitada debido al control de las empresas privadas del sector. Aunque la contribución de la academia y los profesionales ha sido significativa, la información sigue siendo difícil de encontrar. Por ello, sería útil realizar una investigación más exhaustiva para incluir más fuentes de información (Sierra, 2022).

En Colombia, la producción de café tiene un notable impacto social, económico y cultural. Este producto ha dejado una huella positiva significativa en todos los hogares colombianos. Las semillas del cafeto se utilizan para preparar una bebida que se distingue por su agradable aroma y sabor, gracias a sus propiedades organolépticas, convirtiéndose en una de las bebidas más influyentes a nivel mundial (Guevara y Murillo, 2018).

El café colombiano, que goza de reconocimiento internacional, se presenta en varias variedades, siendo el *Coffea arabica* el más cultivado en el país, apreciado por sus características intrínsecas y su excelente calidad en taza. Según la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, el país cuenta con 5,7 millones de hectáreas dedicadas al cultivo de café. Destacan regiones de alta producción como la zona cafetera, que incluye los departamentos de Quindío, Risaralda y Caldas, ubicados a 1200 metros sobre el nivel del mar, condiciones ideales para el cultivo. También se encuentran los departamentos de Huila, Tolima, Cauca y Nariño. Según la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA), en el último año se produjeron 421 496 toneladas de café, con una participación del 48,8% del total, mientras que el Eje Cafetero aportó un 13,3% de la producción en 2020.

En términos de producción por departamento, Huila ocupa el primer lugar con 118 167 toneladas anuales, lo que representa el 13,8% de la producción total. Para 2022, la Federación Nacional de Cafeteros estimó la producción total en aproximadamente 12,5 millones de sacos, mientras que el Ministerio de Agricultura lo hizo en 13 millones de sacos. El café colombiano, debido a su prestigio internacional, tiene ventajas

competitivas como producto premium, gracias a su origen geográfico, condiciones climáticas distintivas, características del suelo, la variedad cultivada y las prácticas realizadas durante la cosecha, poscosecha y trilla. Se aplican medidas de control durante estas etapas, incluyendo las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) y Buenas Prácticas de Manufactura (BPM) para prevenir la contaminación y adulteración, lo que asegura una alta acidez y características organolépticas sobresalientes como un aroma intenso, sabor suave y un cuerpo bien equilibrado. El aseguramiento de la calidad y el control garantizan que las propiedades y usos del producto sean seguros y lo distinguan para los consumidores. En Colombia, la especificación del café detalla el origen geográfico, el proceso de cosecha, el tipo de lavado y la calidad del grano en la taza.

La recolección de café, o cosecha, ocurre entre marzo y abril en aproximadamente 590 municipios colombianos, representando a más de medio millón de propietarios de fincas cafeteras (Staff, 2021). Este trabajo tiene como objetivo revisar los análisis de calidad para el grano de café verde en Colombia. Los conocimientos aquí reunidos provienen de una investigación documental sobre las características intrínsecas y extrínsecas del café en estado verde para clasificarlo como café de calidad. La estructura del trabajo incluye una introducción al café verde y su historia en Colombia, la revisión de la normativa colombiana sobre requisitos de calidad durante la producción, así como las Buenas Prácticas Agrícolas y de Manufactura. También se detalla el procedimiento para los análisis de calidad, como la determinación de humedad, densidad, tamaño de los granos y análisis de defectos. Finalmente, se examina la industria colombiana y las empresas que realizan análisis acreditados, así como el acceso de los caficultores a la información sobre la calidad del café y se ofrecen recomendaciones para la cosecha y poscosecha (Sierra, 2022).

La producción de café en Colombia representa un importante impulso para la economía del país. Los caficultores se benefician de este contexto, ya que el precio del café verde en pesos colombianos varía diariamente, dependiendo del comportamiento del mercado, la Bolsa de Valores de Nueva York y el tipo de cambio del peso colombiano frente al dólar. La Federación Nacional de Cafeteros de Colombia proporciona alternativas de comercialización para negociar precios, incluyendo ventas futuras, depósitos y precios fijos con entrega inmediata. Los caficultores deben conocer sus costos de producción y el ciclo de cosecha para ajustar los precios adecuadamente.

La calidad premium del café colombiano está determinada por el rendimiento del café seco y se realizan análisis de humedad, tamaño del grano, densidad y defectos en el café verde. Este documento describe los procedimientos analíticos y los equipos necesarios para que los caficultores evalúen la calidad de los granos de café verde y puedan reclamar un precio superior por su producto.

## **Normativa colombiana para la producción y comercialización de café verde**

La normativa colombiana para la producción y comercialización de café verde establece un marco regulatorio integral que garantiza la calidad y autenticidad del café producido en el país. Esta normativa abarca desde las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) y las Buenas Prácticas de Manufactura (BPM) hasta los requisitos específicos para la exportación. Entre las regulaciones más destacadas se encuentran las resoluciones y decretos emitidos por el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, así como por la Federación Nacional de Cafeteros, que supervisan aspectos como el registro de exportadores, la calidad del café, y las contribuciones cafeteras. Estas normativas no solo aseguran que el café colombiano mantenga su reputación de alta calidad en el mercado internacional, sino que también protegen los intereses de los productores locales, promoviendo prácticas sostenibles y equitativas en toda la CSC, a continuación, se presenta en detalle:

### **Certificación en Buenas Prácticas Agrícolas (BPA)**

Acorde con Sierra (2022), la calidad del café verde producido en Colombia está influenciada por varios factores, incluyendo la variedad cultivada, las condiciones climáticas, así como el manejo agronómico y fitosanitario. Además, las medidas de control durante y después de la cosecha juegan un papel crucial. Las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) son fundamentales en este proceso, ya que abarcan los principios y requisitos de higiene relacionados con la producción, procesamiento, empaquetado, almacenamiento, transporte y distribución de alimentos. Estas prácticas buscan controlar y reducir los riesgos para la calidad y seguridad del producto, comenzando con un programa de limpieza para empleados, instalaciones, equipos y empaques, además de la capacitación y control de salud del personal.

Las fincas cafeteras han de contar con un plan de saneamiento documentado, accesible para las autoridades ambientales y de salud. Este plan incluirá programas de limpieza, uso de desinfectantes, gestión de desechos y control de plagas. Los programas de limpieza se ajustarán a las necesidades de cada área de procesamiento, especificando los agentes de limpieza, dosis, frecuencia de uso y responsabilidades. Los productos de limpieza serán claramente identificados y almacenados de forma adecuada para evitar contaminación. El manejo de desechos debe prevenir la contaminación de fuentes de agua e implementar métodos eficientes de tratamiento de aguas residuales. Además, el manejo integrado de plagas asegurará que los roedores, insectos y otros animales no contaminen el café. Las instalaciones deben estar separadas y diseñadas para facilitar la limpieza y desinfección. El cumplimiento de las BPA es certificado por

el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) mediante la Resolución 30021 de abril de 2017, que establece los requisitos para la certificación en BPA en la producción primaria de vegetales y otras especies para consumo humano (Sierra, 2022).

### **Buenas Prácticas de Manufactura (BPM) para la industria del café**

En 2003, Icontec publicó la NTC 5181, que establece las Buenas Prácticas de Manufactura para la industria del café, aplicables a trilladoras, tostadoras, fábricas de extracto de café, transporte, distribución y comercialización de café verde o pergamino. La evaluación médica del personal, educación en prácticas de manipulación higiénica, y el manejo de límites críticos y acciones correctivas son esenciales para garantizar la seguridad del producto. Las instalaciones deben estar alejadas de fuentes de contaminación y diseñadas para facilitar la limpieza y desinfección (Sierra, 2022).

El cumplimiento de las BPM, según la NTC 5181, es verificado por el Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos (Invima) y el Ministerio de Salud.

### **Indicaciones Geográficas Protegidas**

Acorde con la figura 28, las indicaciones geográficas (IG) vinculan la calidad de un producto con su origen, garantizando que cumpla con estrictos requisitos de calidad y procedencia. En 2007, la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia logró que el café colombiano fuera reconocido como una IG por la Unión Europea, y en 2013 Suiza también otorgó esta protección.

**Figura 28.** Logo Indicación Geográfica Protegida



**Fuente:** Federación Nacional de Cafeteros (2021b).

En Colombia, la Superintendencia de Industria y Comercio delegó la autorización para el uso de la denominación «Café de Colombia» a la Federación Nacional de Cafeteros en 2010. Esta denominación se aplica únicamente en países que reconocen la IG y está limitada a la variedad *Coffea arabica* cultivada en la zona cafetera colombiana (Sierra, 2022).

Para proteger las características y la reputación del Café de Colombia, en 2007 la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia consiguió que la Comisión de la Unión Europea reconociera al café colombiano como una Indicación Geográfica Protegida. Posteriormente, en 2013, el Gobierno suizo también otorgó esta protección al Café de Colombia. En cuanto a las denominaciones de origen nacionales protegidas en Colombia, que están a cargo de la Superintendencia de Industria y Comercio, solo en el caso del Café de Colombia se ha solicitado la delegación de la autoridad para permitir el uso de la denominación. Esta delegación fue concedida en agosto de 2010 a la Federación Nacional de Cafeteros, que administra el Fondo Nacional del Café y representa a una gran parte de los productores del país. Hasta 2021, se habían registrado once solicitudes para el uso de la denominación Café de Colombia y dos solicitudes para la delegación de autorización de las denominaciones de origen Café de Nariño y Café de Cauca (Superintendencia de Industria y Comercio, 2022).

## Denominación de origen

El Café de Colombia cumple con los requisitos de la Denominación de Origen Protegida, según la Resolución N.º 4819 de 2005. Este café se distingue por su aroma y características particulares, resultantes de factores naturales y humanos en la producción. Para obtener la autorización de uso de la Denominación de Origen «Café de Colombia», los operadores deben cumplir con una serie de requisitos, incluyendo certificación del producto y registro de trilladoras. La Federación Nacional de Cafeteros administra esta denominación y otorga la autorización de uso (Superintendencia de Industria y Comercio, 2022).

Este café se distingue por su aroma único y completo, característico de las variedades arábicas, influenciado por factores naturales como la geografía, la agricultura, la ubicación topográfica y el genotipo, además de elementos humanos relacionados con el rendimiento húmedo y la recolección selectiva. También es notable por su fuerte componente artesanal, cultivado por caficultores tradicionales que aplican técnicas expertas en la selección y control de la cosecha. La autorización para usar la Denominación de Origen «Café de Colombia» solo se concede en países que reco-

nocen esta denominación. El producto en cuestión es de la variedad *Coffea arabica*, y la figura 29 muestra la zona geográfica definida para esta denominación, ubicada en la región cafetera colombiana, entre latitudes de 1° a 11° 15' norte, longitudes de 72° a 78° oeste y altitudes de 400 a 2500 metros sobre el nivel del mar (Sierra, 2022).

**Figura 29.** Zona cafetera de Colombia



**Fuente:** Resolución 4819 de 2005, Superintendencia de Industria y Comercio.

Este café se distingue por su sabor suave y limpio, con una acidez y cuerpo medio a alto, y un aroma único que solo proviene de las especies arábicas. Esta calidad es el resultado de factores naturales como la geografía, la agricultura, la topografía y el genotipo, así como de prácticas humanas en el proceso de beneficio húmedo, la recolección selectiva y un fuerte componente artesanal, cultivado por caficultores tradicionales.

Para obtener la autorización para usar la Denominación de Origen (DO) Café de Colombia a través de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, los operadores deben cumplir con los siguientes requisitos:

- a) Manifiestar su interés en ser autorizado para usar la DO Café de Colombia, proporcionando los datos básicos del solicitante.
- b) Obtener una certificación del producto emitida por un organismo de certificación acreditado o designado. Este organismo puede ser designado por la Superintendencia de Industria y Comercio, según sus competencias legales, o estar acreditado bajo la Norma ISO/IEC Guía 65 (Norma europea EN 45011) para sistemas de certificación de productos.
- c) Presentar la información y documentación requerida en el Reglamento de Uso de la Denominación de Origen Café de Colombia, en particular el Artículo 14 para la comercialización de café verde. Esto incluye el registro de trilladoras que trillen, acondicionen y envasen café verde en Colombia, que califique como «Café de Colombia» protegido por la DO. Cada establecimiento debe presentar:
  - Certificado de existencia y representación legal si se trata de una persona jurídica.
  - Nombre y domicilio del propietario del establecimiento, junto con su número de identificación fiscal o NIT.
  - Nombre y dirección del establecimiento.
  - Número y fecha de la matrícula mercantil del establecimiento y la Cámara de Comercio correspondiente.
  - Declaración de que el establecimiento es apto para el proceso de trilla y que implementa procedimientos para separar e identificar el café protegido por la DO de aquel que no cumple con los requisitos.

**PERSPECTIVAS DE INVESTIGACIÓN EN LA PRODUCCIÓN Y COMERCIALIZACIÓN DE CAFÉ VERDE, MÁS USOS ALTERNATIVOS DE SUBPRODUCTOS COMO LA BORRA DE CAFÉ DE LA VARIEDAD (COFFEA ARABICA)**

- Características de las instalaciones, incluyendo capacidad de trilla y superficie.
- Declaración de cumplimiento con las normas sanitarias.
- Declaración de aceptación voluntaria del reglamento de uso de la DO Café de Colombia.

La solicitud debe seguir el procedimiento descrito en la figura 30, que detalla los pasos para obtener la autorización.

**Figura 30.** Proceso de autorización de uso de la DO, DOR o IGP



**Proceso de autorización de uso de la DO, DOR y/o IGP.**

*El trámite lo debe realizar la trilladora para café verde, tostadora para café tostado, solubilizadora para solubles y para extractos el fabricante.*

- 1** Envío a la Federación del formato de solicitud: "Manifestación de interés".
- 2** Comuníquese con la **Fundación Cafecert** para proceso de certificación.
- 3** Envío de documentación inicial a **Cafecert**.
- 4** Envío de muestras a la **Fundación Cafecert**.
- 5** Análisis de laboratorio de la muestra enviada.
- 6** Resultados conformes o no con **DO, DOR y/o IGP** dependiendo del trámite.
- 7** Emisión de certificado por parte de la **Fundación Cafecert**.
- 8** Emisión de carta de autorización de uso por parte de la **Federación**.
- 9** Vigilancia anual.

**El proceso de certificación de la DO, DOR y/o IGP es llevado a cabo por la Fundación Cafecert.**

✉ [cafecert@fundacioncafecert.org](mailto:cafecert@fundacioncafecert.org) ☎ +57 (1) 313 6600 Ext.1345

**Fuente:** Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (2021b).

En la actualidad, la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia se encarga de gestionar las Denominaciones de Origen (DO) para el Café de Colombia y las DO regionales. Esto le da competencia para autorizar a los interesados que certifiquen sus

productos, permitiéndoles usar el sello oficial de la DO, que también está disponible para otros productos nacionales (figura 31).

**Figura 31.** Logo Denominación de Origen Protegida



**Fuente:** Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (2010).

### **Rainforest Alliance**

Fundado en 1992, Rainforest Alliance es una coalición de ONG y la Sustainable Agriculture Network (SAN) que comenzó a certificar plantaciones en 1996. Su programa requiere que los caficultores cumplan con estándares que abarcan prácticas de producción, protección ambiental y derechos sociales. El objetivo es fomentar la agricultura sostenible mediante la conservación de la biodiversidad y el respeto a los derechos de los trabajadores.

**Figura 32.** Logo Rainforest Alliance



**Fuente:** Aroma de Café (2022).

Este certificado está orientado al mercado global y promueve la trazabilidad y transparencia en la cadena de suministro. Los costos de auditoría son cubiertos por los compradores, y el café certificado por Rainforest Alliance puede beneficiar a los productores con mayores oportunidades de mercado y eficiencia.

### Criterios de aceptación para granos de café verde

Los criterios de aceptación varían según el propósito de uso de la materia prima. Para el café verde de variedad arábica destinado al uso industrial, se deben considerar los requisitos específicos detallados en la tabla 3. Estos criterios son aplicables para la comercialización dentro de Colombia.

**Tabla 3.** Características de calidad del café verde

Característica	Consumo		Pasilla
	I	II	
Humedad, % (Fracción de masa)	9,5 a 12	9,5 a 12	9,5 a 12
Materia extraña, % (Fracción de masa) máximo	0	0,3	0,5
Impurezas, % (Fracción de masa) máximo	0,2	0,5	1,0
Ripio, % (Fracción de masa) máximo	0,5	1,0	4,0
Densidad, (g/L) mínimo	660	600	580
<b>Defectos mayores: % máximo</b>	<b>7</b>	<b>15</b>	<b>25</b>
- Granos cardenillo, % máximo	0,2	0,2	0,5
- La suma de granos negros y parcialmente negros, granos vinagres y parcialmente vinagres, % máximo	***	***	***
Granos aprovechables, % mínimo	85	70	40
*** La Diferencia de los defectos mayores menos el contenido máximo de granos cardenillos es el porcentaje límite máximo permitido en la suma de los granos negros y parcialmente negros, vinagres y parcialmente vinagres.			

**Fuente:** FNC (2016b).

### Análisis requeridos para el café verde

Los análisis que deben realizarse se presentan a continuación en el orden secuencial son: a) determinación de humedad, b) determinación de la densidad, c) determinación del tamaño de los granos y d) análisis de defectos.

Las metodologías descritas están estandarizadas por Icontec para su aplicación en Colombia, aunque no excluyen la posibilidad de utilizar nuevas metodologías ofrecidas por el mercado o especificadas por clientes internacionales (ver apéndice).

## Exportación del café colombiano

En Colombia, la exportación de café está regulada por diversas normativas y decretos, como la Ley 9 de 1991, el Capítulo XIII del Decreto 1165 de 2019, el Decreto 1714 de 2009 del Ministerio de Comercio, Industria y Turismo y la Resolución Reglamentaria No. 05 de 2015 del Comité Nacional de Cafeteros de Colombia. La Federación Nacional de Cafeteros (FNC) es la entidad responsable de mantener el Registro Nacional de Exportadores de Café y de definir los requisitos para inscribir tostadoras, trilladoras y fábricas de café soluble en Colombia (Federación Nacional de Cafeteros, 2021c).

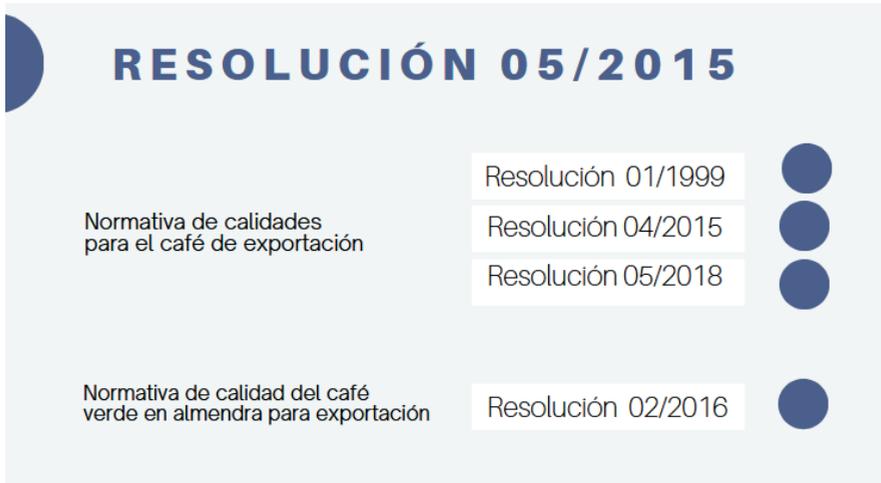
Para garantizar el suministro constante de café al mercado internacional, los caficultores, ya sean personas naturales o jurídicas, que desean exportar café verde o procesado deben registrarse en el Registro Nacional de Exportadores de Café gestionado por la FNC. Para completar este registro, presentarán el formulario correspondiente junto con:

- El Certificado de Existencia y Representación Legal para personas jurídicas, o el Certificado de Registro Mercantil para personas naturales, emitido por la Cámara de Comercio pertinente, con una antigüedad no mayor a treinta (30) días.
- Fotocopia del Registro Único Tributario (RUT).
- Fotocopia del documento de identidad de la persona natural o, en el caso de personas jurídicas, del representante legal.
- Certificación bancaria emitida con una antigüedad no superior a treinta (30) días.
- En caso de ser necesario, el original del poder otorgado para la firma y presentación de la solicitud, junto con una copia del documento de identificación del apoderado.

El registro ante la FNC es gratuito y se realiza a través del Portal Cafetero en <https://portalfnc.federaciondefcafeteros.org/>. Además, se ha desarrollado una aplicación que permite a los exportadores registrar sus ventas de café destinadas a la exportación y realizar el pago de la contribución cafetera. La normativa colombiana de calidad

para la exportación de café, incluyendo los requisitos específicos para Japón y la Unión Europea, está detallada en la figura 33.

**Figura 33.** Normativa para café de exportación



**Fuente:** Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (2021).

La Federación Nacional de Cafeteros de Colombia anima a los pequeños caficultores a participar en la exportación de café, incluso en cantidades reducidas. Para facilitar este proceso, ha establecido un procedimiento de exportación simplificado para caficultores, ya sean personas naturales o jurídicas. Por tanto, según Sierra (2022), el procedimiento es el siguiente:

1. Registro como exportador: el caficultor debe registrarse como exportador de café ante la FNC, completando el formulario requerido y presentándolo junto con la documentación necesaria.
2. Selección del operador postal: se debe elegir una empresa de mensajería para la exportación. Las empresas registradas ante la FNC incluyen: 472, FedEx, DHL, UPS, Deprisa, Servientrega, TNT, Tranexco y World Courier de Colombia. En el Portal Cafetero/Tienda en Línea, detallado en la figura 34, se pueden consultar los tipos de café disponibles (café verde, café tostado, café soluble y extracto), realizar el anuncio de exportación y generar el pago de la contribución cafetera.
3. Documentación: imprimir los documentos desde el portal cafetero, incluyendo el comprobante de pago de la contribución cafetera (PSE), el certificado de liquidación de la contribución cafetera y el certificado de reposo.

4. Certificaciones adicionales: dependiendo del país de destino y los requisitos del cliente o del courier, se deben solicitar los certificados correspondientes a las autoridades competentes, como el ICA o Invima.
5. Entrega y empaque: entregar todos los documentos al courier y empaquetar la mercancía asegurando que cumpla con todos los requisitos de seguridad y conservación del producto.

**Figura 34.** *Productos para exportación en pequeñas cantidades*



**Fuente:** Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (2021).

## Business Alliance for Secure Commerce

La Business Alliance for Safe Trade (BASC) es una organización internacional que busca promover el comercio seguro mediante la colaboración con gobiernos y organizaciones internacionales. Se ha convertido en un modelo global para los programas de asociación empresarial debido a su éxito en el sector. Las aduanas, los gobiernos y las organizaciones internacionales han apoyado la efectividad de los controles y procedimientos de seguridad implementados.

BASC Café es una entidad gremial sin ánimo de lucro creada para defender los intereses de una asociación de exportadores de café. No tiene fines comerciales, industriales ni de mercadeo; sus recursos se destinan a facilitar el comercio internacional. Su misión es garantizar la existencia de empresas legítimas y confiables en el mercado internacional, asegurando la implementación de programas que promuevan y mantengan estrictos estándares de seguridad. Esto incluye la prevención de la contaminación, el contrabando y otros delitos que afectan al mercado del café, y se rige por los Estatutos de la Organización Mundial BASC.

La participación en BASC Café es voluntaria para los exportadores de café de la zona cafetera del país, con el respaldo de autoridades nacionales y extranjeras, como el Bureau of Customs and Border Protection de EE. UU., la Dirección General de Aduanas y Derechos Indirectos de Francia, el Departamento de Aduanas e Impuestos Especiales de la Agencia Estatal de Administración Tributaria de España y la Dirección General de Aduanas de la República Dominicana. El objetivo es implementar estándares de seguridad en la cadena de comercio exterior. En la página oficial de BASC Café se encuentran listadas las empresas certificadas (ver figura 35) y aquellas en proceso de certificación. (BASC Café de Colombia, 2021)

**Figura 35.** BASC Café Colombia



**Fuente:** Capítulo Café Colombia Alianza Empresarial para un Comercio Seguro (2021). BASC Café Colombia.

### **Reglamento de Afiliación y Certificación BASC**

El Reglamento para la Afiliación y Certificación BASC establece las condiciones para el proceso de afiliación, certificación y recertificación de empresas en relación con BASC. También permite que se realicen acuerdos globales o sectoriales con otros organismos nacionales o internacionales en el ámbito del Sistema de Gestión en Control y Seguridad en el Comercio Internacional (BASC Café de Colombia- Admisiones, 2021).

La Federación Nacional de Cafeteros de Colombia lleva a cabo el monitoreo y control de las estadísticas, demostrando que el café de exportación se distingue por

la certificación de los predios según normas y sellos internacionales de calidad y sostenibilidad, como las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) y Rainforest Alliance. Esta normativa facilita la identificación del producto bajo la Denominación de Origen e Indicación Geográfica Protegida.

El café es un producto significativo a nivel global, y las tendencias internacionales de comercialización del grano se enfocan cada vez más en pruebas que identifican sus características físicas. La Federación Nacional de Cafeteros de Colombia ha establecido metodologías en línea con protocolos internacionales, normatividad y demandas de los clientes, con el objetivo de alcanzar una producción sostenible, competitiva y de alta calidad.

La calidad del grano comienza desde la cosecha. En una buena taza de café, no solo se evalúa la calidad del tostado, sino también el desempeño de cada caficultor. Estos enfrentan continuamente desafíos para mantener una producción sostenible, respetuosa con el ambiente y segura durante la trilla del café pergamino.

El proceso de poscosecha es fundamental para asegurar la trazabilidad del grano y conocer los procesos a los que ha sido sometido. Es un requisito para los caficultores que buscan mejorar el producto mediante Buenas Prácticas Agrícolas o certificaciones. Mantener la calidad del grano, tanto física como en taza, es un reto constante debido a la alta competencia global. La implementación de buenas prácticas agrícolas en el beneficio del café es clave para mantenerse en el mercado internacional.

La producción de café lavado ha crecido a nivel mundial en países como Ecuador, México, Nicaragua, Brasil, Indonesia y Vietnam. La industria cafetera colombiana se compromete a seguir investigando e implementando medidas para mejorar el rendimiento del grano y su monetización, con el fin de mantener el reconocimiento y la comercialización obtenida a lo largo de los años.

La producción de café verde *Coffea arabica* es crucial para la economía colombiana. El Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022, «Pacto por Colombia, pacto por la equidad», del Departamento de Planeación Territorial, incluye el Eje Cafetero y Antioquia, promoviendo la comercialización de estos productos a nivel nacional e internacional y fomentando la competitividad sostenible. El Eje Cafetero obtuvo la primera posición en el Índice de Logística Regional, con un potencial de mejora significativo.

En Colombia, los caficultores son, en su mayoría, herederos de una tradición cafetera. La cultura cafetera se ha visto afectada por el consumismo y las exigencias del

mercado internacional, lo que hace necesaria una producción de café sostenible que garantice la calidad del grano. La calidad del café debe mantenerse a lo largo de todas las etapas, desde la siembra hasta la poscosecha.

Según Sierra (2022), documento que tiene como objetivo apoyar a los caficultores en la poscosecha para asegurar la calidad del grano verde, la normativa colombiana vigente, los análisis mínimos de calidad requeridos para la variedad *Coffea arabica* en granos de café verde se deben realizar para evaluar las condiciones físicoquímicas. Teniendo en cuenta las condiciones de los caficultores en las fincas pequeñas y medianas, se establece que:

- La determinación de humedad en café pergamino puede ser realizada por el caficultor con el equipo medidor adecuado.
- La determinación del tamaño de los granos puede hacerse con mallas específicas, siendo posible realizar esta tarea mecánicamente sin necesidad de equipos eléctricos.
- El análisis de defectos en los granos puede ser realizado por el caficultor para identificar y corregir problemas y asegurar la calidad de cosechas futuras.
- Para determinar la densidad, se recomienda el método de caída libre por ser el más práctico.

Los rangos de aceptación de calidad deben ser verificados frecuentemente por los caficultores para asegurar que el producto cumple con las especificaciones requeridas. Este documento también detalla las certificaciones y sellos de calidad disponibles, el proceso para obtenerlos y los requisitos necesarios, con el fin de facilitar el acceso a mercados más competitivos y mejorar los precios de comercialización, asegurando la satisfacción de los caficultores con su trabajo en el campo colombiano.

Los análisis de calidad necesarios para evaluar la variedad *Coffea arabica* en granos de café verde producidos en Colombia incluyen cuatro pruebas principales. La primera, la determinación de la humedad, puede ser realizada por el caficultor en su propia finca. Los otros tres análisis —densidad, tamaño de los granos y análisis de defectos— son pruebas de laboratorio recomendadas por las normativas y que idealmente deberían ser realizadas en las compras de café o en cooperativas, debido a que los equipos necesarios suelen ser costosos para un pequeño caficultor.

De acuerdo con la normativa colombiana, los análisis de calidad requeridos para la comercialización del café verde son los siguientes:

- NTC 5938:2012 establece que el análisis de humedad debe mostrar un rango de entre 10 % y 11 % para el café verde destinado al uso industrial.
- El análisis de densidad debe estar entre 580 y 660 g/L.
- El análisis de materia extraña y defectos debe cumplir con un máximo de 0,5 % en fracción de masa, de acuerdo con los requisitos para el uso industrial.

En Colombia, la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia se encarga del registro de caficultores, ya sean personas naturales o jurídicas, para la exportación de café verde, tostado, soluble o extractos. También considera a caficultores y pequeñas empresas que exporten hasta 720 kilogramos anuales. BASC Café, por su parte, se encarga de certificar a las empresas o cooperativas para la exportación de café colombiano, asegurando que se cumplan tanto las condiciones establecidas para los caficultores como las normativas internacionales (Sierra, 2022).

### **Aplicaciones alternativas de los residuos de café (*Coffea arabica*) para la valorización de subproductos en la industria alimentaria**

Según Núñez (2024), la borra de café es el residuo orgánico obtenido de los granos de café que han sido tostados y molidos, y de cuya preparación solo se ha utilizado agua a temperaturas entre 190° C y 210° C (Osorio, 2019). También se le conoce como posos de café usados o, en inglés, como *spent coffee grounds* (SCG). Este residuo es el resultado del proceso de tostado del fruto del café y de la preparación de la bebida, y puede emplearse como sustrato para cultivar ciertos hongos comestibles. Su composición incluye una importante cantidad de compuestos grasos, proteicos, ácidos clorogénicos, polisacáridos y cafeicos, entre otros (Narváez y Villota, 2018).

La borra de café representa aproximadamente el 10 % del peso del fruto en su estado fresco (Rodríguez y Zambrano, 2013). Esto significa que, por cada kilogramo de café producido, se generan alrededor de dos kilogramos de residuo. A nivel mundial, esto equivale a más de seis millones de toneladas anuales. La generación de borra de café también ocurre en cafeterías, restaurantes y otros establecimientos que sirven café, y con las ventas globales que superan los 400 000 millones de tazas de café, resulta difícil precisar una cifra exacta del total de borra de café producida (Osorio, 2019).

La borra es el sedimento o residuo que queda después de preparar la infusión de café, visible en el colador o filtro, dependiendo del método de preparación, como el filtrado por goteo, la infusión, la infusión presurizada, el filtrado al vacío y el método por cocción, conocido comúnmente como café de olla. La borra de café contiene

cantidades significativas de fibra insoluble, antioxidantes, proteínas esenciales y azúcares de bajo índice glucémico, siendo resistente al procesamiento térmico y a la digestión, y totalmente segura para el consumo (Martínez-Sáez et al., 2017). Según Osorio (2019), la borra de café es una excelente fuente de fibra dietética, con compuestos como celulosa, hemicelulosa, lignina y galactomanano, que favorecen la salud intestinal (Núñez, 2024).

Entre los componentes de la borra de café se encuentran lípidos; ácidos como el palmítico, esteárico, oleico y linoleico, y cantidades notables de cafeína, polifenoles y melanoidinas, que se derivan del proceso de tueste. Estos compuestos se asocian con beneficios para la digestión. La literatura también destaca los beneficios de los ácidos clorogénicos, que poseen propiedades antivirales, antiinflamatorias y antimicrobianas, y de los polifenoles, que actúan como antioxidantes y pueden contribuir a la prevención de tumores, enfermedades cardíacas y otras afecciones (Osorio, 2019).

### ***Propiedades fisicoquímicas de la borra de café***

La borra de café contiene nutrientes como calcio, potasio, fósforo, magnesio y azufre, entre otros. La diferencia entre las especies arábica y robusta radica en que la segunda tiene un mayor contenido de cafeína, aminoácidos, trigonelina, ácidos, lípidos, minerales y proteínas, algunos de los cuales se degradan durante el tueste, generando nuevos compuestos en la taza de café (Narváez y Villota, 2018). La tabla 4 muestra la composición de las propiedades fisicoquímicas del residuo conocido como borra de café o posos de café.

**Tabla 4.** Análisis de la borra de café

Componente	Cantidad %	Componente	Cantidad %	Componente	Cantidad %
Humedad	7-8	Acido glutámico	18,6	Aminoácidos	-
Proteína cruda	10-12	Acido tánico	0,9	Alamina	6,23
Fibra cruda	35-44	Ácido palmítico	43,2	Valina	9
Nitrógeno libre	13-18	Ácido palmitoleico	0,4	Metionina	2
Cenizas	0,25-1	Acido esteárico	9,7	Isoleucina	6,3
Calcio	0,08	Ácido oleico	14	Leucina	13,4
Magnesio	0,01	Ácido linoleico	37	Tirosina	4,2
Sodio	0,03	Ácido araquidónico	3,8	Fenilalanina	8,3
Fósforo	0,01	Ácido gadoleico	0,4	Lisina	2,9
Manganeso	26,8 ppm	Ácido behénico	0,2	Histidina	2,2
Zinc	10 ppm	Ácidos grasos libres	7,6	Arginina	Trazas
Cobre	35 ppm	Valor de yodo	85-93	Hidroxiprolina	1
Cloruros	-	No saponificación	185-193	Glicina	7,6
Selenio	0,26 ppm	Valor de peróxido	11-17	Serina	1,9

**Fuente:** Angarita (2013).

## **Potencial de la borra de café en la industria alimentaria**

### • **Cultivo de *Pleurotus Ostreatus***

El cultivo de hongos comestibles ha sido una práctica ancestral para aprovechar sus nutrientes, proporcionando proteínas, aminoácidos, fibra y minerales esenciales para una dieta equilibrada, además de sus posibles propiedades medicinales. La producción de estos hongos está en continuo desarrollo, y actualmente se están utilizando varios desechos orgánicos, entre ellos los restos de café. Esta práctica ofrece la ventaja de ser económica al reutilizar residuos (Lechner y Mallerman, 2018).

En la producción industrial de hongos, el *Pleurotus ostreatus* se cultiva tradicionalmente en paja de cereales, especialmente de trigo, cuyo suministro es cada vez más limitado en muchas regiones. Sin embargo, los desechos de café de la industria cafetera, ricos en compuestos orgánicos, han surgido recientemente como una alternativa viable para el cultivo de *Pleurotus ostreatus* (Alsanad et al., 2021).

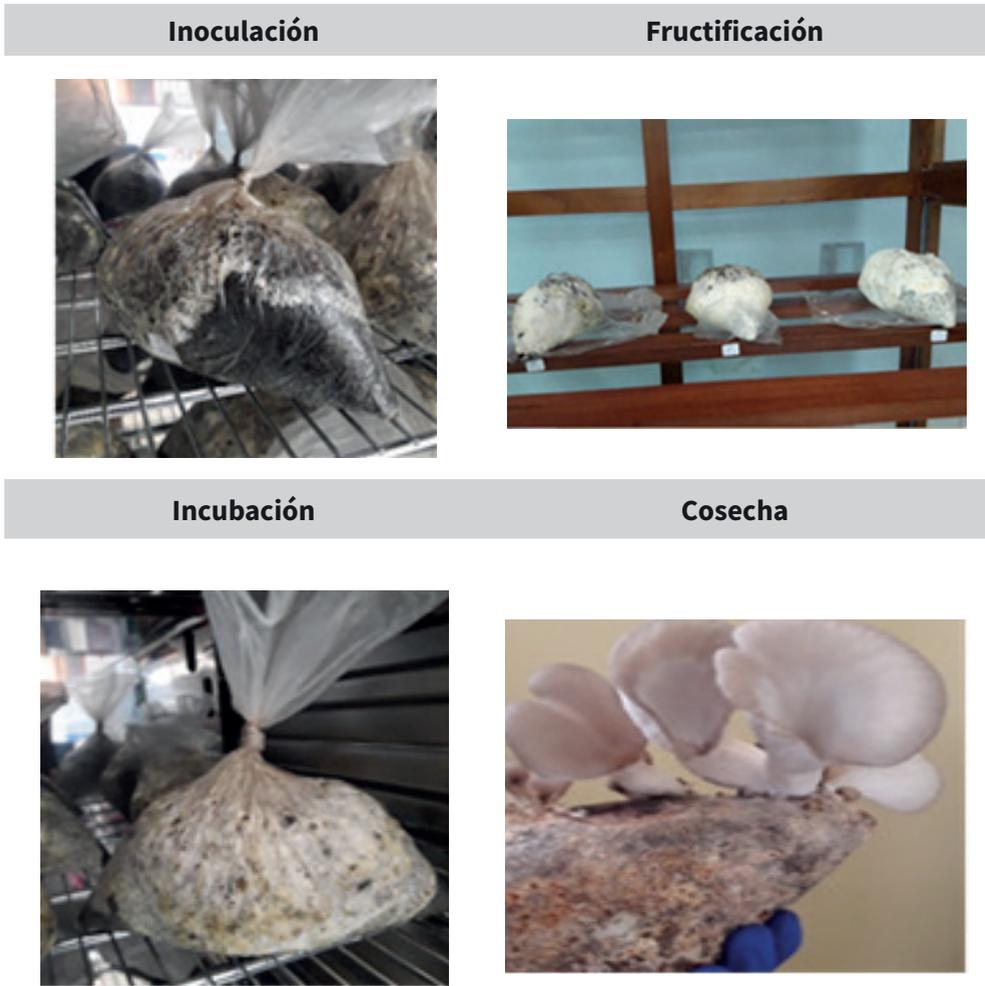
El *Pleurotus* ocupa el segundo lugar en la producción mundial de hongos, valorado tanto por sus cualidades gastronómicas como por su valor nutricional. Este hongo es bajo en grasas y calorías, con un contenido reducido de sodio, y es apreciado por sus carbohidratos, vitaminas y minerales. Además, posee propiedades medicinales y puede contribuir a la reducción de diversos riesgos para la salud (Alsanad et al., 2021).

Un estudio realizado por Job (2004) investigó el uso de posos de café para cultivar *Pleurotus ostreatus* y encontró que los sustratos con una mayor concentración de posos de café mostraron una reducción del contenido total de cafeína en casi un 60%. Esto sugiere que el micelio del hongo metaboliza la cafeína, sin que esta se acumule en los cuerpos fructíferos.

Estos resultados presentan un panorama prometedor para el uso de borra de café en el cultivo de hongos comestibles como el *Pleurotus ostreatus*, lo cual permite un aprovechamiento de los residuos del café. Este enfoque no solo puede reducir la contaminación, sino también ofrecer una alternativa económica para la producción (Job, 2004).

Hasta ahora, se han realizado pocos estudios sobre la explotación de los restos de café para el cultivo de setas comestibles y medicinales, lo que sugiere un área con potencial para futuros desarrollos (Kourmentza et al., 2018).

**Figura 36.** *Proceso de cultivo del hongo Pleurotus ostreatus cultivado en borra de café*



**Fuente.** Servín-Juárez et al. (2021).

- **Extracción de antioxidantes**

Los polifenoles son fitoquímicos encontrados en diversos alimentos vegetales, como el vino, el té, las verduras, las frutas, el cacao y el café, entre otros. Estudios han demostrado que estos metabolitos secundarios pueden tener varias bioactividades, incluyendo propiedades antioxidantes, antivirales, antibacterianas, anticancerígenas y antiinflamatorias (Castaldo et al., 2021).



Aunque hay antioxidantes artificiales disponibles en el mercado, como el BHA (E-320) y el BHT (E-321), que son fenólicos y ayudan a estabilizar los radicales libres, su uso prolongado puede ser cancerígeno, lo que ha llevado a su prohibición en países como Australia, Japón y algunas regiones de Estados Unidos. El residuo de café molido, obtenido después del proceso de preparación, todavía contiene varios elementos funcionales con alta capacidad antioxidante y beneficios para la salud. Sin embargo, aún no se ha explorado su uso para producir ingredientes alimentarios de valor añadido (Kim et al., 2016).

En un estudio de Zainol et al. (2020), que buscaba identificar las propiedades fisicoquímicas y antioxidantes de tres tipos de restos de café molido (robusta, arábica y libérica), se encontró que la extracción asistida por ultrasonidos y metanol era muy efectiva para obtener compuestos bioactivos de los posos de café usados. Los extractos resultantes mostraron una capacidad antioxidante superior a la de la mayoría de los informes previos. Este estudio indica que los posos de café usados podrían ser una valiosa fuente de antioxidantes naturales, lo que podría reducir la dependencia de antioxidantes sintéticos en la producción de alimentos, especialmente en ingredientes para alimentos funcionales.

Kim et al. (2016) investigaron el efecto antioxidante de la borra de café en carne cruda y cocida. Evaluaron la actividad antioxidante de los extractos de etanol y agua caliente de la borra de café utilizando varios métodos. Los resultados mostraron que los extractos de agua y etanol tenían efectos antioxidantes comparables al control positivo (BHA), pero los extractos HEE y CEE presentaron actividades antioxidantes más fuertes que el extracto WE. Esto sugiere que es viable extraer antioxidantes de la borra de café para usarlos como aditivos antioxidantes y conservantes naturales en carne.

Se ha confirmado que la borra de café o posos de café usados contienen moléculas inhibitoras de enzimas y sustancias conservantes notables que podrían utilizarse de manera natural y económica como aditivos alimentarios, en lugar de aditivos sintéticos. Sin embargo, el uso de disolventes orgánicos en la industria alimentaria está sujeto a regulaciones estrictas. Aunque los extractos obtenidos con metanol (MeOH) muestran propiedades sobresalientes en algunas aplicaciones biológicas, su uso está limitado. Por lo tanto, para garantizar la seguridad alimentaria, se recomienda el uso de disolventes como etanol (EtOH) en combinación con agua, que demuestran una excelente actividad antioxidante y son más apropiados para la producción de ingredientes alimentarios (Zengin et al., 2020).

- **Colorantes o pigmentos para alimentos extraídos de borra de café**

La borra de café es una rica fuente de colorantes vegetales que pueden ser utilizados en la industria alimentaria. Además de proporcionar color, estos pigmentos también ofrecen nutrientes que pueden ser beneficiosos para la salud. Los pigmentos extraídos de la borra mantienen una alta concentración de compuestos con propiedades antioxidantes y capacidad de tintura, lo que los convierte en pigmentos bioactivos. Estos pigmentos no solo añaden color, sino también sabor a los alimentos, lo que los hace aptos para ser considerados en alimentos funcionales (Campos, 2018).

Campos (2018) destaca que el colorante derivado de los residuos del café, particularmente de la borra de café usada, es una alternativa natural con compuestos bioactivos y antioxidantes. Este colorante puede ser obtenido de este subproducto del café y utilizado en la industria alimentaria como un colorante natural. En un estudio realizado por Cevallos y Guerrero (2017), se investigó la extracción del pigmento natural de la borra de café usando etanol y cloroformo como solventes. Se encontró que alrededor del 10 % del pigmento extraído se analizó mediante espectrofotometría UV y cromatografía en capa fina, revelando características similares a las del caramelo (Núñez, 2024).

- **Borra en la industria de panificación**

Núñez (2024) afirma que existen pocos estudios sobre la incorporación de borra de café usada en formulaciones alimentarias, aunque se conocen sus propiedades antioxidantes y su contenido de fibra dietética, manosa, galactosa y otros nutrientes. Estos componentes pueden ser utilizados en la industria de la panificación, ofreciendo una alternativa a ingredientes como colorantes artificiales y azúcares. La borra de café puede reemplazar estos ingredientes en diversas preparaciones alimentarias, especialmente en la panificación.

A continuación, se presentan algunos estudios relacionados con el uso de borra de café en la elaboración de productos de panadería.

- **Elaboración de galletas**

La borra de café, debido a su alto contenido de fibra, se perfila como una alternativa saludable para la producción de galletas. Aguilar et al. (2019) demostraron que las galletas enriquecidas con 17,5-25 % de harina de borra de café (SCG) son una fuente significativa de fibra dietética, ofreciendo un producto atractivo que podría comer-

cializarse con beneficios adicionales como la reducción de costos de producción y la disminución del impacto ambiental asociado con este subproducto.

**Figura 37.** *Galleta elaborada con posos de café*



**Fuente:** Castillo e Iriondo (2022).

La fibra dietética (DF) contribuye al bienestar intestinal y estomacal, y ayuda a reducir el riesgo de enfermedades cardíacas y sobrepeso. Se recomienda una proporción de 1:2 de fibra dietética soluble/insoluble, e incluye polisacáridos no amiláceos como celulosa, hemicelulosa y lignina (Janissen y Huynh, 2018).

Francisco Mayorga (2019) llevó a cabo un estudio en el que modificó la formulación de galletas incorporando borra de café en distintos porcentajes. Sustituyó parte de la harina de trigo por borra de café, elaborando galletas con adiciones de 1 %, 4 % y 7 % de este ingrediente, además de una muestra control. Para evaluar la aceptación del producto, se realizó una prueba sensorial con un panel de degustación y se analizó la actividad antioxidante de las galletas debido a la presencia de melanoidinas. Los resultados mostraron que las galletas con 4 % y 7 % de borra presentaron una mayor actividad antioxidante, con valores de IC50 similares o inferiores a los de otros productos, como los cítricos. Mayorga sugiere la posibilidad de extraer antioxidantes de la borra de café usando etanol y utilizarlos como sustitutos de la harina en productos que requieran coloración marrón o sabor a caramelo.

Mayorga concluye que reemplazar una parte de la harina de trigo con borra de café en las galletas no solo alteró la coloración, sino que también aumentó el contenido

de antioxidantes en más del 63% en la formulación con 7% de borra. Según el análisis sensorial, las galletas con un 4% de borra de café fueron las más apreciadas en términos de atributos sensoriales.

Koay et al. (2023) estudiaron el efecto de diferentes concentraciones de borra de café en galletas de mantequilla. Descubrieron que la adición de borra de café mejoró las cualidades del producto final, aumentando el contenido de fibra, proteínas y humedad, mientras disminuía el azúcar y las calorías, y mejoraba las propiedades antioxidantes. Las mezclas variaron en contenido de borra de café desde un 2% hasta un 10%. La muestra con un 10% de borra de café presentó menor dureza, un aroma más profundo y propiedades antioxidantes destacables.

La evaluación sensorial indicó que la galleta sin borra fue la más preferida, seguida por las galletas con 10% y 8% de borra. Esto sugiere que las galletas de mantequilla con borra de café podrían servir como un sustituto de grasas y un antioxidante natural, beneficiando tanto a los productos alimenticios como a la salud humana. La inclusión de borra de café como fibra dietética antioxidante tiene el potencial de mejorar la composición nutricional y la calidad sensorial de diversos productos alimenticios, aprovechando un subproducto funcional de valor agregado.

Castillo e Iriondo (2022) patentaron una formulación alimentaria que utiliza borra de café o posos de café usados como fuente de fibra dietética insoluble, conservantes y aminoácidos, entre otros nutrientes. Esta formulación se emplea en la industria de panificación y la producción de golosinas, incluyendo productos como panes, galletas, alimentos para el desayuno y bocadillos para personas de todas las edades, incluidas aquellas con necesidades dietéticas específicas.

La industria alimentaria con propiedades saludables ha crecido considerablemente en los últimos años y ha demostrado ser económicamente viable. Entre los productos ofrecidos se encuentran alimentos para lactantes, fórmulas infantiles, alimentos dietéticos sin gluten ni lactosa, productos para el control de peso y alimentos adaptados para deportistas, entre otros. En este contexto, los subproductos alimentarios, como la borra de café, han atraído interés como ingredientes funcionales. Es relevante notar que la composición nutricional de la borra puede variar según la variedad de café y su origen geográfico (Núñez, 2024).

A pesar de que se ha reportado el uso de borra de café para mejorar las propiedades biológicas de productos horneados, aún se ha investigado poco sobre el destino metabólico de los polifenoles liberados por estos alimentos durante la digestión gastrointestinal *in vitro* (Castaldo et al., 2021).

- **Elaboración de *muffins***

Benincá et al. (2023) investigaron cómo el uso de borra de café y de otros residuos que suelen ser difíciles de eliminar en la industria alimentaria puede ofrecer oportunidades para desarrollar formulaciones alimenticias con valor añadido. En su estudio evaluaron el efecto de distintos grados de tostado de la borra de café en la preparación de *muffins*. Utilizaron granos de café de la variedad *coffea arabica catuai*, adquiridos en Brasil, y realizaron una primera tostación a 170°C con una temperatura final de 190°C, seguida de una segunda tostación más oscura con una temperatura final de 216°C. Tras el proceso térmico, se molió la borra de café para obtener los posos, que luego se secaron en un secador de bandeja a 56°C.

Se realizaron análisis físicos y químicos de la borra de café, incluyendo la determinación de lípidos totales y fibra cruda, y se calcularon los carbohidratos por diferencia hasta completar el 100%. También se evaluaron los compuestos fenólicos, la actividad conservante, la cafeína, la trigonelina y el ácido clorogénico utilizando métodos adaptados, y se realizaron análisis microbiológicos del extracto de borra para detectar mohos y levaduras. Las placas se incubaron a temperatura ambiente durante siete días para contar microorganismos aeróbicos. Se prepararon *muffins* con diferentes porcentajes de borra de café (1%, 16%, 31%, 46% y 61%) y una muestra control.

**Figura 38.** *Muffins con diferentes concentraciones de borra de café*



**Fuente:** Benincá et al. (2023). Nota. Imágenes de *muffins*: control: 0% SCG; 161% en concentraciones crecientes de borra.

Benincá et al. (2023) realizaron una evaluación sensorial de los *muffins* para determinar su sabor y aceptación. La apariencia de los *muffins* varió con los diferentes porcentajes de borra de café. La muestra con 1% de borra fue la más aceptada, lo que indica que la incorporación de borra de café no afectó negativamente la aceptación del producto. Esto sugiere que este subproducto puede ser utilizado efectivamente

en productos alimenticios. Considerando que se generan aproximadamente seis millones de toneladas de borra de café anualmente, usar un 1 % de este residuo podría equivaler a alrededor de 100 000 toneladas de residuos aprovechables, contribuyendo a la protección ambiental y a la reducción de costos de producción.

Benincá et al. (2023) concluyen que tanto el tostado ligero como el oscuro tienen una buena aplicabilidad en la industria alimentaria. Martínez-Sáez et al. (2017) también señalan que la borra de café puede ser un ingrediente viable en preparaciones sólidas como galletas, sin comprometer la formulación ni la calidad sensorial del producto. Esta aplicación es adecuada para personas con necesidades dietéticas específicas y ofrece una forma de añadir valor a los subproductos del café a bajo costo.

Trà et al. (2021) discuten cómo el polvo de borra puede ser utilizado en la formulación de galletas con alto contenido de antioxidantes y fibra, manteniendo una calidad nutricional y fisicoquímica adecuada. Las galletas resultantes se consideran ricas en fibra y aceptables en términos de calidad sensorial, haciendo del polvo de borra una opción válida para la industria de panificación.

- **Elaboración de pan integral**

Rwubatse et al. (2021) investigaron una fórmula para elaborar pan utilizando borra de café o posos de café usados. Con el aumento del interés en alimentos funcionales, las panaderías están comenzando a producir pan de trigo integral además del pan blanco tradicional. En su estudio, prepararon una masa con 200 gramos de harina de trigo integral, 2 % de levadura seca instantánea, 2 % de cloruro de sodio, 4 % de borra de café, 1 % de jugo de limón y 1 % de jugo de hojas de romero. La masa se fermentó a 34°C con 60 % de humedad relativa durante 1 hora y luego a 39°C con 85 % de humedad relativa durante una hora y media. Tras el horneado, se evaluó el color y la textura del pan, así como sus características sensoriales mediante un panel de cata que examinó aspectos como color, sabor, textura, aroma y apariencia. El pan hecho con 100 % harina de trigo fermentada durante 60 minutos resultó ser el más duro.

Comparado con el pan de control, el pan que contenía borra de café, limón y romero mostró una menor dureza. Además, el reemplazo de parte de la harina de trigo integral, que es rica en fibra dietética, resultó en una reducción del contenido de fibra dietética en el pan final en comparación con el pan de control (Núñez, 2024).

En conclusión, el estudio de Rwubatse et al. (2021) indica que el tipo de trigo, el tiempo de fermentación de la masa y la inclusión de posos de café usados, jugo de limón y jugo de hojas de romero tuvieron un impacto significativo en el perfil de

textura, color, características físicas y atributos sensoriales del pan integral. Los panes fermentados durante 60 minutos resultaron ser más duros que aquellos con los mismos ingredientes, pero con fermentación prolongada. La fermentación más larga y la adición de los ingredientes mencionados contribuyeron a una mayor aceptación general del pan en comparación con el pan de control. El pan integral elaborado con estas adiciones satisfizo las preferencias de los consumidores en términos de textura, color y atributos sensoriales. Por lo tanto, la incorporación de borra, jugo de limón y hojas de romero en la fabricación de pan ofrece una alternativa económica y efectiva.

- **Conservante natural para alimentos**

De acuerdo con Núñez (2024), los compuestos fenólicos encontrados en la borra de café son realmente notables por sus beneficios para la salud y su potencial en la industria alimentaria. Estos compuestos fenólicos, que incluyen diversos derivados antioxidantes, son reconocidos por su capacidad para neutralizar el estrés oxidativo. La borra de café, rica en estos compuestos, se presenta como una fuente natural de antioxidantes que pueden ser beneficiosos para la salud.

Según los estudios de Badr et al. (2022), este subproducto puede desempeñar varios roles importantes:

- **Agente antifúngico natural:** dado el creciente problema de resistencia a los antifúngicos tradicionales, los compuestos fenólicos de la borra de café podrían ofrecer una alternativa eficaz para combatir infecciones fúngicas. Estos compuestos han mostrado propiedades antimicóticas y antiocratogénicas.
- **Protección contra micotoxinas:** las investigaciones indican que los extractos de borra pueden desintoxicar aflatoxinas y ocratoxina A en medios líquidos. Esta capacidad es crucial en la industria alimentaria, donde la presencia de micotoxinas puede representar un riesgo para la salud humana. El uso de extractos de borra en productos alimenticios podría ayudar a reducir la contaminación por micotoxinas a niveles seguros.
- **Melanoidinas y propiedades antioxidantes:** las melanoidinas, compuestos nitrogenados de color marrón formados durante la reacción de Maillard en el café, tienen propiedades antioxidantes. Estas melanoidinas pueden proteger los alimentos de la oxidación y la peroxidación lipídica, lo que es esencial para la calidad y seguridad de los productos alimentarios.
- **Actividad citotóxica y antibacteriana:** los extractos de borra de café han mostrado una actividad citotóxica moderada contra células y buenas pro-

propiedades antibacterianas. Esto sugiere que podrían tener un uso potencial en alimentos nutraceuticos, es decir, alimentos que aportan beneficios para la salud.

En resumen, los estudios subrayan la versatilidad y el valor potencial de la borra de café en las industrias alimentaria y farmacéutica. Sus compuestos fenólicos y otras moléculas bioactivas pueden desempeñar un papel significativo en la protección de los alimentos contra micotoxinas y en la creación de alimentos funcionales más saludables y seguros. La investigación en este ámbito está ayudando a encontrar nuevas maneras de aprovechar este subproducto del café, reduciendo su desperdicio y beneficiando tanto la salud humana como la calidad de los alimentos (Núñez, 2024).

**Extracción de celulosa:** en un estudio de Kanai et al. (2020), se investigó la valorización de la borra de café, también conocida como posos de café, para extraer celulosa de este subproducto. Se utilizaron granos de café tostado de las variedades robusta de Indonesia y arábica de Tanzania, los cuales fueron molidos para obtener partículas finas. Para extraer la celulosa, el material molido se mezcló con agua caliente. La mezcla se dejó secar sobre papel filtro a temperatura ambiente durante 24 horas.

**Oxidación de la celulosa:** los residuos sólidos de celulosa obtenidos fueron tratados con una solución de agua destilada que contenía Tempo (2,2,6,6-tetrametilpiperidina-1-oxilo) y NaClO (hipoclorito de sodio) a un pH de 10-10,5 y a temperatura ambiente. Este proceso de oxidación se llevó a cabo durante 3 horas con agitación continua. También se añadió NaOH (hidróxido de sodio) 0,5M durante el tratamiento.

**Filtración y lavado:** tras la oxidación, se añadió etanol y se filtró la celulosa oxidada. La celulosa se enjuagó varias veces con agua destilada para eliminar los reactivos y productos residuales.

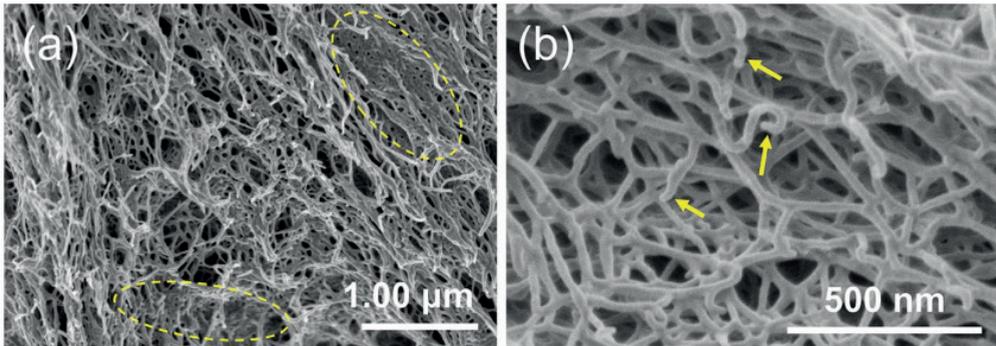
**Liofilización:** se liofilizó una muestra de la pasta de celulosa durante dos días para determinar su masa seca. La liofilización implica la congelación y eliminación del agua de la muestra sin calentarla, conservando así la estructura y las propiedades de la celulosa.

**Dispersión en agua y lavado con terc-butanol:** la pasta liofilizada se dispersó en agua destilada para formar una dispersión similar a un gel. Luego, se lavó con terc-butanol para eliminar impurezas y productos no deseados.

**Secado final:** la celulosa obtenida se secó completamente, transformándola en un polvo adecuado para diversas aplicaciones.

Este proceso permitió la obtención de celulosa a partir de la borra de café, proporcionando una manera efectiva de aprovechar este subproducto y convertirlo en un material útil para diferentes aplicaciones industriales. La celulosa extraída podría tener aplicaciones potenciales en la industria alimentaria, farmacéutica y otras áreas, dependiendo de sus propiedades específicas (Núñez, 2024).

**Figura 39.** Imágenes en microscopio de películas compuesta derivadas de la borra de café



**Fuente:** Kanai et al. (2020).

En otro estudio, Kanai et al. (2020) investigaron las nanofibras de celulosa derivadas de la borra de café, demostrando que esta fuente alternativa puede ser prometedora y presentar propiedades similares a la celulosa tradicional.

La borra de café contiene una cantidad significativa de fibra, estimada entre 50 % y 70 %. Esta celulosa extraída tiene diversas aplicaciones potenciales, como en la producción de papel. García-Muñoz y Riaño-Luna (1999) también estudiaron los procesos de extracción, purificación y caracterización de la celulosa en el residuo de café. Además, otros investigadores han considerado la producción de papel a partir de borra de café, dada la cantidad considerable de celulosa y hemicelulosa en estos materiales (Campos, 2018).

- **Borra de café como material para envases y utensilios alimentarios**

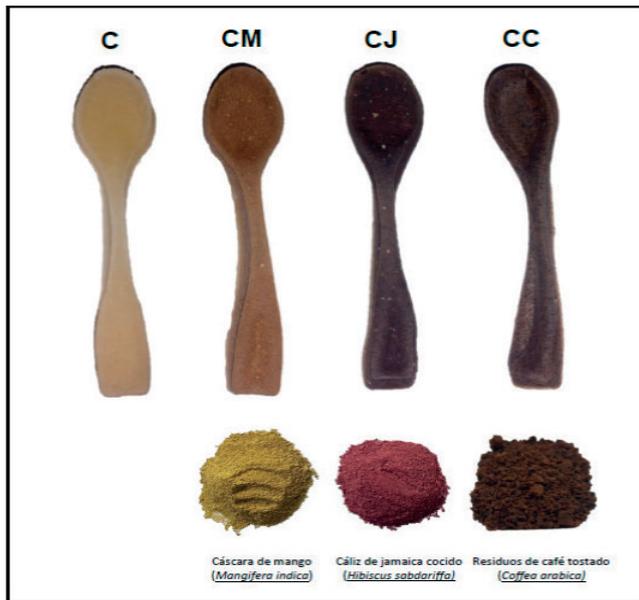
En el Instituto Tecnológico de Materiales y el Instituto de Investigación en Ingeniería de Alimentos para el Desarrollo, adscrito a la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), se realizó una práctica enfocada en el concepto de bioeconomía circular. El objetivo era añadir valor a los residuos de café provenientes de la industria de bebi-

das, desarrollando materiales sostenibles y rentables que pudieran ser utilizados en la industria alimentaria (López et al., 2021).

Dado el alto contenido de lípidos en la borra de café, se consideró su uso para mejorar la ductilidad de los materiales fabricados. Los materiales del estudio incluyeron polilactida (PLA), un biopoliéster derivado del almidón, y borra de café, que contiene oligómeros de ácido láctico (OLA) que ayudan a plastificar la matriz de biopoliéster. Los gránulos de PLA, OLA y borra fueron secados durante 48 horas en un deshumidificador para eliminar la humedad. Luego, el material se homogeneizó y se extruyó a una presión de 25 bares por minuto, después de lo cual se moldearon muestras a temperaturas de 185°C, 190°C y 200°C con un grosor de 4 mm (López et al., 2021).

Se realizaron diversas pruebas para caracterizar mecánicamente los materiales, incluyendo análisis térmico, termomecánico, pruebas de absorción de agua y biodesintegración. Según Terroba-Delicado et al. (2022), se concluyó que los residuos de café derivados de la industria licorera tienen un gran potencial para desarrollar compuestos verdes rentables.

**Figura 40.** Bioplásticos obtenidos por la adición de subproductos de mango, jamaica y café



**Fuente:** López et al. (2021).

Estos innovadores compuestos verdes presentan una resistencia a la tracción y ductilidad moderadas, estabilidad térmica, renovabilidad y bajo costo, ya que se basan en biomasa derivada de residuos alimentarios. Además, son biodegradables en instalaciones industriales de compostaje, lo que abre posibilidades para su uso en utensilios desechables como platos, bandejas, cubiertos, vasos y mezcladores. También se vislumbra un futuro prometedor para su aplicación en envoltorios de alimentos ecológicos (López et al., 2021).

- **Películas y recubrimientos biológicos**

Las películas o recubrimientos basados en materiales biológicos se están considerando como alternativas viables para reemplazar los materiales sintéticos en el envasado de alimentos. El uso de polímeros naturales como polisacáridos, proteínas y lípidos en estos recubrimientos ha sido investigado para mantener la frescura y textura de los alimentos. Estos polímeros naturales actúan como barreras semipermeables a vapores, gases y líquidos, y por lo tanto pueden ser utilizados en materiales de embalaje (Ballesteros et al., 2018).

- **Aplicación de borra de café en polímeros sintéticos**

El alcohol polivinílico (PVA) es un polímero sintético biodegradable y biocompatible, soluble en agua y con aplicaciones en envasado biomédico y alimentario. Varios estudios han reportado la inclusión de borra de café en compuestos de PVA, aprovechando sus propiedades absorbentes. Las partículas de borra también se pueden incorporar en diversas matrices poliméricas, como PP, PE, PU, PLA, epoxi y cauchos, para producir compuestos adecuados para envases de alimentos, piezas de automóviles, impresión 3D y protección UV. Además, la borra puede actuar como plastificante (Bomfim et al., 2022).

Ballesteros et al. (2018) destacan que la extracción de materiales funcionales de residuos agrícolas ha sido objeto de estudio reciente. En su publicación, se centra en los polisacáridos de la borra de café, como los galactomananos y arabinogalactanos, que se utilizan como estabilizadores y endurecedores en emulsiones. Estos polisacáridos también se emplean en la producción de películas comestibles para aplicaciones alimentarias, mejorando la calidad y seguridad de los productos. Aunque no se ha investigado ampliamente, el estudio de la combinación de extractos ricos en polisacáridos de borra de café con Carboximetilcelulosa CMC, un agente espesante y estabilizador, usado para fabricar películas muestra que estos polisacáridos mejoran o preservan las propiedades fisicoquímicas de las películas, lo cual ofrece características antioxidantes y antimicrobianas útiles para aplicaciones alimentarias.

En el estudio de Moustafa et al. (2017), se utilizó borra de café como agente de refuerzo para crear compuestos biodegradables de PBAT (tereftalato adipato de polibutileno) para envases alimentarios, demostrando una buena afinidad con PBAT sin necesidad de compatibilizadores. La borra mostró una excelente dispersión y compatibilidad con la matriz polimérica.

Los compuestos de polímeros sintéticos más comunes que incorporan borra de café son el polietileno (PE) y el polipropileno (PP), debido a sus amplias aplicaciones en envases y su bajo costo. El PE, en particular, se clasifica en varios tipos, siendo el polietileno de alta densidad (HDPE) y el de baja densidad (LDPE) los más utilizados. Gracias a su alta tenacidad, facilidad de procesamiento y resistencia química, el PE se emplea en tuberías, láminas, contenedores y otros productos similares, así como en aplicaciones biomédicas y espaciales (Bomfim et al., 2022).

Para finalizar, según Sierra (2022), entre las perspectivas de investigación en la producción y comercialización de Café Verde sobresalen:

**Mejoramiento genético y resistencia a plagas:** la investigación se centra en desarrollar variedades de café más resistentes a plagas y enfermedades, como la roya, y en mejorar sustancialmente la calidad del grano.

**Sostenibilidad y prácticas agrícolas:** se están explorando prácticas agrícolas sostenibles que minimicen el impacto ambiental, como la agroforestería y el uso eficiente y racional del agua.

**Tecnología y digitalización:** la adopción de tecnologías como *machine learning*, el Internet de las Cosas (IoT), *blockchain* y *big data* revolucionan conceptos como la trazabilidad, la eficiencia, eficacia, efectividad y transparencia de la cadena.

**Mercados y comercialización:** la investigación de mercados se enfoca en entender mejor aquellos denominados emergentes y las preferencias de los consumidores, así como en desarrollar con eficiencia estrategias de *marketing* digital.

**Agricultura y fertilizantes:** la borra de café se puede utilizar como fertilizante orgánico debido a su contenido de nutrientes, aportando a una mayor calidad del suelo.

**Producción de biocombustibles:** la borra de café puede ser convertida en biocombustibles, ofreciendo una fuente de energía renovable y reduciendo los residuos.

**Industria alimentaria:** se ha investigado el uso de la borra de café en la producción de alimentos como galletas, panes y bebidas fermentadas, aprovechando sus propiedades antioxidantes y su contenido de fibra.

**Cosméticos y productos de cuidado personal:** la borra de café se utiliza en la fabricación de exfoliantes y otros productos de cuidado personal debido a sus propiedades abrasivas y antioxidantes.

**Materiales de construcción:** investigaciones recientes han explorado el uso de la borra de café en la fabricación de materiales de construcción como ladrillos y paneles, debido a su capacidad para mejorar la resistencia y la durabilidad. Estas perspectivas y usos alternativos no solo promueven la sostenibilidad, sino que también abren nuevas oportunidades económicas para los productores y la industria relacionadas con café.

## CONCLUSIONES

Según Núñez (2024), de acuerdo con la información revisada sobre el cultivo del hongo *Pleurotus*, se ha determinado que, para obtener un desarrollo óptimo de sus nutrientes, la borra de café debe representar entre el 17% y el 55% del sustrato.

En el caso de los fertilizantes que contienen borra de café y han demostrado mejorar la coloración de las verduras, se recomienda no exceder el 5% de borra en la mezcla. En la industria panadera, donde se ha experimentado con la borra de café en la elaboración de pan integral, los paneles de degustación sugieren que el porcentaje ideal de borra es del 4%. Para los *muffins*, el nivel de aceptación más alto se ha observado con un 1% de borra de café en la receta.

A pesar de que la borra de café ha sido subestimada durante mucho tiempo, esta revisión muestra que posee un potencial significativo en múltiples áreas, incluyendo la industria alimentaria, la agricultura y la energía. Su riqueza en polisacáridos, lípidos, taninos y otros fitoquímicos le confieren diversas aplicaciones beneficiosas.

La reutilización de la borra de café no solo ayuda a disminuir la contaminación, sino que también apoya la sostenibilidad y la economía circular al convertir un residuo en un recurso valioso. No obstante, es crucial seguir investigando y desarrollando métodos efectivos para utilizar este subproducto de manera responsable y beneficiosa para distintas industrias y el ambiente. También, la valorización de residuos agríco-

las, como la borra de café, es fundamental para reducir el desperdicio y fomentar prácticas sostenibles. Este enfoque, además de beneficiar la industria alimentaria, manifiesta un impacto positivo en la conservación del ambiente y en la promoción de una economía circular y sostenible (Núñez, 2024).

La borra de café—o posos de café gastado— representa un recurso valioso que puede ser utilizado de manera más efectiva. Su contenido en antioxidantes, ácidos grasos y cafeína ofrece oportunidades para diversas aplicaciones industriales, incluyendo la formulación de productos alimentarios y de salud. Con el aumento en la demanda de café a nivel global, una gestión adecuada de los subproductos como la borra de café es esencial para reducir la contaminación y fomentar prácticas más ecológicas.

La investigación continua en esta área es fundamental para identificar y desarrollar aún más las aplicaciones potenciales de la borra de café, así como para comprender su valor nutricional y beneficios para la salud. Esto podría resultar en la creación de nuevos productos y fuentes de ingresos, al mismo tiempo que contribuye a una gestión más eficiente de los residuos y promueve la sostenibilidad en la industria del café. Es vital que las universidades en Colombia se interesen en explorar estos residuos y amplíen las investigaciones que beneficien al ambiente y generen conocimiento a partir de elementos que inicialmente parecen no tener uso. También es necesario difundir estos usos potenciales de la borra de café para comenzar a implementarlos en la industria colombiana. (Núñez, 2024)

## TENDENCIAS EN LA VIABILIDAD Y SOSTENIBILIDAD DE CSC: RETOS Y DESAFÍOS DESDE LA INDUSTRIA 5.0

Los retos y desafíos para la CSC se abordan desde el enfoque triple bottom line, es decir desde los factores económicos, sociales y ambientales. Desde esta premisa, procurar el bienestar integral del caficultor es función de la caficultura sostenible, según FNC (2017), significa definir un modelo de negocio próspero, enfocado en propuestas de valor que le generen estándares de alta calidad al caficultor. En las tablas 5 y 6 se relacionan los estudios claves en el encadenamiento de valor a manera de características promisorias, factores clave y variables dependientes e independientes. Por esta razón, es imperante el diseño de redes de cadena de suministro ecológicas en escenarios multiobjetivo para productos perecederos en entornos inciertos, que aplican a la industria del café, según Torabzadeh et al. (2022).

### **Planeación de escenarios de sostenibilidad para la cadena agroindustrial del café**

El diseño y la ejecución de estudios sobre planificación de escenarios, implementados por Schoemaker et al. (2013), también conocidos como escenarios

de sostenibilidad según Arias-Vargas et al. (2022), y desde una perspectiva múltiple con las contribuciones de Hassler et al. (2020), junto con el enfoque de planificación estratégica en escenarios inciertos para la cadena de café propuesto por Abele et al. (2017), permiten la predicción de eventos disruptivos, tal como lo señala Leufkens et al. (2022), adaptados a la planificación del suministro según Shavazipour et al. (2021). Así, la evaluación de escenarios de sostenibilidad, desarrollada por Leufkens et al. (2022), mejora la capacidad de toma de decisiones, como afirman Lima et al. (2015), por parte de los interesados en el mercado del café, identificados por Crawford (2019) y Crawford y Wright (2022). Esto proporciona una caracterización de las barreras, según Mendes y Luchine (2020), y los impulsores mencionados por Guimaraes et al. (2022), así como la dinámica del margen de precios en el mercado internacional según los estudios de Ghoshray Mohan (2021). Además, la óptima sostenibilidad en la CSC, a partir de los aportes de Wong et al. (2011), configura la incidencia en las políticas de compra-venta de café referidas por Proença et al. (2022).

### Características promisorias en la cadena de valor de café

**Tabla 5.** Determinación de características promisorias en la CSC

Proceso	Descripción	Referencia
Producción de café	Tecnologías agrícolas modernas, incorporación de técnicas novedosas.	Kittichotsawat et al. (2021) Dupas et al. (2022) Lerner et al. (2021) Kangile et al. (2021)
	Certificaciones de calidad, servicio, asistencia técnica y extensionismo agropecuario.	Wahyudi et al. (2020) Inouye y Kling (2020)
	Etiquetas ecológicas y éticas.	Chkanikova y Sroufe (2021) Minten et al. (2018) Akoyi et al. (2020); Mitiku et al. (2018)
	Tendencias e investigación en café verde.	Pinto et al. (2014) Hindsley et al. (2020) Gatti et al. (2022) Donovan et al. (2019) Pérez-Salazar et al. (2019) Diaz et al. (2017); Ribeiro et al. (2014) Ayyanathan y Kannammal (2014)



<p><b>Industrialización</b></p>	<p>Modelado y simulación: gestión de complejidades. Diseño para la minimización de energía. Poscosecha, sostenibilidad cervecera e industria del café.</p>	<p>Salimi y Salimi (2018) Renard (2022) Seow et al. (2016) Bilfield (2022) Rotta et al. (2021)</p>
<p><b>Comercialización y distribución, (mercado)</b></p>	<p>Conversión de agricultores en socios comerciales a través de proyectos de co-creación de valor, que involucra a pequeñas empresas intermediarias en la realización del suministro internacional sostenible de café.</p> <p>Tecnologías de digitalización emergentes en el transporte y la logística de mercancías: tendencias actuales y direcciones futuras - clúster logístico en emergencias. Elasticidad de precios de café y transmisión de precios en mercados endógenamente inestables.</p> <p>Aprovechamiento de subproductos, nuevos productos, biorresiduos y café genéticamente modificado</p> <p>Sensibilidad y riesgo crediticio y predicción de rendimientos.</p>	<p>Candelo et al. (2018) Arre et al. (2021) Weber y Wiek (2021) Starobin (2021) Haldar y Damodaran (2022) Guido et al. (2020) Servín-Juárez et al. (2021) Wang y Sarkis (2021)</p> <p>Huffaker et al. (2021) Keller et al. (2015) Kundu et al. (2022) Deina et al. (2022) Vochozka et al. (2022) Olafsdottir y Sverdrup (2019) la Scalia et al. (2021)</p> <p>Iriondo-DeHond et al. (2019)</p> <p>Ribeiro et al. (2014) Masino et al. (2022) Price (2021) Gayle y Lin (2022) Xia et al. (2022)</p> <p>Shukla y Naim (2018)</p> <p>Kouadio et al. (2021b)</p>

**Fuente:** elaboración propia.



## Toma de decisiones y variables intrínsecas y extrínsecas

**Tabla 6.** Factores para la toma de decisiones y variables dependientes e independientes

Aspecto	Descripción	Referencia
<b>Supply chain con enfoque agroindustrial</b>	Transporte: modelo MILP y planificación de viajes de camiones cisterna posicionados dinámicamente con tiempo de viaje variable.	De Assis Camponogara (2016) Stavroulakis et al. (2021) Shemer et al. (2022) Robles et al. (2020)
	Optimización del diseño de redes de cadena de suministro: hidrógeno.	Kamargianni et al. (2022) Melkonyan et al. (2020) Flammini et al (2020)
	Cadena de suministro en biocombustibles.	Chávez et al. (2018)
	Pruebas de estrés de precios en el petróleo.	Lei et al. (2023)
	Capacidades dinámicas en el sector hotelero.	Hussain and Malik (2022)
<b>Cadena de suministro de biorrefinerías a base de café.</b>	Cadena de suministro de biorrefinerías a base de café.	Aristizábal-Marulanda et al. (2022) Depetris Chauvin et al. (2017)
	Cadenas de suministro agropecuarias.	Trujillo-Díaz and Bolivar (2017) Kumar y Sharma (2021)
<b>Cadena de suministro del café o CSC</b>	Análisis logístico de costos de la cadena de valor del café.	Bashiri et al. (2021b) Ramírez et al. (2019) Llanos et al. (2022) Aprilia et al. (2022) Shanker et al. (2022a) Bettín-Díaz et al. (2022)
	Desigualdad creciente en la cadena de valor global del café: evaluación de redes complejas.	Torabzadeh et al. (2022) Utrilla-Catalan et al. (2022)
	Trazabilidad para la sostenibilidad.	Tharatipyakul et al. (2022b)
	Características de calidad del producto, enfoque de cocreación.	León-Bravo et al. (2022) Wilson et al. (2013)  Horvat et al. (2015) Umaran et al. (2022)

<p><b>Escenarios de sostenibilidad</b></p>	<p>Evaluación de la sostenibilidad con modelo de simulación numérica transdisciplinar para planificación de sistemas de energía flotantevoltáica: externalidades tecnoeconómicas y tecnoambientales. Escenarios futuros en bioenergía y bioeconomía circular.</p> <p>Modelado de simulación para la planificación de escenarios para evaluar el beneficio de IVHM en la construcción de buques navales. Escenarios centrados en innovación.</p> <p>Marco para diseñar una simulación de entrenamiento de gestión de eventos (EMTS). Propuesta de cadenas de suministro libres de deforestación - UE.</p>	<p>Prinsloo et al. (2021)</p> <p>Contreras-Medina et al. (2020) Köhler et al. (2022)</p> <p>Kuzmina et al. (2019) Sekabira et al. (2022b) Ibn-Mohammed et al. (2021) Daou et al. (2020) Garcia-Freites et al. (2020) Lagраста et al. (2021)</p> <p>Mayson y Williams (2021)</p> <p>Jiang et al. (2017)</p> <p>Von der Gracht Stillings (2013) Costa (2020) Fotiadis y Sigala (2015) Zhunusova et al. (2022)</p>
<p><b>Toma de decisiones estratégicas</b></p>	<p>Integración de datos de consumo-demanda inciertos.</p> <p>Comercio justo o fair trade.</p> <p>Turismo cafetero.</p>	<p>Bin Li et al. (2018) Carr et al. (2022)</p> <p>Ut-tha et al. (2021)</p> <p>Chen et al. (2023) Torga y Spers (2020) Malek et al. (2022a, 2022b) Miglietta et al. (2022)</p> <p>Durevall (2020) Ribeiro-Duthie et al. (2021) Bhavsar et al (2021) Podhorsky (2015) Candelo et al. (2019) Vu et al. (2022)</p>
<p><b>Toma de decisiones tácticas</b></p>	<p>Descripción probabilística del movimiento de stock.</p> <p>Decrecimiento de la agricultura alternativa. Sistema de soporte de decisiones basado en “modelo de agente” para la programación de la producción de valor agregado.</p>	<p>Troyanovskyi Aung (2015) Flachs (2022) Meinke (2019) Pérez-Salazar et al. (2019) Pérez et al. (2017)</p>



<p><b>Toma de decisiones operativas</b></p>	<p>Marco para la toma de decisiones.</p> <p>Estándares voluntarios de sostenibilidad (VSS)</p>	<p>Kumar y Sharma (2021) Lachman et al (2022) Nolasco, Squillante, Velotto, et al. (2022) Grabs et al. (2016) (Piao et al., 2019)</p>
<p><b>Variables tecnológicas</b></p>	<p>Big data: redes de sensores inalámbricos, computación en la nube, internet de las cosas (IoT), procesamiento de imágenes multispectrales, redes neuronales convolucionales (CNN) y sensores remotos.</p> <p>Blockchain para el mejoramiento de la CSC.</p> <p>Análisis de escenarios basado en Delphi. Transformación biológica de la fabricación industrial: tecnologías, Estado y escenarios para un futuro sostenible de la industria manufacturera alemana.</p> <p>Ingeniería de sistemas, drones para transporte de paquetes y pasajeros.</p>	<p>Kittichotsatsawat et al. (2021) Jaber et al. (2022) Mihailova et al. (2022) Feige y Vonortas (2017) Mishra et al. (2022)</p> <p>Abebe y Semegn (2021) Gligor et al. (2022) Ravi et al. (2022) Dionysis et al. (2022) Trollman et al. (2022) Kshetri (2018) Bai et al. (2021) Sunmola et al. (2021) Köhler et al. (2022) Culot et al. (2020)</p> <p>Bager et al. (2022) Kamilaris et al. (2021)</p> <p>Miehe et al. (2020) Peppel et al. (2022) Schlecht et al. (2021) Keller et al. (2015)</p> <p>Baratsas et al. (2021) Kellermann et al. (2020)</p>

**Fuente:** elaboración propia.

### Desarrollo tecnológico, *machine learning* e IA: resultados en VOS-viewer

A raíz de la pandemia por Covid-19, se ha desarrollado en el mundo una expansión de la digitalización que ha impactado el desarrollo sostenible de micro y pequeñas empresas (Bai et al., 2021), con consecuencias y decisiones directas en la cadena de suministro (Sharma et al., 2020). Dado que la «nueva normalidad» ha traído consigo una mayor flexibilidad, integración y agilidad organizacional en la cadena de suministro (Ramos et al., 2021). Por ende, es fundamental la identificación de factores críticos de éxito y los riesgos asociados con la logística de terceros (Shanker



et al., 2022) en la gestión de la cadena de suministro, como también el repunte empresarial por un mayor control de inventarios (Riezebos y Zhu, 2020).

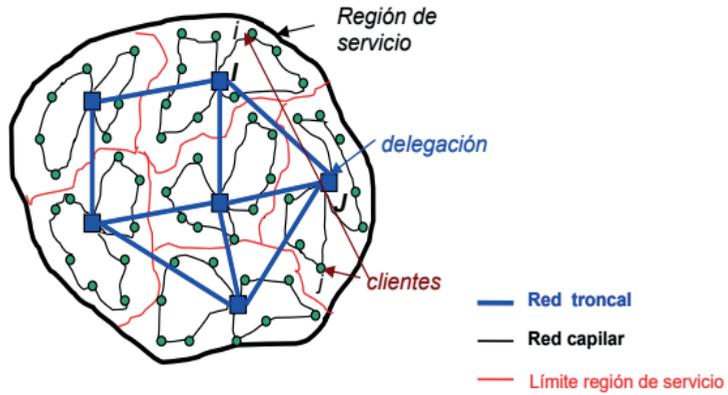
## Métodos y técnicas

En los métodos y técnicas analizados se abordan en la CSC los indicadores cuantitativos de gestión, el ICRC, logística, trazabilidad, evaluación y sostenibilidad social y ambiental, desde la consulta de estudios previos sobre modelado y simulación matemática, los sistemas de información y bases de datos existentes sobre producción y mercado de CSC. Luego se plantea el análisis del contexto cafetero en el mundo, eficiencia del sistema alimentario, resiliencia, gobernanza y estrategias para la inclusión de las familias rurales en las fincas cafeteras, el rol de la mujer campesina, los planes estratégicos de CTI para la CSC, el abordaje de la gobernanza, resiliencia y equidad de género y, por último, la articulación universidad-empresa-Estado-sociedad para contrastar el aseguramiento, fomento y consolidación de asociaciones, cooperativas e instituciones de índole público y privado que hacen parte directa de la CSC.

Se encontró en la literatura que la técnica más utilizada es la encuesta semiestructurada para valorar los niveles de transformación digital en la CSC, en ese sentido, en primer lugar, se realizaron diseños instrumentos de investigación tipo encuesta en un aplicativo web que son diligenciadas por *stakeholders*, por funcionarios regionales, sector gubernamental y productivo, y su posterior validación; luego se consultó a expertos del sector cafetero y representantes de la comunidad (incluyendo mujeres rurales cafeteras) que comprenden las temáticas socioeconómicas y ambientales. Y, por último, se aplican en los estudios detectados técnicas multicriterio para la refinación de la encuesta en aras de mejorar la calidad de esta.

En sentido de lo anterior, la normativa y la regulación gubernamental será determinante en el viraje de la CSC, dado que a través del Decreto 2828 (2006) y los Conpes 3439 (2006) y 3568 (2008), se ha promovido el aumento de productividad y competitividad de Colombia al evaluar las condiciones y capacidades logísticas y de transporte para que lleguen a ser ejes centrales en la integración de cadenas de abastecimiento. En la figura 41 se presenta un ejemplo de red de transporte empresarial que sería posiblemente adaptativa para la CSC a nivel regional.

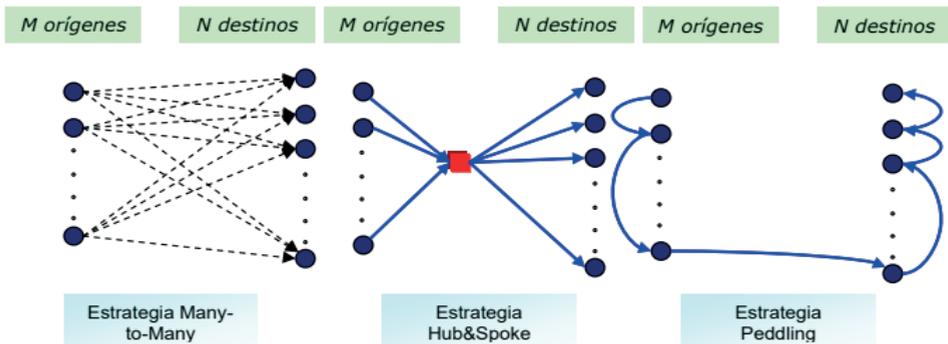
**Figura 41.** Ejemplo de red de transporte empresarial adaptada para la CSC



**Fuente:** Estrada (2007).

A su vez, para el Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación (2023), la logística y el diseño de las cadenas de abastecimiento, para mayor especificidad, serán áreas de investigación crucial para la cooperación interinstitucional, como se afirmó en el Conpes 3582 y en la Política Nacional de Ciencia CTI (2008). Hecha esta salvedad, según Estrada (2007), estos sistemas de distribución son clave y parte del desarrollo de estrategias básicas para la CSC cuya combinación permite planificar este sistema así: *many-to-many*, *Hub&Spoke* y *Peddling* como se observa en la figura 42, a condición de que se cumpla con este tipo de atributos en los niveles de decisión nacional y regional.

**Figura 42.** Estrategias combinadas para la planificación del sistema de distribución

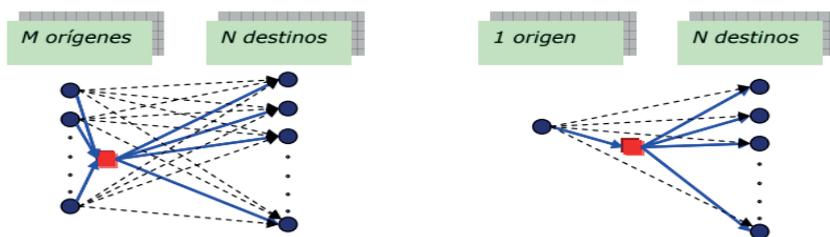


**Fuente:** Estrada (2007).



También para las redes de distribución (figura 43) se presenta la descomposición del problema analítico de envíos directos o envíos mediante una terminal de consolidación de  $M$  orígenes a  $N$  destinos, que ha estimulado en simultáneo los mecanismos de acción y que se han llevado a completitud con cobertura poblacional en esta propuesta; en la figura 43 se observa las configuraciones mejoradas para un sistema *one-to-many*, a partir de Daganzo (1988) en Estrada (2007). Estos aspectos serían considerados para el análisis de entornos de la CSC, en los últimos años conforme a la información recolectada en la OIC.

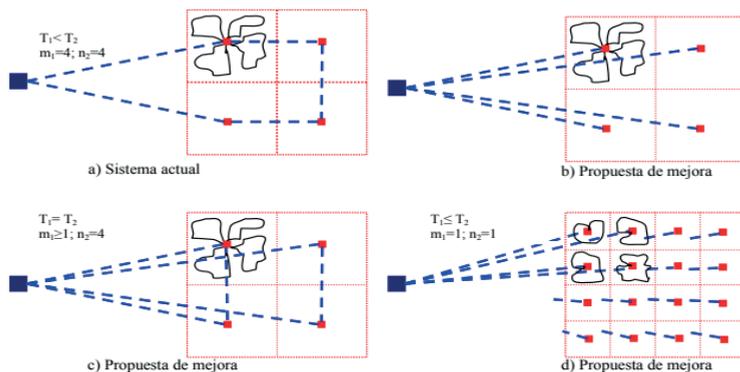
**Figura 43.** Descomposición del problema analítico de envíos directos o envíos mediante una terminal de consolidación de  $M$  orígenes a  $N$  destinos



**Fuente:** Estrada (2007).

Acorde con Estrada (2007), la configuración de la red de transporte condiciona los costes de distribución en la CSC, así como la planificación y organización temporal de los productos al mercado. Dado lo anterior se podrían presentar configuraciones mejoradas para la CSC en escenarios de sostenibilidad a partir del análisis de estas reconfiguraciones.

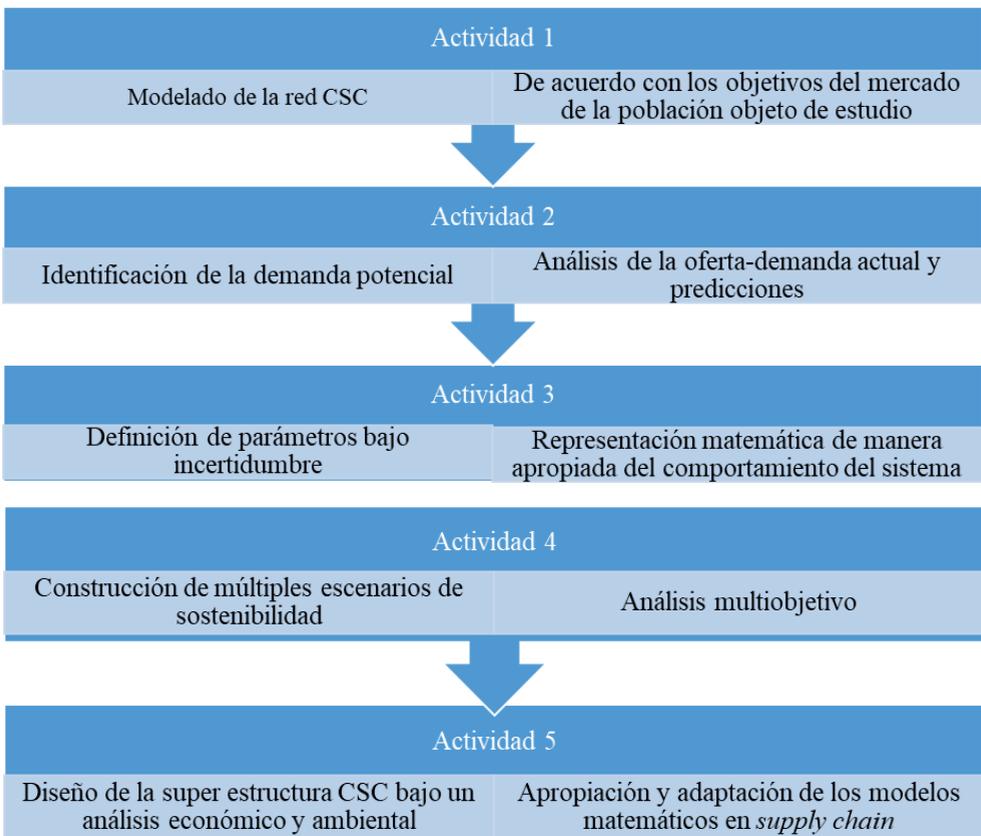
**Figura 44.** Configuraciones mejoradas para un sistema *one-to-many*



**Fuente:** Daganzo (1988) y Estrada (2007).

Por lo tanto, según Estrada (2007), se pueden presentar mejoras en la red distribución que se traslapen a la CSC. De acuerdo con las partes b y c (figura 43), se reproducen dos casos particulares de mejoras del sistema de distribución que pueden darse cambiando el intervalo de reparto, las paradas en delegaciones y las rutas de reparto local. La segunda mejora (c) detalla el caso en que se puede establecer  $T1=T2$ , mientras que en la primera (b)  $T1$  no se puede incrementar sin cambiar ninguna variable de la distribución local. A continuación, en la figura 45, se presenta un esquema de un desarrollo metodológico global con base en los documentos analizados.

**Figura 45.** Procedimiento y métodos para el diseño de una superestructura



**Fuente:** elaboración propia.

A nivel de Colombia, se analizaron los lineamientos de TerriData, que es el sistema de estadísticas territoriales del Departamento Nacional de Planeación (DNP, 2018), en el cual se establecen indicadores estandarizados para caracterización de entidades



territoriales detallados en la tabla 7. Entre estos criterios de selección de información para las escalas de medición sobresalen: facilidad de recolección, posibilidad de verificación de la información recolectada, identificación de la fuente, trazabilidad de datos recolectados, posibilidad de actualización de estos datos respecto al tiempo, formato de datos recolectados, uso, funcionalidad y facilidad de almacenamiento de los datos, entre otros.

**Tabla 7.** Factores establecidos por el DNP para el diagnóstico de la zona de producción

Dimensión	Indicadores e información relevante
<b>Demografía y población</b>	Aquí se encuentran indicadores que permiten conocer la estructura poblacional, en número y porcentaje, población desagregada por sexo, área y etnia, también la dinámica poblacional, superficie, población, densidad poblacional, pirámide poblacional, puntajes Sistema de Identificación de Potenciales Beneficiarios de Programas Sociales (Sisben), resguardos indígenas.
<b>Economía</b>	En esta dimensión se encuentra información para conocer los aspectos tradicionales, como el producto interno bruto (PIB), PIB per cápita, PIB por grandes ramas de actividad económica, porcentaje de contribución con el PIB nacional, innovación, principales actividades económicas: actividades económicas tradicionales del sector primario y secundario, además del sector terciario, que, a su vez, cuentan con el índice de capacidad de generación y apropiación de conocimiento e innovación de los departamentos en Colombia, indicador que expone las brechas en el territorio a partir de valor agregado, ramas de la actividad económica, Unidades de Producción agropecuaria (UPA): cultivos transitorios y cultivos permanentes como el café.
<b>Ambiente</b>	Contiene una amplia variedad de indicadores, desde el conteo de biodiversidad y recursos naturales, tales como humedales, páramos, bosques secos tropicales, hasta variables como inversiones por concepto de gastos relacionado con el manejo de desastres del municipio, permitiendo realizar un acercamiento en capacidad y riesgos ambientales. Los indicadores son: ecosistemas estratégicos, Sistema Nacional de Áreas Protegidas (Sinap), gestión del riesgo, inversión anual en gestión del riesgo.
<b>Vivienda y servicios públicos</b>	Cobertura de servicios públicos (cobertura de agua, acueducto, alcantarillado, energía eléctrica rural, internet, la penetración de banda ancha, etc.), Necesidades básicas insatisfechas (NBI): déficit cuantitativo y cualitativo. Estos datos se aproximan a las condiciones de calidad de vida del territorio.

<p><b>Educación</b></p>	<p>Cobertura de educación neta y bruta a nivel preescolar, básica primaria, secundaria, media, pruebas estatales de educación (pruebas saber 3, 5, 9 11 y Saber Pro). Estos son indicadores importantes para conocer el grado de escolarización de cada entidad territorial.</p>
<p><b>Salud</b></p>	<p>Esta dimensión, compuesta por los indicadores de aseguramiento al sistema de salud, la medición de tasa de fecundidad, tasa de mortalidad y la morbilidad de las personas y a nivel infantil, también está formada por indicadores que hacen parte de su intervención en temas de vacunación y atención a la población. Estos indicadores permiten realizar análisis en términos de una transición epidemiológica.</p>
<p><b>Finanzas públicas</b></p>	<p>Es una de las dimensiones que tiene un importante número de indicadores, todos con énfasis en el presupuesto, su distribución y el gasto general del ente territorial; adicionalmente, se incluyen indicadores que reflejan el desempeño fiscal. Los indicadores son: ingresos corrientes, ingresos tributarios, ingresos totales, ingresos no tributarios, gastos totales, ingresos por impuesto predial, gastos de funcionamiento, Sistema General de Regalías (SGR), asignación presupuestal, número y valor de los proyectos, Índice de Gestión de Proyectos de Regalías (IGP) y el Sistema General de Participaciones (SGP). Todos los indicadores están disponibles a precios corrientes (estos son precios para cada año y con su respectiva inflación).</p>
<p><b>Medición del desempeño</b></p>	<p>La Medición de Desempeño Municipal (MDM) es una medición anual del DNP para incentivar una mejor gestión territorial. En ella se encuentran todos los indicadores relacionados con la última medición y las comparaciones con los grupos de capacidades iniciales y con el promedio nacional. Componente de gestión, grupo de capacidades iniciales, componentes de la medición.</p> <p>La MDM cuenta con dos componentes: gestión y resultados, cada uno de los componentes tiene su propia valoración que se consolida en el resultado total.</p>
<p><b>Percepción ciudadana</b></p>	<p>Información recogida por medio de las encuestas de percepción ciudadana de las 11 ciudades que cuentan con el programa «Cómo vamos». Los indicadores son: Percepción de la seguridad, Satisfacción con el servicio de salud y Hábitat urbana. Estas encuestas se aplican anualmente y recopilan información sobre la percepción que tienen los ciudadanos sobre diversos temas de la ciudad.</p>
<p><b>Convivencia y seguridad ciudadana</b></p>	<p>Esta dimensión muestra indicadores que dan cuenta del número de víctimas del conflicto armado en Colombia. Se presentan aquellos datos relacionados con algunos de los hechos victimizantes definidos en la ley 1448 de 2011. Asimismo, se visualizan datos sobre seguridad ciudadana como la tasa de homicidios, tasa de hurtos y la violencia intrafamiliar, entre otros.</p>



<b>Seguridad integral marítima y fluvial</b>	Es una dimensión que involucra las actividades marítimas y fluviales dentro del territorio.
<b>Objetivos de desarrollo Sostenible: ODS y género</b>	La mayoría de estos indicadores tienen una forma transversal de analizarse, tal es el caso del enfoque de género de los indicadores y la medición de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).
<b>Pobreza</b>	La medición de la pobreza es uno de los indicadores clave sobre el desarrollo. Varios indicadores compuestos hacen parte de esta dimensión: la incidencia de la pobreza monetaria, el Índice de Pobreza Multidimensional (IPM) y el índice GINI.
<b>Ordenamiento territorial</b>	Corresponde a información relevante de uso del suelo medida en hectáreas; también cuenta con variables de resguardos indígenas, reservas campesinas y variables de tipo catastral. Se aborda los tipos de conflicto en el uso del suelo: figuras del ordenamiento social de la propiedad rural, instrumentos de ordenamiento territorial, la normativa de ordenamiento territorial en Colombia; sobreutilización: de tipo minero, obras civiles y urbanas, subutilización, otros conflictos. También figuras del ordenamiento social de la propiedad rural e instrumentos de ordenamiento territorial.

**Fuente:** TerriData - DNP (2019).

En la siguiente tabla 8 se observan las variables que mide el ICRC, según la FNC (2008), de acuerdo con los pilares que componen el índice.

**Tabla 8.** Variables establecidas por la FNC para la construcción del ICRC

<b>Pilar</b>	<b>Variables establecidas para el ICRC</b>
<b>Recursos naturales</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Área agrícola como proporción del área departamental</li> <li>• Área cultivada en café como proporción de área agrícola</li> <li>• Contaminación de los ríos con basuras</li> <li>• Área forestal como proporción de área departamental</li> </ul>

<p><b>Infraestructura/localización</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Precio interno base de compra</li> <li>• Fletes asociados al transporte del café hasta el puerto</li> <li>• Distancia de la capital al puerto marítimo</li> <li>• Estado de la red terciaria en municipios cafeteros</li> <li>• Densidad de vías terciarias y secundarias en los departamentos</li> <li>• Estado de la red terciaria en municipios cafeteros</li> </ul>
<p><b>Mercado laboral</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Índice de disponibilidad laboral cafetero como proporción de oferta sobre demanda laboral en municipios cafeteros</li> <li>• Valor de jornal en las zonas rurales</li> <li>• Migrantes como proporción de inmigrantes</li> </ul>
<p><b>Condiciones de vida</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hogares cafeteros con pisos de tierra (%)</li> <li>• Hogares cafeteros sin servicio sanitario (%)</li> <li>• Hogares cafeteros sin bienes durables (%)</li> <li>• Alfabetismo en familias cafeteras (%)</li> <li>• Caficultores sin alguna educación (%)</li> <li>• Hogares con paredes en material adecuado (ladrillo o piedra) (%)</li> <li>• Persona por cuarto en hogares cafeteros</li> <li>• Hogares con suministro de agua toda la semana (%)</li> <li>• Hogares sin afiliación al sistema de seguridad social (%)</li> </ul>
<p><b>Tecnología</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proporción de área cultiva con criterios técnicos óptimos</li> <li>• Densidad de árboles en cultivos tecnificados</li> <li>• Proporción de área cultivada con variedad Colombia</li> <li>• Área en café promedio técnico del servicio de extensión</li> </ul>
<p><b>Calidad y diferenciación</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Volumen de cafés especiales como proporción de área cafetera</li> <li>• Porcentaje de infestación de broca</li> <li>• Factor de rendimiento del café en sacos de 60 kg</li> <li>• Sobreprecio promedio para los cafés especiales</li> <li>• Áreas certificadas como proporción del área en café</li> </ul>



<b>Desempeño económico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PIB agropecuario como proporción del PIB agropecuario nacional</li> <li>• PIB per cápita agropecuario</li> <li>• PIB departamental como proporción del PIB nacional</li> <li>• PIB per cápita</li> <li>• Índice de transparencia del gobierno departamental</li> <li>• Tasa de crecimiento del PIB total</li> <li>• Tasa de crecimiento del PIB agropecuario</li> <li>• Indicador de desempeño fiscal departamental</li> </ul>
<b>Condiciones de seguridad</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tasa acciones subversivas contra la policía</li> <li>• Tasa de secuestro (extorsivo y simple)</li> <li>• Tasa de desplazamiento forzado</li> <li>• Tasa de extorsión</li> <li>• Tasa de atentados terroristas</li> <li>• Tasa de homicidios</li> </ul>
<b>Institucionalidad cafetera</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Patrimonio por asociado</li> <li>• Aportes en cooperativas de caficultores por asociado</li> <li>• Proporción de asociados por caficultor</li> <li>• Comités municipales de cafeteros como proporción de los municipios cafeteros</li> <li>• Porcentaje de la cosecha departamental comprada por las cooperativas</li> <li>• Participación del comité de cafeteros en las cooperativas</li> <li>• Proporción de caficultores con cédula o tarjeta inteligente</li> </ul>

**Fuente:** FNC (2008).

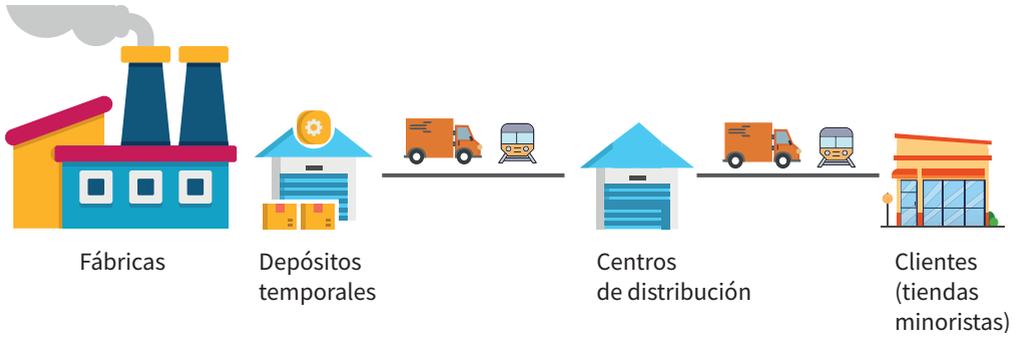
### **Actividad de identificación de la demanda potencial**

El análisis de la red de distribución y de suministro de la CSC se realizó bajo el método deductivo, de forma global y luego se aplicó a una zona de georreferenciación particular en el contexto del café como se aprecia en la figura 46. Por ejemplo, en Colombia en los departamentos de Antioquia y Tolima, dado que existen diversos problemas logísticos que observados desde organismos como OCDE o The World Bank (2015)



y The World Economic Forum (2015), especifican los retos de estas redes a futuro en las regiones y el microterritorio.

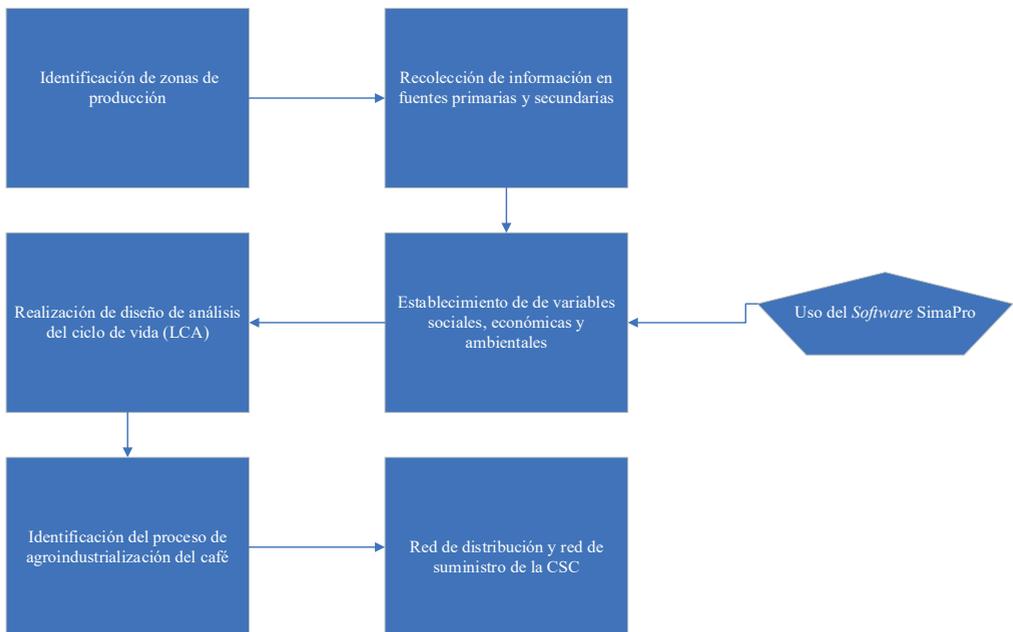
**Figura 46.** La estructura de la red de la CSC en una empresa de Irán



**Fuente:** Torabzadeh et al. (2022).

Estas configuraciones serán abordadas en el diagnóstico y evaluación de las particularidades de la CSC. A continuación, en la figura 47 se detalla el procedimiento metodológico global.

**Figura 47.** Procedimiento metodológico global



**Fuente:** elaboración propia.



Acorde con la figura 47, para la red de suministro se determinaron los flujos de los productos a base de café, derivados y subproductos, incluyendo la recolección de información en fuentes primarias y secundarias, para lo cual se realizó el análisis de la siguiente información:

- **Identificación de productos a base de café, derivados y subproductos:** con base en las actividades económicas relevantes como cultivos, agroindustrias reconocidas previamente y la información clasificada en las actividades anteriores serán identificados los residuos y subproductos potenciales para el aprovechamiento y una mayor sostenibilidad con posible efecto en la disminución de contaminación ambiental derivadas de estas prácticas sociolaborales.
- **Estimación de las tendencias de mercado en la red de suministro:** al tener establecida la disponibilidad de los productos a base de café, derivados y subproductos, se analizaron las tendencias del mercado de la red de abastecimiento con base en las temporadas de cosecha y rotación de cultivos. Para los subproductos de la agroindustria del café, se consideraron aspectos como volúmenes de producción y rendimientos, entre otros asociados a las plantas de producción y agroindustrias detectadas.
- **Identificación de los medios y costos de transporte:** considerando las características de los productos a base de café, derivados y subproductos, como también las fuentes de abastecimiento para la agroindustria, se determinó la logística necesaria para el transporte que incluye aspectos como medios, tipos de transporte y los costos por kilómetro recorrido para el transporte de la materia prima y del producto terminado.
- **Identificación del impacto ambiental:** se establecieron los impactos ambientales asociados a la producción y obtención de los productos a base de café, derivados y subproductos, así como los impactos generados por el tipo de vehículos usado para el transporte de este. De esta manera serán identificados los factores ambientales relacionados con la red de abastecimiento, por ejemplo, huella de carbono y huella hídrica, entre otros factores y autores que han contribuido a abordarlo en sus investigaciones tales como, Abebe y Semegn (2021); Noponen et al. (2012)
- **Identificación de impactos sociales:** se consideraron para esta actividad los medios de transporte, fuentes de abastecimiento y tipos de materia prima, relacionados con indicadores sociales como son la equidad de género, resiliencia, número de empleos generados y seguridad alimentaria y nutricional desde lo descrito por diversos autores (Arias-Vargas et al., 2022; Clavijo-Buritica et al., 2022; Hussain y Malik, 2022; Lawrence et al., 2019 y Shaw et al., 2019) como se refleja en la figura 47.

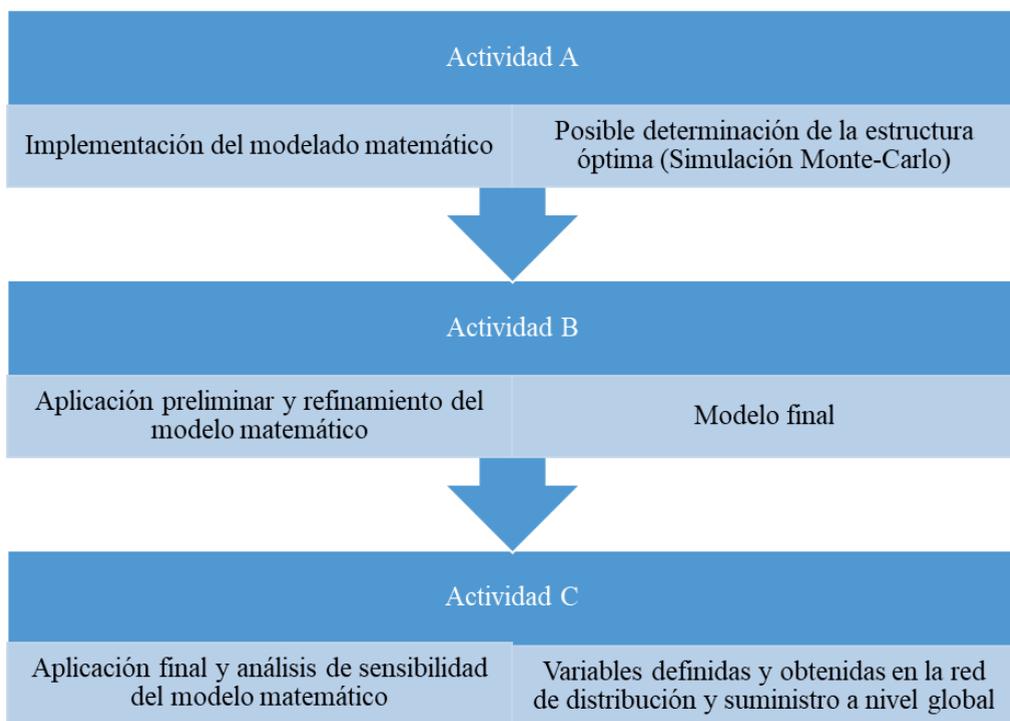
Posterior a esto, se analizó la aplicabilidad de los indicadores de impacto social descritos por Kolk, 2012; T. N. Nguyen y Mai (2015); Quiñones-Ruiz (2021) y Raford, 2015), entre otros. De la figura 47 se obtendrá un diseño genérico de cadena de abastecimiento con actores, redes de abastecimiento y distribución, pero también los procesos productivos para productos a base de café, derivados y subproductos dentro de un contexto regional.

A nivel cuantitativo, de acuerdo con información recopilada, se están realizando avances en relación con la programación matemática que incluye aspectos que propicien el cierre de la brecha entre producción, finanzas y el análisis del riesgo en optimización de la CSC. Soportados en una revisión de la literatura sobre los modelos integrados para decisiones estratégicas en SC expresados por Duarte et al. (2016) y Duarte et al. (2014), entre otros, la formulación financiera, el modelo de presupuesto, la función objetivo, el diseño y formulación de planificación, las restricciones, la ubicación, capacidad e instalaciones, el estudio de integración entre modelos planteados y desarrollados por Estrada (2017) y Torabzadeh et al. (2022), entre otros.

### **Actividad de definición de parámetros bajo incertidumbre**

A continuación, en la figura 48 se establece el procedimiento y métodos para ahondar en los detalles de la estructura de gestión, organizativa y logística de la CSC al buscar una mayor eficacia y nivel tecnológico; que estudie el intercambio de información efectiva y, todo ello sumado a una mayor coordinación en las redes de distribución, suministro y de las actividades presentes en los diferentes eslabones de la cadena.

**Figura 48.** Procedimiento y métodos para el desarrollo del modelado matemático de la CSC



**Fuente:** elaboración propia.

### Actividad de construcción de múltiples escenarios de sostenibilidad

En consecuencia, para la definición y evaluación del modelado matemático que describe la red de distribución, se analizaron las ecuaciones basadas en cantidad y volumen de café que se produce para ser distribuido en la red. Para ello se incluyeron factores como la demanda de producto, medios de transporte y logística de distribución, puntos de venta, cafeterías, entre otros factores (tabla 9).

**Tabla 9.** Aspectos para considerar en el desarrollo del modelado matemático de la CSC

Eslabón de la cadena	Aspectos para considerar
<p><b>Red de abastecimiento</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caracterización socioeconómica de la zona de producción regional</li> <li>• Incidencia de suelos y aguas para el café</li> <li>• Disponibilidad y cantidad total de subproductos agroindustriales de café</li> <li>• Localización y ubicación de café, residuos y subproductos agroindustriales</li> <li>• Datos de los procesos productivos de café, generadores de residuos agroindustriales</li> <li>• Estructura de formas y costos para el transporte de materias primas</li> <li>• Necesidad de almacenamiento en inventario, o tratamiento previo</li> <li>• Cantidad y ubicación de los insumos para los procesos productivos</li> <li>• Correlación entre capacidad de producción y cantidad de productos de café disponibles</li> <li>• Necesidad o no de almacenamiento en inventarios de materia prima</li> <li>• Periodo de tiempo de evaluación de la red de abastecimiento</li> <li>• Disponibilidad geográfica de materias primas</li> <li>• Datos agronómicos de los cultivos de café de los cuales se obtienen los residuos o subproductos</li> <li>• Indicadores económicos, sociales y ambientales relacionados con la red de abastecimiento</li> <li>• Otros</li> </ul>



<p><b>Procesos productivos</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trazabilidad y gestión de calidad</li> <li>• Número de plantas agroindustriales</li> <li>• Demanda de productos a base de café y derivados</li> <li>• Rendimiento del producto y derivados</li> <li>• Ubicación de centros de acopio y transformación</li> <li>• Costos de operación</li> <li>• Inversión de capital</li> <li>• Capacidad de producción agroindustrial del café</li> <li>• Periodo de tiempo de operación de las plantas</li> <li>• Parámetros de operación de los procesos de producción de productos a base de café y derivados</li> <li>• Lista de equipos e incorporación de tecnología</li> <li>• Nivel de automatización y simulación de procesos productivos</li> <li>• Correlación entre materia prima disponible y capacidad de producción en planta agroindustrial</li> <li>• Indicadores de productividad económica, social y ambiental relacionadas con la agroindustrialización</li> <li>• Otros</li> </ul>
<p><b>Red de distribución</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transporte de los tipos de producto a base de café, derivados y subproductos</li> <li>• Demanda de los tipos de productos de café, derivados y subproductos</li> <li>• Tendencias y patrones de consumo de los productos de café y derivados</li> <li>• Tamaño del mercado nacional e internacional</li> <li>• Cobertura geográfica en la distribución del producto</li> <li>• Cantidad de producto generado desde las plantas de producción agroindustrial hasta los sitios de distribución</li> <li>• Necesidad o no de almacenamientos de inventarios a nivel intermedio</li> <li>• Periodos de tiempo de evaluación de la red de distribución</li> <li>• Costos de distribución</li> <li>• Normatividad, leyes y regulaciones nacional e internacionales</li> <li>• Indicadores ambientales, económicos y sociales relacionados con la red de distribución</li> <li>• Otros</li> </ul>

**Fuente:** elaboración propia.



## Actividad de construcción de múltiples escenarios de sostenibilidad

En la primera parte del diseño metodológico de los estudios encontrados en la literatura científica, se ha proporcionado los insumos e información necesaria para el planteamiento de las restricciones que definen el flujo de café desde las fuentes de origen hasta el proceso de agroindustrialización, mediante el aseguramiento de los suministros necesarios de ubicación, cantidad, volumen y factores relevantes en la capacidad del proceso productivo. Las restricciones de abastecimiento consideraron las variables continuas y enteras en ecuaciones incluidas en el modelado matemático. Para la formulación de las ecuaciones y modelos descritos y debatidos por diversos autores como Bröckel et al. (2007); Wang (2021); Estrada, (2017) y Torabzadeh et al. (2022), se determinaron los factores relacionados de manera particular con cada uno de ellos.

La construcción de múltiples escenarios de sostenibilidad debe tener en cuenta el análisis de la agilidad, de la transformación digital, y del grado de penetración o de aplicabilidad de la IA en la CSC. Por ejemplo, las redes neuronales y su utilización en diversas investigaciones desarrolladas por Toorajipour *et al* (2021) en relación con la logística, el marketing y productividad, donde presenta las siguientes Técnicas de IA:

- Redes neuronales artificiales o ANN
- Lógica difusa FL y modelado
- Sistemas multiagente y basados en agentes
- Algoritmo genético
- Formas generales de IA
- Minería de datos
- Razonamiento basado en casos
- Inteligencia de enjambre
- Máquinas de vectores de soporte
- Recocido simulado
- Planificación automatizada
- Árboles de decisión
- Regla de asociación
- Modelos basados en árboles
- Sistemas expertos
- Heurística
- Programación de robots
- Simulación estocástica

Igualmente, a la luz de la teoría y aplicaciones de la IA en la SCM, Hokey Min (2009) expresa que se debe continuar el trabajo desde subcampos entre estos ANN, teoría

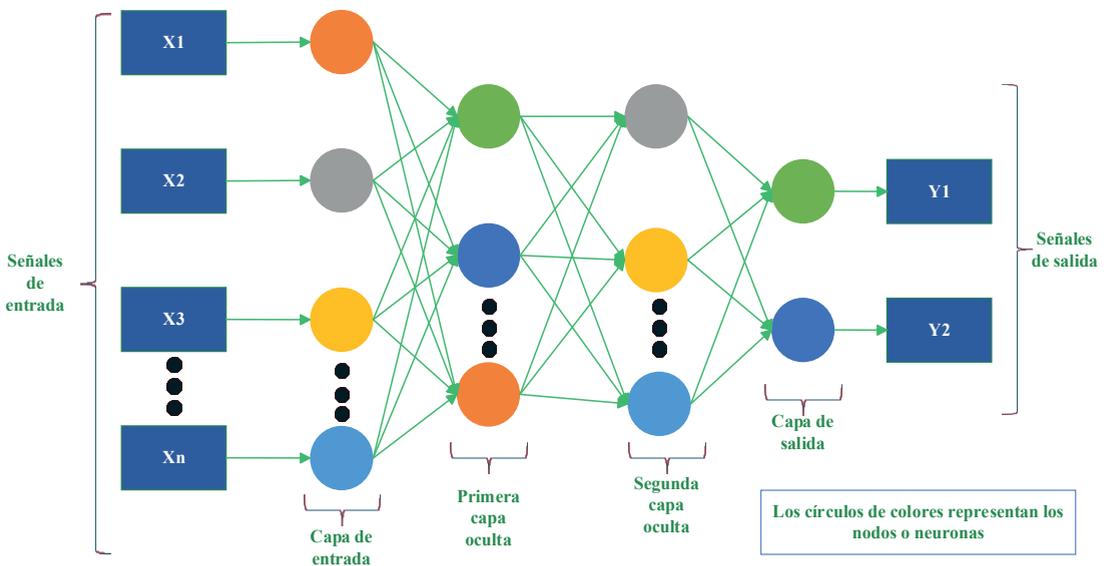
conjuntos aproximados y *machine learning*, debido a que hay múltiples posibilidades de abordar la IA en la CSC, específicamente, y aunque hay avances al respecto, se debe propender por implementar su uso con fines académico-científicos.

## Diseño y aplicación del modelado matemático

Para esta parte, los autores consultados han desarrollado modelos también basados en componentes de IA, bajo este argumento y acorde con los avances logrados por Gupta et al. (2022), entre otros, el proceso de construcción de una red neuronal se inició con la limpieza de datos, que es una actividad crucial para garantizar la calidad y la precisión del modelo.

En esta etapa, los autores eliminan o corrigen los datos faltantes, inconsistentes o duplicados, y se normalizan o transforman las variables para que se ajusten a los requerimientos de la red neuronal (ver figura 48). La limpieza de datos también puede incluir la selección de características relevantes y la reducción de la dimensionalidad mediante técnicas como el análisis de componentes principales (PCA) o la selección de características recursivas (RFE), como se observa en la arquitectura de la red neuronal multicapa de la figura 49, representada por DelIngenierías (2023).

**Figura 49.** Arquitectura de una red neuronal multicapa en IA



**Fuente:** DelIngenierías.com (2023).

Una vez que los datos están limpios y preparados, se define la arquitectura de la red neuronal como se describe en la figura 48, la arquitectura será la estructura básica que incluye el número de capas, el tipo de capas (densas, convolucionales o recurrentes) y su número de neuronas. Además, se seleccionaron las funciones de activación, que son matemáticas no lineales que se aplican a las entradas de cada neurona para determinar su salida. Estas funciones, como lo son ReLU, sigmoide o tangente hiperbólica, permiten que la red aprenda patrones complejos y no lineales en los datos. Por último, se elige una función de costo, también conocida como función de pérdida o de error, que mide la diferencia entre las predicciones del modelo y los valores reales. Para ello se aplicaron los conceptos desarrollados por Gupta et al. (2022), entre otros. Dado que esta función será esencial para optimizar los pesos y sesgos de la red neuronal durante el proceso de entrenamiento. Algunas funciones de costo comunes incluyen el error cuadrático medio (MSE) y la entropía cruzada.

## Impacto de las decisiones estratégicas para la viabilidad y sostenibilidad de la CSC

- 1. Eficiencia logística y reducción de costos:** la automatización y optimización de la producción agrícola, como también la logística permiten a las empresas reducir los costos operativos mediante el uso eficiente de recursos y la minimización de desperdicios (Durevall, 2020). En ese sentido, la predicción precisa de la demanda y la gestión eficiente del inventario evitan el exceso de *stock* y reducen los costos asociados al almacenamiento y la pérdida de productos no vendidos (Nguyen, et al., 2022; Torga y Spers, 2019).
- 2. Sostenibilidad y responsabilidad ambiental:** las prácticas de agricultura de precisión y los modelos de negocio circulares mejoran la sostenibilidad de la SC al reducir el uso de recursos naturales y generando menos desperdicio, a su vez, la implementación de tecnologías verdes y la adopción de estrategias de sostenibilidad fortalecen la responsabilidad ambiental de la marca y su percepción en el mercado (Perez et al., 2017).
- 3. Calidad del producto y satisfacción del cliente:** la trazabilidad y transparencia a través de tecnologías en *machine learning*, *big data* y *blockchain* garantizan la calidad del producto y promueven prácticas de comercio justo, lo cual mejora la confianza y satisfacción del cliente (Durevall, 2020; Johannessen y Wilhite, 2010). Sumado a esto, la personalización y el marketing digital permiten adaptar productos y servicios a las preferencias individuales de los consumidores, que mejoran su experiencia de compra y fidelidad a la marca (Kumar y Sharma, 2021).

- 4. Competitividad y posicionamiento en el mercado:** acorde con Opoku et al. (2023); Panggabean y Arsyad (2023), la adopción de tecnologías digitales avanzadas y la mejora continua en la eficiencia y sostenibilidad posicionan a las empresas como líderes innovadores en el mercado del café. Esta capacidad de adaptarse rápidamente a las tendencias del mercado y a las demandas de los consumidores se podría dar mediante el uso de análisis de datos y tecnologías emergentes en mejora del posicionamiento de marca y la competitividad (Lee y Lee, 2021).
- 5. Innovación y desarrollo de nuevos productos:** la utilización de datos y tecnologías digitales facilita la innovación y el desarrollo de nuevos productos, servicios y modelos de negocio, abriendo nuevas oportunidades de mercado y fuentes de ingreso (Adelfio et al., 2022; Da Cruz Correia y Do Reis, 2020).
- 6. Colaboración y eficiencia en la cadena de valor:** de acuerdo con Nguyen et al. (2023) y Raford (2015), las plataformas colaborativas en la nube mejoran la comunicación y coordinación entre todos los actores de la SC, desde los productores hasta los consumidores finales, optimizando la cadena de valor en su conjunto. Las decisiones estratégicas se fundamentaban en la logística, pero a raíz de la transformación digital no solo impactan en la mejora de procesos internos y la reducción de costos, sino que también generan valor agregado para los clientes, mejoran la sostenibilidad y fortalecen la posición competitiva de las empresas en el mercado global del café (Friberg y Sanctuary, 2018; Schuler y Christmann, 2011).

La viabilidad del SC es una extensión de la resiliencia de la SC, la teoría general de viabilidad, por ende, analiza como los sistemas de gobernanza pueden llevar a cabo una serie de costosas intervenciones que impactan las SC. También se debe prever, que, debido a la escasez de datos sobre eventos disruptivos impredecibles, especialmente durante la pandemia, es posible que la información relacionada con los *stakeholders* de SC no se obtenga con precisión (Liu et al., 2022).

Se realizó la identificación de tecnologías a nivel mundial, de tipo convencional y alternativo basado en operaciones y procesos unitarios que hayan sido probados a escala industrial, semiindustrial o de planta piloto para la producción de café. Para ello se define el esquema tecnológico, también el proceso de obtención de café pergamino seco y su viabilidad técnica, económica y ambiental. Luego se realizó una recolección de información científica para diagnosticar las configuraciones productivas, capacidad de producción y transformación digital, nivel de utilización de tecnologías y, en ese sentido, se realizaron las siguientes actividades:

- A partir del planteamiento y definición de los procesos de obtención de productos a base de café, se realizó la construcción de los diagramas de bloques y esquemas con las diferentes operaciones y procesos unitarios, así como las condiciones de operación, las corrientes de entrada y salida de cada unidad y los efluentes de cada uno de los procesos de obtención de los productos del café, derivados y subproductos.
- Identificación de impactos ambientales de los procesos productivo desde la selección de las categorías de impacto ambiental de los productos a base de café. Por ejemplo, se identificaron los residuos sólidos, los efluentes líquidos y las emisiones gaseosas que se generan, así como los indicadores de impacto ambiental correspondientes.
- Bajo el enfoque *triple bottom line*, la identificación de impactos sociales de los procesos productivos, que parte de las configuraciones tecnológicas y económicas de los procesos, se rastrearon los indicadores de impacto social respectivos, por ejemplo, equidad de género, rol de la mujer rural cafetera, robustez y resiliencia, número de puestos de trabajo generados, agilidad, relevo generacional en la familia cafetera.

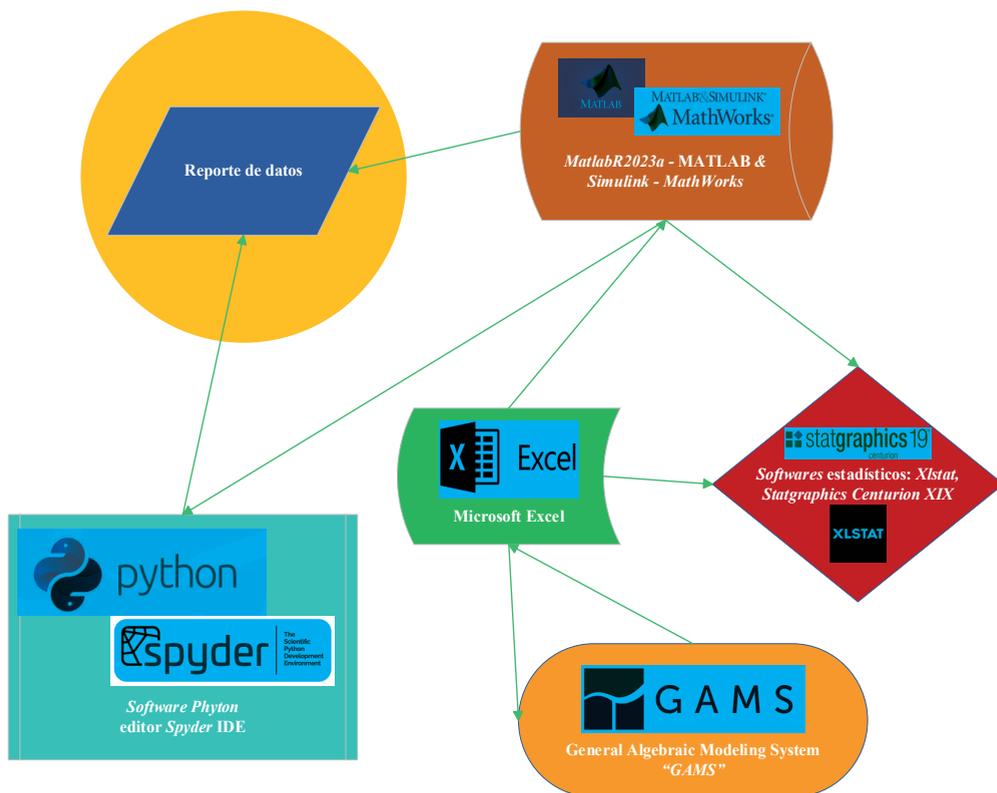
El modelado matemático para la CSC implica los siguientes pasos:

- 1. Implementación del modelo:** utilización de herramientas de software como Phyton para implementar el modelo matemático. Esta herramienta permite representar las relaciones entre las diferentes partes de la CSC desde la definición del sistema de ecuaciones matemáticas que describe los flujos de materiales, los costos, indicadores, precios y otros aspectos relevantes (Tan et al., 2022b).
- 2. Calibración y validación con parámetros:** ajuste de los parámetros del modelo según los datos recopilados entre estos la oferta-demanda, y sus fluctuaciones por calibración del modelo. Posteriormente llevar a cabo la validación del modelo utilizando datos reales o simulaciones controladas para comparar los resultados del modelo con los resultados observados en la CSC actual (Valencia-Payan et al., 2022).
- 3. Análisis de resultados:** ejecución del modelo con diferentes configuraciones y escenarios que examinen los resultados para comprender cómo se ven afectados los objetivos. Al identificar soluciones óptimas en términos de los objetivos definidos previamente. (Proença et al., 2022)

**4. Toma de decisiones informada:** utilización de los resultados del modelo para tomar decisiones informadas y estratégicas en la CSC ajustando las cantidades de inventario, selección de proveedores estratégicos o planificación de rutas de transporte eficientes que consideren los compromisos entre los objetivos y se busquen soluciones que equilibren los beneficios económicos, sociales y ambientales (Iriondo-DeHond et al., 2019).

La integración entre los softwares comerciales y el utilizado para la solución del problema de optimización multiobjetivo se justifica por la facilidad del aprendizaje en la escritura del código y la evolución en el paradigma de programación (en ese caso Python tiene una gran biblioteca estándar) que posibilita la evaluación de la CSC (ver figura 50).

**Figura 50.** Esquema de Integración entre los software y herramientas computacionales para el modelado matemático y la optimización



**Fuente:** elaboración propia.

De acuerdo con la figura 50, luego de efectuada la determinación de ecuaciones y la formulación de la capacidad de predicción del modelo, se llevó a cabo la determinación de la estructura óptima y la medición de la resiliencia posoptimización, para todo esto se emplearon herramientas como Phyton o GAMS, descritos.

Esta etapa define y representa el comportamiento real del sistema, estos escenarios serán construidos de forma simulada y sirven para el análisis de los indicadores de gestión cuantitativos en escenarios de gobernanza, resiliencia y sostenibilidad social. Adicional, se adaptaron formulaciones existentes construidas entre otros por Bröckel et al. (2007); Wang, (2021); Estrada (2017) y Torabzadeh et al. (2022), para plantear y definir las expresiones matemáticas que describen los tres eslabones de la CSC: red de abastecimiento, procesos productivos y red de distribución.

## Aspectos clave

Las decisiones estratégicas y la integración de tecnologías digitales tienen un impacto significativo en la viabilidad y sostenibilidad de la CSC. A continuación, se destacan los puntos clave sobre eficiencia, sostenibilidad, calidad, competitividad, innovación y colaboración:

### Eficiencia

**Automatización de procesos:** la implementación de tecnologías como la robótica y el software de gestión automatiza procesos manuales, reduciendo errores y aumentando la eficiencia operativa. Esto permite una gestión más ágil y precisa de la CSC.

**Optimización logística:** el uso de algoritmos y análisis de datos optimiza la logística, reduciendo tiempos y costos de transporte. La integración de sistemas de gestión de transporte (TMS) y almacenes (WMS) mejora la coordinación y visibilidad a lo largo de la cadena.

### Sostenibilidad

**Prácticas agrícolas sostenibles:** la adopción de tecnologías avanzadas y prácticas agrícolas sostenibles, como la agroforestería y la reducción de pesticidas, minimiza el impacto ambiental y promueve la conservación de recursos naturales.

**Economía circular:** integrar principios de economía circular, como el reciclaje y la reutilización de subproductos del café, reduce el desperdicio y genera nuevas fuentes de ingresos para los productores.

## Calidad

**Certificaciones y etiquetas ecológicas:** obtener certificaciones de calidad y sostenibilidad, como Fair Trade y Rainforest Alliance, asegura prácticas agrícolas responsables y mejora la calidad del producto final, aumentando la confianza del consumidor.

**Trazabilidad y transparencia:** la implementación de tecnologías como *blockchain* mejora la trazabilidad y transparencia en la CSC, permitiendo a los consumidores conocer el origen y las prácticas de producción del café.

## Competitividad

**Innovación tecnológica:** la adopción de tecnologías como *big data*, IoT y *machine learning* permite a las empresas cafeteras tomar decisiones más informadas y adaptarse rápidamente a las demandas del mercado, mejorando su competitividad.

**Reducción de costos:** la optimización de procesos y la automatización reducen los costos operativos, permitiendo a las empresas ofrecer productos de alta calidad a precios competitivos.

## Innovación

**Desarrollo de nuevos productos:** la diversificación de productos, como el café especial, orgánico y de origen, ayuda a satisfacer nichos de mercado y aumentar los ingresos. La innovación en métodos de procesamiento y maquinaria también mejora la eficiencia y calidad del producto.

**Plataformas digitales:** el uso de plataformas digitales y tecnologías emergentes facilita la colaboración y comunicación entre los actores de la CSC, promoviendo la innovación y el desarrollo de nuevas soluciones.

## Colaboración

**Cooperación interinstitucional:** la colaboración entre universidades, empresas, el estado y la sociedad es esencial para asegurar, fomentar y consolidar asociaciones y cooperativas que forman parte de la CSC. Esto incluye la implementación de programas de capacitación y acceso a financiamiento.

**Participación comunitaria:** fomentar la participación comunitaria y la asociatividad mejora las condiciones de vida y trabajo de los productores de café, promoviendo un desarrollo integral y sostenible de las comunidades cafetaleras.

Ahora bien, las decisiones estratégicas en la CSC impactarían en la viabilidad, sostenibilidad y competitividad. Algunas de las decisiones estratégicas más importantes son:

## Selección de proveedores

**Criterios de sostenibilidad:** elegir proveedores que cumplan con estándares de sostenibilidad y prácticas agrícolas responsables.

**Diversificación de proveedores:** diversificar la base de proveedores para reducir riesgos asociados con la dependencia de un solo proveedor.

## Gestión de inventarios

**Optimización de inventarios:** implementar sistemas de gestión de inventarios que utilicen analítica avanzada y *big data* para prever demandas y optimizar niveles de stock.

**Automatización:** utilizar tecnologías como IoT para monitorear y gestionar inventarios en tiempo real.

## Transporte y logística

**Rutas de transporte:** optimizar rutas de transporte para reducir costos y tiempos de entrega, utilizando algoritmos y análisis de datos.

**Sostenibilidad en logística:** adoptar prácticas logísticas sostenibles, como el uso de vehículos eléctricos y la optimización de cargas para reducir emisiones de carbono.

## Tecnología y digitalización

**Implementación de *Blockchain*:** utilizar *blockchain* para mejorar la trazabilidad y transparencia en la CSC.

**Adopción de IA y Machine Learning:** aplicar inteligencia artificial y *machine learning* para mejorar la toma de decisiones, prever demandas y optimizar procesos.

## Certificaciones y Calidad

**Obtención de certificaciones:** obtener certificaciones de calidad y sostenibilidad, como Fair Trade y Rainforest Alliance, para asegurar prácticas responsables y mejorar la confianza del consumidor.

**Control de calidad:** implementar sistemas de control de calidad en todas las etapas de la CSC para asegurar la consistencia y calidad del producto final.

## Innovación y desarrollo de productos

**Diversificación de productos:** desarrollar nuevos productos, como café especial, orgánico y de origen, para satisfacer nichos de mercado y aumentar los ingresos.

**Investigación y desarrollo:** invertir en investigación y desarrollo para mejorar métodos de cultivo, procesamiento y comercialización del café.

## Colaboración y asociatividad

**Cooperación interinstitucional:** fomentar la colaboración entre universidades, empresas, el estado y la sociedad para asegurar, fomentar y consolidar asociaciones y cooperativas.

**Participación comunitaria:** promover la participación comunitaria y la asociatividad para mejorar las condiciones de vida y trabajo de los productores de café.

## Sostenibilidad y responsabilidad social

**Prácticas agrícolas sostenibles:** adoptar prácticas agrícolas que minimicen el impacto ambiental y promuevan la conservación de recursos naturales.

**Responsabilidad social empresarial:** implementar programas de responsabilidad social empresarial que mejoren las condiciones laborales y apoyen a las comunidades cafetaleras.

## Gestión de riesgos

**Diversificación de mercados:** diversificar los mercados de exportación para reducir la dependencia de un solo mercado y mitigar riesgos asociados con fluctuaciones de precios.

**Planificación de contingencias:** desarrollar planes de contingencia para enfrentar eventos disruptivos, como desastres naturales o cambios en la regulación.

En concordancia, las decisiones estratégicas y la integración de tecnologías digitales son fundamentales para mejorar la eficiencia, sostenibilidad, calidad, competitividad,

innovación y colaboración en la CSC. Estos elementos permiten enfrentar los desafíos actuales y futuros, asegurando una CSC más robusta, resiliente, ágil y sostenible.

## Gobernanza para la sostenibilidad y viabilidad de la CSC

Existen numerosos sistemas de gobernanza de múltiples actores (Grabs y Carodenu- to (2021) que son transferibles o adaptables (Hajjar et al., 2019) y buscan garantizar la sostenibilidad de los productos comercializados internacionalmente (Fontana y Pisalyaput (2022). Los actores empresariales y de la sociedad civil desempeñan un papel dominante en la iniciación, la gerencia y administración de los «sistemas de gobernanza de la cadena de suministro sostenible» o sistemas «SSCG» (Vermeulen y Kok, 2012; Vermeulen y Metselaar, 2015). Según la FNC (2018), se debe trabajar en el fomento de la buena gobernanza que permita una mayor unidad gremial que soporte la identidad y legitimidad de la institucionalidad cafetera, para el aumento de la participación en democracia de las agremiaciones, que promuevan la resiliencia, equidad de género y desarrollo de habilidades de liderazgo en la mujer rural, al incorporar estrategias innovadoras para mayor empoderamiento definidas por DispatchTrack (2023) y Gosling et al. (2016), en aras de robustecer y apalancar las agremiaciones y posteriormente, consolidar la toma de decisiones asertivas por parte de las comunidades en el territorio.

Por ende, es necesario el desarrollo óptimo de mecanismos de comunicación y participación eficaces y de doble vía: caficultor-institucionalidad para la generación de nuevos proyectos de envergadura (Grabs y Carodenu- to, 2021; Sengere et al., 2019). No obstante, en las últimas tres décadas, los estándares de certificación transnacionales han proliferado para llenar «vacíos de gobernanza» percibidos en los países en desarrollo. Las organizaciones no gubernamentales transnacionales y las agencias privadas han empleado normas que cubren una amplia gama de áreas como los derechos laborales, la justicia social y la protección del ambiente (Gillespie y Do, 2022), funciones que atañen al rol gobierno.

## Análisis de sensibilidad

De acuerdo con lo anterior, el análisis de sensibilidad es una técnica importante para evaluar cómo los cambios en los parámetros afectan los resultados del modelo matemático. Los siguientes son los siete pasos que se tuvieron en cuenta dentro de la CSC para la realización del análisis de sensibilidad descritos en esta etapa:

- 1. Identificación de parámetros relevantes:** los parámetros que tienen un impacto significativo en los objetivos son los más relevantes para el análisis de

sensibilidad, entre estos se pueden incluir precios, costos de producción, tasas de demanda, tiempos de entrega, precios de los insumos, etcétera.

- 2. Variación de parámetros:** selección del parámetro específico y variación de su valor dentro de un rango realista, como también mantener constantes los demás parámetros para aislar el efecto del parámetro seleccionado.
- 3. Ejecución del modelo:** ejecución del modelo con el valor original del parámetro y luego con el valor modificado, registro de resultados para cada configuración.
- 4. Análisis de resultados:** se examina cómo cambian los objetivos en función de las variaciones en el parámetro al utilizar gráficos, tablas o métricas específicas para visualizar estos cambios.
- 5. Sensibilidad relativa:** cálculo de la sensibilidad relativa para cada parámetro, que mide cuánto cambia el objetivo en relación con el cambio en el parámetro. La sensibilidad relativa se puede expresar como un porcentaje o una unidad específica (por ejemplo, dólares por unidad de cambio en el parámetro).
- 6. Priorización de parámetros:** basado en los resultados del análisis de sensibilidad, prioriza los parámetros según su impacto en los objetivos y ayuda al enfoque de aspectos críticos de CSC al tomar decisiones estratégicas.
- 7. Iteración y actualización:** repetición del proceso para otros parámetros relevantes, a medida que cambian las condiciones o los datos, se actualiza el análisis de sensibilidad para mantenerlo relevante. Ello la convierte en una herramienta poderosa para comprender la robustez del modelo y tomar decisiones informadas en la CSC desde los datos históricos o diferentes escenarios.

En virtud de lo anterior, la industria 5.0 puede transformar la cadena de valor del café al integrar tecnologías avanzadas con un enfoque en la sostenibilidad y el bienestar humano, este impacto de la cadena se daría desde diversos ángulos:

**Cultivo y producción:** la incorporación de agricultura de precisión a partir del uso de artefactos como es la sensórica y drones que permiten conocer la teledetección satelital, las condiciones del suelo y los requerimientos energéticos de las plantaciones de café, también se puede optimizar el uso de agua y de fertilizantes, por ejemplo.

**Sostenibilidad:** BPA y BPM para conservación de la biodiversidad.

**Procesamiento:** automatización inteligente y el uso de la robótica y de cobots o robots colaborativos, los sistemas de inteligencia artificial para el mejoramiento de la calidad de procesamiento.

**Energías renovables:** reducción de huella de carbono y de impacto de huella hídrica.

**Distribución desde la trazabilidad y transparencia:** uso de *blockchain* para asegurar la trazabilidad del café desde la finca hasta el consumidor, que garanticen prácticas sostenibles, con justicia social.

**Logística inteligente:** optimización y eficiencia en ruteo a partir de modelos de inteligencia artificial para reducción de emisiones y costos.

**Consumo:** desde la personalización por el uso de datos que permitan conocer preferencias específicas.

**Experiencia del cliente:** mejorar las vivencias y experiencias del cliente en cafeterías mediante realidad aumentada y *apps*. Por tales motivos, la industria 5.0 no solo busca impactar la eficiencia y la productividad, sino también asegurar que el proceso sea sostenible y centrado en el ser humano.

## CONCLUSIONES

En síntesis, la presente investigación estuvo centrada en la CSC sostenible que propende por impactos significativos en varios niveles. Entre las áreas donde podría generarse cambios disruptivos está la generación de nuevo conocimiento valioso, soluciones prácticas y un impacto positivo en la industria y las comunidades involucradas desde:

- 1. Investigación y desarrollo:** sobre los desafíos específicos que enfrenta la CSC se deben desarrollar soluciones innovadoras para mejorar la sostenibilidad, la calidad y la eficiencia en todas las etapas, desde la producción hasta la entrega al consumidor.
- 2. Mejora de prácticas agrícolas:** la apertura de nuevos campos de investigación y promoción de prácticas agrícolas sostenibles podría aumentar la productividad y reducir el impacto ambiental, esto podría incluir métodos de cultivo orgánico, agroforestería y técnicas de conservación del suelo.
- 3. Trazabilidad y transparencia:** la posible implementación de un sistema basado en blockchain para rastrear la procedencia del café y garantizar la transparencia.
- 4. Empoderamiento de las comunidades cafeteras:** fomento de iniciativas sociales que beneficien a los agricultores y sus comunidades. Esto podría incluir programas de educación, liderazgo femenino, acceso a servicios de salud y empoderamiento económico.

5. **Bajo un enfoque triple bottom line y la teoría general de viabilidad, un impacto económico y social:** evaluación del impacto económico y social de las decisiones en la CSC, que ayudaría a las empresas y gobiernos a tomar decisiones informadas.
6. **Colaboración y gobernanza:** analizar la gobernanza, la toma de decisiones, la resiliencia y el fomento de la colaboración entre diferentes actores, como caficultores, procesadores, exportadores y minoristas.
7. **Enfoque Triple Bottom Line:** la viabilidad y sostenibilidad de la CSC deben abordarse desde los factores económicos, sociales y ambientales. Es crucial definir un modelo de negocio próspero que genere estándares de alta calidad para los caficultores.
8. **Planeación de escenarios de sostenibilidad:** la planeación estratégica en escenarios inciertos permite predecir eventos disruptivos y mejorar la capacidad de toma de decisiones en la CSC. Esto incluye la evaluación de barreras e impulsores y la dinámica de precios en el mercado internacional.
9. **Características promisorias en la cadena de valor:** la adopción de tecnologías agrícolas modernas, certificaciones de calidad, y etiquetas ecológicas y éticas son esenciales. Además, la industrialización debe enfocarse en la gestión de complejidades y la minimización de energía, mientras que la comercialización debe incluir proyectos de co-creación de valor y tecnologías emergentes en transporte y logística.
10. **Factores para la toma de decisiones:** la toma de decisiones en la CSC debe considerar variables intrínsecas y extrínsecas, como la optimización del diseño de redes de suministro, la trazabilidad para la sostenibilidad y la evaluación de escenarios futuros en bioenergía y bioeconomía circular.
11. **Métodos y técnicas de análisis:** los métodos cuantitativos de gestión, como el ICRC, y la evaluación de sostenibilidad social y ambiental son cruciales. La normatividad y regulación gubernamental también juegan un papel determinante en la transformación de la CSC.
12. **Redes de transporte y distribución:** la configuración de la red de transporte condiciona los costos de distribución y la planificación temporal de los productos al mercado. Es necesario mejorar estas redes para adaptarse a escenarios de sostenibilidad.
13. **Colaboración interinstitucional:** la cooperación entre universidad, empresa, el estado y sociedad, asegura, fomenta y consolida asociaciones y cooperativas que forman parte de la CSC.

- Abebe, T. M., y Semegn, A. M. (2021). Blockchain Based Green Coffee Supply Chain Management to Improve Traceability and Transparency (Case Study on Sidama Coffee). *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering, LNICST*. Vol. 384. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-80621-7\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-030-80621-7_22)
- Abele, E., Chryssolouris, G., Sihn, W., Metternich, J., ElMaraghy, H., Seliger, G., Sivard, G., ElMaraghy, W., Hummel, V., Tisch, M., y Seifermann, S. (2017). Learning factories for future oriented research and education in manufacturing. *CIRP Annals*, 66(2), 803–826. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.005>
- Acosta-Alba, I., Boissy, J., Chia, E., y Andrieu, N. (2020). Integrating diversity of smallholder coffee cropping systems in environmental analysis. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(2), 252-266. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01689-5>
- Adelfio, L., La Scalia, G., La Fata, C. M., y Giallanza, A. (2022). Life cycle analysis of innovative building materials based on circular coffee ground supply chain. En R. Accorsi, R. Akkerman, y S. Cholleto (Eds.), *Transportation Research Procedia* (Vol. 67, pp. 100–108). <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.12.040>
- Admisiones BASC Café. (2021). BASC CAFE. <https://basccafe.org/>

- Aguilar-Raymundo, V. G., Sánchez-Páez, R., Gutiérrez-Salomón, A. L. y Barajas-Ramírez, J. A. (2019). Spent coffee grounds cookies: Sensory and texture characteristics, proximate composition, antioxidant activity, and total phenolic content. *Journal of Food Processing and Preservation*, **43**(12), e14223.
- Akoyi, K. T., Mitiku, F., y Maertens, M. (2020). Private sustainability standards and child schooling in the African coffee sector. *Journal of Cleaner Production*, **264**, 121713. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121713>
- Alsanad, M., Sassine, Y. N., El Sebaaly, Z. y Abou Fayssal, S. (2021). Spent coffee grounds influence on *Pleurotus ostreatus* production, composition, fatty acid profile, and lignocellulose biodegradation capacity. *CyTA-Journal of Food*, **19**(1), 11-20.
- Alamsyah, A., Widiyanesti, S., Wulansari, P., Nurhazizah, E., Dewi, A. S., Rahadian, D., Ramadhani, D. P., Hakim, M. N., y Tyasamesi, P. (2023). Blockchain traceability model in the coffee industry. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, **9**(1). <https://doi.org/10.1016/j.joit-mc.2023.100008>
- Aleksandrovich, V; Alekseevich, K; Ismailovich, K; Alekseevich, P; Sergeevich, S; Ivanovich, T (2016). *Closed-Type Lifeboat for Evacuation And Saving Of Personnel Of Marine Oil And Gas Platforms, Transport And Technological Ships In Ice Conditions*. Fed Gosudarstvennoe Unitarnoe Predpriyatie Krylovskij Gosudarstvennyj Nauchnyj Tsent. RU2630871C1. Russia.
- Anders, S. y Fedoseeva, S. (2017). Quality, sourcing, and asymmetric exchange-rate pass-through into U.S. coffee imports. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, **42**(3), 372–385. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85032500288&partnerID=40&md5=4982a751a1ce208c-5c77de736a8b8ffa>
- Anliker, M. (2008). Coffee Machine. US10687656B2 y US2010218687A1. China.

- Angarita, F. A. (2013). Borra de café como material adsorbente para la remoción de cromo (III). Proyecto de grado, Universidad Libre – Bogotá. [https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/11292/BORRA%20DE%20CAF%C3%89%20COMO%20MATERIAL%20ADSORBENTE%20PARA%20LA%20RE MOCI%C3%93N%20DE.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/11292/BORRA%20DE%20CAF%C3%89%20COMO%20MATERIAL%20ADSORBENTE%20PARA%20LA%20RE%20MOCI%C3%93N%20DE.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Antecedentes Misión Cafetera - Universidad del Rosario. (2022). Universidad del Rosario. <https://repository.urosario.edu.co/items/e67db98b-e9d7-41ec-94bc-e38773c8d804>
- Aprilia, A., Laili, F., Setyowati, P. B., Waringga, K. F., y MSAE, A. A. A. U. C. on F. and A.-B. E. and T. E. (AUCFA); et al.; F. K. P. T. T. P. I. (FKPT T. (2021). The effect of supplier innovation on supply chain agility: Evidence from coffee shops in Malang area. En N. M. S. Sunyoto, A. Z. Mubarak, A. Hidayat, A. N. Mustaqiman, A. Ihwah, C. G. Perdani, D. Y. Ali, D. M. Ikasari, A. R. D. F, D. W. Indriani, H. Y. Setyawan, M. Nurcholis, N. Istianah, P. Setiani, R. Septifani, S. D. Muktiningsih, T. Hasna, Ubaidillah, W. G. Rohmah, y W. B. Sunarharum (Eds.), *4th International Conference on Green Agro-industry and Bioeconomy, ICGAB 2020* (Vol. 733, Issue 1). IOP Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/733/1/012059>
- Aprilia, R., Wardhana, M. Y., Baihaqi, A., y Nugroho, A. (2022). Analysis of distribution risk in Arabica coffee supply chain during pandemic in Aceh Tengah District. *3<sup>rd</sup> International Conference on Agriculture and Bio-Industry, ICAGRI 2021*, 951(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/951/1/012083>
- AccuPyc II (2021). AccuPyc II 1345. <https://micromeritics.com/es/support/accu-pyc-ii-1345>
- Arias, J. P, Zartha, J. W. J, Hernández, R, y Gómez, J. (2017). Vigilancia tecnológica y análisis del ciclo de vida de la tecnología: Aplicación en productos generados a partir del café. *Revista Electrónica Gestión de las Personas y Tecnologías*, 10(29), 78-94. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6069429>
- Arias-Vargas, M., Sanchis, R., y Poler, R. (2022). Impact of Predicting Disruptive Events in Supply Planning for Enterprise Resilience. *IFAC-PapersOnLine*, 55(10), 1864–1869. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.670>

- Aristizábal-Marulanda, V., Cardona A., C. A. y Martín, M. (2022). Supply chain of biorefineries based on Coffee Cut-Stems: Colombian case. *Chemical Engineering Research and Design*, **187**, 174-183. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.08.060>
- Aroma de Café. (2022). Rainforest Alliance. <https://www.aromadecafe.es/rainforest-alliance>
- Arre, B., Seesuriyachan, P., y Wattanutchariya, W. (2021). Holistic management approach to local coffee entrepreneur in northern Thailand. In W. Sriseubsai, W. Wongwiriyan, y K. Onlaor (Eds.), *7<sup>th</sup> International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology, ICEAST 2021* (Vol. 2397). American Institute of Physics Inc. <https://doi.org/10.1063/5.0063782>
- Arslan, C., Gregg, D., y Wollni, M. (2024). Paying more to make less: value degrading in the coffee value chain in eastern Uganda. *American Journal of Agricultural Economics*, **106**(1), 96-117. <https://doi.org/10.1111/ajae.12389>
- Asociación Nacional de Comercio Exterior [Analdex]. (2021). *Informe de exportaciones enero - julio de 2021*. Analdex. <https://www.analdex.org/2021/09/10/informe-de-exportaciones-enero-julio-de-2021/#:%7E:text=Los%20principales%20productos%20hacia%20este%20destino%20fueron%20los%20aceites%20de,y%20especies%20201%2C4%25>
- Ayyanathan, N., y Kannammal, A. (2014). Share price time series forecasting for effective supply chain information exchange. *International Journal of Logistics Systems and Management*, **18**(1), 139-158. <https://doi.org/10.1504/IJLSM.2014.062125>
- Ayyanathan, N., y Kannammal, A. (2015). Combined forecasting and cognitive Decision Support System for Indian green coffee supply chain predictive analytics. In T. N. Nagabhusan, C.-20/1 JSS Academy of Technical Education (JSSATE) Sector-62 Noida, N. Sundararajan, y S. Suresh (Eds.), *Proceedings -2015 International Conference on Cognitive Computing and Information Processing, CCIP 2015*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/CCIP.2015.7100735>

- Badr, A. N., El-Attar, M. M., Ali, H. S., Elkhadragey, M. F., Yehia, H. M. y Farouk, A. (2022). Spent Coffee Grounds Valorization as Bioactive Phenolic Source Acquired Antifungal, Anti-Mycotoxigenic, and Anti-Cytotoxic Activities. *Toxins*, **14**(2), 109.
- Bager, S. L., Singh, C., y Persson, U. M. (2022). Blockchain is not a silver bullet for agro-food supply chain sustainability: Insights from a coffee case study. *Current Research in Environmental Sustainability*, **4**. <https://doi.org/10.1016/j.crsust.2022.100163>
- Bai, C., Quayson, M., y Sarkis, J. (2021). COVID-19 pandemic digitization lessons for sustainable development of micro-and small- enterprises. *Sustainable Production and Consumption*, **27**, 1989-2001. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.04.035>
- Bai, C., Quayson, M., y Sarkis, J. (2022). Analysis of Blockchain's enablers for improving sustainable supply chain transparency in Africa cocoa industry. *Journal of Cleaner Production*, **358**, 131896. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131896>
- Bager, S. L., Singh, C. y Persson, U. M. (2022). Blockchain is not a silver bullet for agro-food supply chain sustainability: Insights from a coffee case study. *Current Research in Environmental Sustainability*, **4**. <https://doi.org/10.1016/j.crsust.2022.100163>
- Ballesteros, L. F., Cerqueira, M. A., Teixeira, J. A. y Mussatto, S. I. (2018). Production and physicochemical properties of carboxymethyl cellulose films enriched with spent coffee grounds polysaccharides. *International journal of biological macromolecules*, **106**, 647-655.
- Banco Mundial. (2023). *Colombia: panorama general*. <https://www.bancomundial.org/es/country/colombia/overview>
- Banco Mundial. (2023). *Informe del índice de desempeño logístico del Banco Mundial*. <https://www.analdex.org/wp-content/uploads/2023/04/Informe-del-Indice-de-Desempeno-Logistico-2023-LPI-Banco-Mundial-1.pdf>
- Banker, R., Mitra, S., y Sambamurthy, V. (2011). The effects of digital trading platforms on commodity prices in agricultural supply chains. *MIS Quarterly: Management Information Systems*, **35**(3), 599-611. <https://doi.org/10.2307/23042798>



- Baratsas, S. G., Pistikopoulos, E. N., y Avraamidou, S. (2021). A systems engineering framework for the optimization of food supply chains under circular economy considerations. *Science of the Total Environment*, **794**. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148726>
- 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 (Switzerland)*, **13**(2), 1–20. <https://doi.org/10.3390/su13020589>
- Battistella, C., de Toni, A. F., de Zan, G., y Pessot, E. (2017). Cultivating business model agility through focused capabilities: A multiple case study. *Journal of Business Research*, **73**, 65–82. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2016.12.007>
- Baumgart, B. y Baumgart, J (2006). *Mobile coffee lounge comprises a trailer with extending module and further light structural module possibly with glazing where all floors lie in one level*. DE202006018912U1. Deutschland.
- Benincá, D. B., do Carmo, L. B., Grancieri, M., Aguiar, L. L., Lima Filho, T., Costa, A. G. V., Olivera, D., Saraiva, S. y Silva, P. I. (2023). Incorporation of spent coffee grounds in muffins: A promising industrial application. *Food Chemistry Advances*, **3**, 100329.
- Benzatti, D; Bolles, G; Brough, A; Cook, J; Faoro, M; Feliberti, V; Seetharaman, S; Tan, Y; Varo, G. (2017). *Location context, supplemental information, and suggestions for meeting locations*. US10154381B2. United States.
- Berti, D (2017). *Procedure for removing volatile substances from a mass processable polymer*. ES2613380T. Spain.
- Bettín-Díaz, R., Rojas, A. E., y Mejía-Moncayo, C. (2018). Methodological approach to the definition of a blockchain system for the food industry supply chain traceability. En E. Tarantino, B. Murgante, D. Taniar, Y. Ryu, C. M. Torre, A. M. Rocha, O. Gervasi, S. Misra, E. Stankova, y B. O. Apduhan (Eds.), *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics): Vol. 10961 LNCS* (pp. 19-33). Springer Verlag. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-95165-2\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-95165-2_2)

- Bettín-Díaz, R., Rojas, A. E., y Mejía-Moncayo, C. (2022). Colombian Origin Coffee Supply Chain Traceability by a Blockchain Implementation. *Operations Research Forum*, 3(4). <https://doi.org/10.1007/s43069-022-00174-4>
- Bhavsar, A., Diallo, C., y Ülkü, M. A. (2021). Towards sustainable development: Optimal pricing and sales strategies for retailing fair trade products. *Journal of Cleaner Production*, 286, 124990. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124990>
- Bielefeldt J; Diwan D; Horvath T; Vogt J (2014). Managing a Supply Chain. Halliburton Energy Services Inc; Landmark Graphics CORP. US10515332B2 y US2017300851A1. United States.
- Bilfield, A., Seal, D., y Rose, D. (2020). Brewing a more Balanced Cup: Supply Chain Perspectives on Gender Transformative Change within the Coffee Value Chain. *International Journal on Food System Dynamics*, 11(1), 26–38. <https://doi.org/10.18461/ijfsd.v11i1.37>
- Bilfield, A. (2022). Brewing Sustainability in the Coffee and Tea Industries: From Producer to Consumer. In *Brewing Sustainability in the Coffee and Tea Industries: From Producer to Consumer*. Taylor and Francis. <https://doi.org/10.4324/9781003228851>
- Biotto, M., De Toni, A. F., y Nonino, F. (2012). Knowledge and cultural diffusion along the supply chain as drivers of product quality improvement: The illycaffè case study. *International Journal of Logistics Management*, 23(2), 212–237. <https://doi.org/10.1108/09574091211265369>
- Bjorvatn, K., Milford, A. B., y Sørgard, L. (2015). Farmers, Middlemen and Exporters: A Model of Market Power, Pricing and Welfare in a Vertical Supply Chain. *Review of Development Economics*, 19(1), 31–44. <https://doi.org/10.1111/rode.12121>
- Bomfim, A. S. C. D., Oliveira, D. M. D., Voorwald, H. J. C., Benini, K. C. C. D. C., Dumont, M. J. y Rodrigue, D. (2022). Valorization of spent coffee grounds as precursors for biopolymers and composite production. *Polymers*, 14(3), 437.

- Booker, A., Johnston, D. y Heinrich, M. (2015). Value Chains of Herbal Medicines-Ethnopharmacological and Analytical Challenges in a Globalizing World. In Mukherjee, P. (Ed.), *Evidence-Based Validation of Herbal Medicine* (pp. 29-44). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800874-4.00002-7>
- Bote, A. D., y Vos, J. (2017). Tree management and environmental conditions affect coffee (*Coffea arabica* L.) bean quality. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, **83**, 39–46. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.njas.2017.09.002>
- Bravo, V. L., Ciccullo, F., y Caniato, F. (2022). Traceability for sustainability: seeking legitimacy in the coffee supply chain. *British food journal*, **124**(8), 2566–2590. <https://doi.org/10.1108/BFJ-06-2021-0628>
- Bray, J. G. P. (2019). Institutional environments and the livelihood impact of voluntary sustainability standards: A Village-based analysis from southern Sumatra's coffee sector. *Singapore Journal of Tropical Geography*, **40**(2), 291–311. <https://doi.org/10.1111/sjtg.12275>
- Brewing, A. (2019). Coffee (HS: 0901) Product Trade, Exporters, and Importers | OEC. OEC - *The Observatory of Economic Complexity*. <https://oec.world/es/profile/hs/coffee> <https://oec.world/es/profile/hs/coffee>
- Bröckel, Ulrich., Meier, Willi., y Wagner, Gerhard. (2007). *Product design and engineering: best practices*. Wiley-VCH.
- Browning, D., y Moayyad, S. (2017). Chapter 5 - Social Sustainability—Community, Livelihood, and Tradition. In B. Folmer (Ed.), *The Craft and Science of Coffee* (pp. 109-131). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803520-7.00005-0>
- Brown C; Diane, G (2020). *Computer-based platforms or systems, computing devices or components and/or computing methods for technological applications involving provision of a platform with portals for processing and handling electronic requests*. Capital One Services LLC. US11010721B1. United States.
- Bryant, Y; Bergeron, G; Bulgakov, M (2019). *Computer-based systems and platforms and computer-implemented methods configured for one or more technological applications involving reduction of false-positive fraud detection incidents*. Capital One Services LLC. US11423407B2 Y US2021035105A1. United States.

- Byrareddy, V., Kouadio, L., Kath, J., Mushtaq, S., Rafiei, V., Scobie, M., y Stone, R. (2020). Win-win: Improved irrigation management saves water and increases yield for robusta coffee farms in Vietnam. *Agricultural Water Management*, **241**, 106350. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106350>
- Campos, L. (2018). *Caracterización de un pigmento bioactivo obtenido a partir de residuos de café y evaluación de su aplicación en productos alimenticios* [Tesis de pregrado, Universidad Autónoma del Estado de México]. Repositorio Institucional Universidad Autónoma del Estado de México.
- Candelo, E., Casalegno, C., Büchi, G., y Cerutti, M. (2019). Between Climate and Social Changes: How to Struggle Against Adverse Conditions in the Coffee Industry. In *The Future of Risk Management: Volume II: Perspectives on Financial and Corporate Strategies* (Vol. 2, pp. 301–319). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-16526-0\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-16526-0_12)
- Candelo, E., Casalegno, C., Civera, C., y Büchi, G. (2019). A ticket to coffee: Stakeholder view and theoretical framework of coffee tourism benefits. *Tourism Analysis*, **24**(3), 329–340. <https://doi.org/10.3727/108354219X15511864843830>
- Candelo, E., Casalegno, C., Civera, C., y Mosca, F. (2018). Turning farmers into business partners through value co-creation projects. Insights from the coffee supply chain. *Sustainability (Switzerland)*, **10**(4). <https://doi.org/10.3390/su10041018>
- Capítulo Café Colombia Alianza Empresarial para un Comercio Seguro (2021). *BASC Café Colombia*. <https://basccafe.org/>
- Capra, F. (1998). *La trama de la vida. Una nueva perspectiva de los sistemas vivos* (D. Sampau, Trad.). Anagrama. (Obra original publicada en 1996).
- Caravelli, F., y Medda, F. (2016). An agent-based model for agricultural supply chains: The case of uganda. *Springer Proceedings in Complexity*, 231-246. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-29228-1\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-319-29228-1_20)
- Carr, S. C., Meyer, I., Saxena, M., Seubert, C., Hopfgartner, L., Arora, B., Jyoti, D., Rugimbana, R., Kempton, H., y Marai, L. (2022). “Our fair trade coffee tastes better”: It might, but under what conditions? *Journal of Consumer Affairs*, **56**(2), 597-612. <https://doi.org/10.1111/joca.12416>

- Carter, E. (2020). Desperately seeking happy chickens: producer dynamics and consumer politics in quality agricultural supply chains. *International Journal of Social Economics*, **48**(7), 933-946. <https://doi.org/10.1108/IJSE-01-2020-0001>
- Carvalho, J. M., Paiva, E. L., y Vieira, L. M. (2016). Quality attributes of a high specification product: Evidences from the speciality coffee business. *British Food Journal*, **118**(1), 132-149. <https://doi.org/10.1108/BFJ-02-2015-0059>
- Castaldo, L., Lombardi, S., Gaspari, A., Rubino, M., Izzo, L. y Narváez, A. (2021). In vitro bioaccessibility and antioxidant activity of polyphenolic compounds from spent coffee grounds-enriched cookies. *Foods*, **10**(8), 1837.
- Castillo, M. e Iriondo-DeHond, A. (2022). Cómo aprovechar a lo grande los posos del café. *The Conversation*. <https://theconversation.com/como-aprovechar-a-lo-grande-los-posos-del-cafe-175101>
- Castoriadis, C. (1975). *La institución imaginaria de la sociedad*. Tusquets.
- Castro J. y Fong C (2009). Coffee Composition. US10004249B2 y US2010247716A1. United States.
- Cevallos, J. A. y Guerrero, J. Y. (2017). *Extracción y caracterización de colorante natural a partir de la borra de café* [Tesis de pregrado, Universidad de Guayaquil]. Repositorio Institucional UG. <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/18241>
- Chávez, M. M. M., Sarache, W., y Costa, Y. (2018). Towards a comprehensive model of a biofuel supply chain optimization from coffee crop residues. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **116**, 136-162. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.06.001>
- Chen, J., Pun, H., y Zhang, Q. (2023). Eliminate demand information disadvantage in a supplier encroachment supply chain with information acquisition. *European Journal of Operational Research*, **305**(2), 659-673. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.06.002>

- Chen, S. (2023). Blockchain for social impact: Enhancing traceability and economic fairness in the coffee supply chain. En *Concepts, Technologies, Challenges, and the Future of Web 3* (pp. 374–399). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-9919-1.ch018>
- Chia-Nan Wang, M.-C. Y. N.-N.-Y. H. y T.-N. Le. (2021). An integrated forecasting model for the coffee bean supply chain. *Applied Economics*.
- Chin, C (2017a). *Release of connections with local GW when a UE leaves residential / business*. Blackberry Limited. ES2631552T3. Spain.
- Chin, C (2017b). *Management of residential / business network connection and CSFB scenarios*. Blackberry Limited. ES2631817T3. Spain.
- Chkanikova, O., y Sroufe, R. (2021). Third-party sustainability certifications in food retailing: Certification design from a sustainable supply chain management perspective. *Journal of Cleaner Production*, 282, 124344. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124344>
- Cho, D. (2014). Coffee Roaster. KR101653147B1 y KR20160062866A. Corea del Sur.
- Clavijo-Buritica, N., Triana-Sanchez, L., y Escobar, J. W. (2022). A hybrid modeling approach for resilient agri-supply network design in emerging countries: Colombian coffee supply chain. *Socio-Economic Planning Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2022.101431>
- Colombia Trade. (2021). *Exportaciones de Colombia: proyecciones para 2021*. <https://www.colombiatrade.com.co/noticias/exportaciones-de-colombia-proyecciones-para-2021>
- Contreras-Medina, D. I., Contreras-Medina, L. M., Pardo-Nuñez, J., Olvera-Vargas, L. A., y Rodríguez-Peralta, C. M. (2020). Roadmapping as a driver for knowledge creation: A proposal for improving sustainable practices in the coffee supply chain from Chiapas, Mexico, using emerging technologies. *Sustainability (Switzerland)*, 12(14). <https://doi.org/10.3390/su12145817>

- Costa, B. D. R. (2020). Chapter 3 - Brazilian specialty coffee scenario. In L. F. de Almeida y E. E. Spers (Eds.), *Coffee Consumption and Industry Strategies in Brazil* (pp. 51–64). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814721-4.00003-2>
- Crawford, M. M. (2019). A comprehensive scenario intervention typology. *Technological Forecasting and Social Change*, **149**, 119748. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.119748>
- Crawford, M. M., y Wright, G. (2022). The value of mass-produced COVID-19 scenarios: A quality evaluation of development processes and scenario content. *Technological Forecasting and Social Change*, **183**, 121937. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121937>
- Conpes 3439 (2006). Política Nacional Logística. Departamento Nacional de planeación de Colombia. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3439.pdf>
- Conpes 3568 (2008). Política Nacional Logística. Departamento Nacional de planeación de Colombia. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3439.pdf>
- Conpes 3963 (2019). Modernización del sector automotor de carga. Ministerio de transporte de Colombia. <https://transportesostenible.mintransporte.gov.co/normatividad-2/>
- Conpes 4015 (2020). Política Nacional Logística. Departamento Nacional de planeación de Colombia. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/4015.pdf>
- Conpes 3982 (2020). Política Nacional Logística. Departamento Nacional de planeación de Colombia. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3982.pdf>
- Culot, G., Orzes, G., Sartor, M., y Nassimbeni, G. (2020). The future of manufacturing: A Delphi-based scenario analysis on Industry 4.0. *Technological Forecasting and Social Change*, **157**, 120092. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120092>

- Da Cruz Correia, P. F., y Do Reis, J. G. M. (2020). Decision-making in coffee supply chains: An AHP application considering Minas Gerais Case, Brazil. *Interconnected Supply Chains in an Era of Innovation - Proceedings of the 8th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain, ILS 2020*, 135–142. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85085929779&partnerID=40&md5=de67db-5f274017a03f6864bdbec9b912>
- D'Addario, F. (2013). Managing supply-chain security through quality standards: A case study to implement iso 28000 in a global coffee house. In *Risk Management in Port Operations, Logistics and Supply-Chain Security* (pp. 253–262). Taylor and Francis. <https://doi.org/10.4324/9781315850504>
- Da Costa F. y Dayanandan S (2008). High performance wireless networks using distributed control. US 9,172,738 B1. United States.
- Daou, A., Mallat, C., Chammas, G., Cerantola, N., Kayed, S., y Saliba, N. A. (2020). The Ecocanvas as a business model canvas for a circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120938. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120938>
- David, S. A., Machado, J. A. T., Trevisan, L. R., Inácio, C. M. C., y Lopes, A. M. (2017). Dynamics of commodities prices: Integer and fractional models. *Fundamenta Informaticae*, 151(1–4), 389–408. <https://doi.org/10.3233/FI-2017-1499>
- De Assis, L. S., y Camponogara, E. (2016). A MILP model for planning the trips of dynamic positioned tankers with variable travel time. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 93, 372–388. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.06.009>
- Deina, C., do Amaral Prates, M. H., Alves, C. H. R., Martins, M. S. R., Trojan, F., Stevan, S. L., y Siqueira, H. V. (2022). A methodology for coffee price forecasting based on extreme learning machines. *Information Processing in Agriculture*, 9(4), 556–565. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.inpa.2021.07.003>
- Deasy J, Deasy, M (2012). Coffee brewing. Us10076209b2, us2015238041a1. United Kingdom.

- Decreto 2828 (2006). Sistema nacional de competitividad. Gobierno de Colombia. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=21074>
- Depetris Chauvin, N., Porto, G., y Mulangu, F. (2017). A Model of Agricultural Supply Chains, Market Structure and Farm Constraints. En *Advances in African Economic, Social and Political Development*. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-53858-6\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-662-53858-6_2)
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística de Colombia [DANE]. (2020). *Departamento Administrativo Nacional de Estadística de Colombia. Estadísticas por tema: tecnología e innovación. Encuesta de Inversión en Investigación y Desarrollo I+D*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/tecnologia-e-innovacion2>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística de Colombia [DANE]. (2021). *Estadísticas por tema: tecnología e innovación. Encuesta de desarrollo e innovación tecnológica (EDIT)*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/tecnologia-e-innovacion2>
- Departamento Nacional de Planeación [DNP]. (2018). Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Resumen-PND2018-2022-final.pdf>
- Díaz, J. T., Cáceres, R. G. G., y BOLIVAR, F. U. I. L. T. U. S. U. S. (2017). Sorting methodology to select carriers in a Colombian Green Coffee Supply Chain using PROMETHEE method. *IEOM Bogota Conference / 1<sup>st</sup> South American Congress 2017, 2017*(OCT), 673–688. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85067111289&partnerID=40&md5=792ac167166a-9caac7143509e559764c>
- Dionysis, S., Chesney, T., y McAuley, D. (2022). Examining the influential factors of consumer purchase intentions for blockchain traceable coffee using the theory of planned behaviour. *British Food Journal*, *124*(12), 4304-4322. <https://doi.org/10.1108/BFJ-05-2021-0541>
- DispatchTrack (2023). Transformación digital en Colombia: logros y retos. <https://www.beetrack.com/es/blog/transformaci%C3%B3n-digital-en-colombia>

- Do, T.-N., Kumar, V. y Do, M.-H. (2020). Prioritize the key parameters of Vietnamese coffee industries for sustainability. *International Journal of Productivity and Performance Management*, **69**(6), 1153–1176. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-06-2019-0282>
- Domínguez, J. A., González, M. M., Aguilar, V. G. (2007). Investigación en servicios en el ámbito de la dirección de operaciones. *Cuadernos de Economía y Dirección de la Empresa*, **30**, 205-231. [www.redalyc.org/articulo.oa?id=80703008](http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=80703008)
- Donovan, N. K., Foster, K. A., y Parra Salinas, C. A. (2019). Analysis of green coffee quality using hermetic bag storage. *Journal of Stored Products Research*, **80**, 1–9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jspr.2018.11.003>
- Duarte, A. E., Sarache, W. A., y Costa, Y. J. (2014). A facility-location model for biofuel plants: Applications in the Colombian context. *Energy*, **72**, 476-483. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.05.069>
- Duarte, A., Sarache, W., y Costa, Y. (2016). Biofuel supply chain design from Coffee Cut Stem under environmental analysis. *Energy*, **100**, 321-331. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.01.076>
- Durevall, D. (2020). Fairtrade and market efficiency: Fairtrade-labeled coffee in the Swedish coffee market. *Economies*, **8**(2). <https://doi.org/10.3390/ECONOMIES8020030>
- Dwivedi, Y. K., Hughes, L., Kar, A. K., Baabdullah, A. M., Grover, P., Abbas, R., Andreini, D., Abumoghli, I., Barlette, Y., Bunker, D., Chandra Kruse, L., Constantiou, I., Davison, R. M., De', R., Dubey, R., Fenby-Taylor, H., Gupta, B., He, W., Kodama, M., Wade, M. (2022). Climate change and COP26: Are digital technologies and information management part of the problem or the solution? An editorial reflection and call to action. *International Journal of Information Management*, **63**, 102456. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijinfo-mgt.2021.102456>
- Echavarría, J. J., Esguerra, P., McAllister, D. y Robayo, C. F. (2015). *Informe de la misión de estudios para la competitividad de la caficultura en Colombia*. Universidad del Rosario. <https://www.urosario.edu.co/Mision-Cafetera/Archivos/Resumen-Ejecutivo-version-definitiva/>

- Echeverri-Giraldo, L. F., Ortiz, A., Gallego, C. P. e Imbachí, L. C. (2020). Caracterización de la fracción lipídica del café verde en variedades mejoradas de *Coffea arabica* L. *Revista Cenicafé*, 71(2), 39-52. <https://doi.org/10.38141/10778/71203>
- Ephraim D; Spatz, C (2011). Coffee Densifier. Modern Process Equipment Inc. US10071347B2 y US2016242599A1. United States.
- Elsevier - Scopus (2023). *Scopus: Comprehensive, multidisciplinary, trusted abstract and citation database*. <https://www.elsevier.com/products/scopus>
- Escobar, A. (2014). *Sentipensar con la Tierra: nuevas lecturas sobre desarrollo, territorio y diferencia*. Universidad Autónoma Latinoamericana.
- Estevez, C. L., Bhat, M. G., y Bray, D. B. (2018). Commodity chains, institutions, and domestic policies of organic and fair trade coffee in Bolivia. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 42(3), 299–327. <https://doi.org/10.1080/21683565.2017.1359737>
- Estrada. (2017). *Redes de distribución*. [https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6625/03MER\\_Capitol1.pdf](https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6625/03MER_Capitol1.pdf)
- Etter, N; Monahan, J; Ocko, M; Reynolds, B (2020). Changing a virtual world based on real-world locations of players. Zynga Inc. US 11,376,504 B2. United States.
- Fain, G (2019). Globally networked on-demand coffee blending and brewing system. Individual. US 11,406,217 B2. United States.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (2008). Índice de competitividad regional cafetero. En *Ensayos sobre economía cafetera*. (103-131). [https://www.federaciondecafeteros.org/static/files/Indice\\_competitividad\\_cafetero.pdf](https://www.federaciondecafeteros.org/static/files/Indice_competitividad_cafetero.pdf)
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia [FNC]. (2010). *Reglamento de Uso de la Indicación Geográfica Café de Colombia de la Denominación de Origen Café de Colombia*. <https://federaciondecafeteros.org/app/uploads/2022/09/9.-Reglamento-de-Uso-de-la-DO-IGP-Cafe-de-Colombia.pdf>

Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2015). *Café de la sierra nevada*. [https://www.cafedecolombia.com/particulares/wp-content/uploads/2021/07/Reglamento-de-uso-DO-Cafe-de-la-Sierra-Nevada\\_compressed-1-comprimido.pdf](https://www.cafedecolombia.com/particulares/wp-content/uploads/2021/07/Reglamento-de-uso-DO-Cafe-de-la-Sierra-Nevada_compressed-1-comprimido.pdf)

Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2016a). Resolución 02.

<https://federaciondefcafeteros.org/app/uploads/2019/11/6.-Normas-de-calidad-para-cafe-verde-en-almendra-para-exportacion-Resolucion-2-2016.pdf>

Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2016b). *Área cultivada con café total departamental*. [http://www.federaciondefcafeteros.org/particulares/es/quienes\\_somos/119\\_estadisticas\\_historicas/](http://www.federaciondefcafeteros.org/particulares/es/quienes_somos/119_estadisticas_historicas/)

Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2017). *90 años vivir y sembrar el futuro*. [https://fncantioquia.org/libro\\_fnc/90FNC.pdf](https://fncantioquia.org/libro_fnc/90FNC.pdf)

Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2020). *Reintegro de divisas para pequeñas exportaciones de café*. <https://federaciondefcafeteros.org/wp/reintegro-de-divisas-para-pequenos-exportadores/>

Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2021). *Historia del café de Colombia*. <https://www.cafedecolombia.com/particulares/historia-del-cafe-de-colombia/>

Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2021a). *Aprenda a vender su café*. <https://federaciondefcafeteros.org/wp/servicios-al-caficultor/aprenda-a-vender-su-cafe/>

Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2021b). *Indicación Geográfica Protegida*. <https://www.cafedecolombia.com/particulares/indicacion-geografica-protegida/>

Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2021c). *Exportación*. <https://federaciondefcafeteros.org/wp/exportacion/>

Ficafé. (2021). *Historia del café*. <https://ficafe.com.pe/historia-del-cafe/>

- Feher, K., y Katona, A. I. (2021). Fifteen shadows of socio-cultural AI: A systematic review and future perspectives. *Futures*, **132**, 102817. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.futures.2021.102817>
- Feige, D., y Vonortas, N. S. (2017). Context appropriate technologies for development: Choosing for the future. *Technological Forecasting and Social Change*, **119**, 219–226. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.05.025>
- Ferri, E., Galimberti, A., Casiraghi, M., Airoidi, C., Ciaramelli, C., Palmioli, A., Mezzasalma, V., Bruni, I., y Labra, M. (2015). Towards a universal approach based on omics technologies for the quality control of food. *BioMed Research International*, **2015**. <https://doi.org/10.1155/2015/365794>
- Flachs, A. (2022). Degrowing alternative agriculture: institutions and aspirations as sustainability metrics for small farmers in Bosnia and India. *Sustainability Science*, **17**(6), 2301–2314. <https://doi.org/10.1007/s11625-022-01160-9>
- Flammini, A., Brundin, E., Grill, R., y Zellweger, H. (2020). Supply chain uncertainties of small-scale coffee husk-biochar production for activated carbon in Vietnam. *Sustainability (Switzerland)*, **12**(19), 1–27. <https://doi.org/10.3390/su12198069>
- Float Icon Gmbh y Co Kg (2009). Pontoon plant from stabilized single floating elements as foundation for mounting platforms, buildings or technological equipments. EP2226243A1. Deutschland.
- Flórez, S. L., González, L. H. R., Echeverry, A. M. L., Hernández, G., y Prieta, F. (2022). Object Recognition-Driven Cultural Travel Guide for the Coffee Cultural Landscape of Colombia. En: A. González-Briones, A. Almeida, A. Fernandez, E. B. A, D. Durães, J. Jordán, y F. Lopes (Eds.), *Communications in Computer and Information Science: Vol. 1678 CCIS* (pp. 59-70). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-18697-4\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-031-18697-4_5)
- Fontana, E. y Pisalyaput, N. (2022). Understanding the importance of farmer-NGO collaboration for sustainability and business strategy: Evidence from the coffee supply chain. *Business Strategy and The Environment*, **32**(6), 2715–2735. <https://doi.org/10.1002/bse.3266>

- Fontana, E., y Pisalyaput, N. (2022). Understanding the importance of farmer–NGO collaboration for sustainability and business strategy: Evidence from the coffee supply chain. *Business Strategy and the Environment*. <https://doi.org/10.1002/bse.3266>
- Fotiadis, A. K., y Sigala, M. (2015). Developing a framework for designing an Events Management Training Simulation (EMTS). *Journal of Hospitality, Leisure, Sport & Tourism Education*, *16*, 59-71. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhlste.2015.03.001>
- Friberg, R., y Sanctuary, M. (2018). Market stealing and market expansion: an examination of product introductions in the organic coffee market. *Environmental Economics and Policy Studies*, *20*(2), 287-303. <https://doi.org/10.1007/s10018-017-0194-5>
- García-Freites, S., Welfle, A., Lea-Langton, A., Gilbert, P. y Thornley, P. (2020). The potential of coffee stems gasification to provide bioenergy for coffee farms: a case study in the Colombian coffee sector. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *10*(4), 1137-1152. <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00480-8>
- García-Muñoz, A. F. y Riaño-Luna, C. E. (1999). Extracción de celulosa a partir de la borra de café. *Cenicafé*, *50*(3), 205-214.
- García, G.; Lapoint, M. (2015). System and method for determining and displaying sleep restoration levels. US10524682B2. United States.
- Gatti, N., Gomez, M. I., Bennett, R. E., Scott Sillett, T., y Bove, J. (2022). Eco-labels matter: Coffee consumers value agrochemical-free attributes over biodiversity conservation. *Food Quality and Preference*, *98*, 104509. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2021.104509>
- Gayle, P. G., y Lin, Y. (2022). Market effects of new product introduction: Evidence from the brew-at-home coffee market. *Journal of Economics and Management Strategy*, *31*(3), 525–557. <https://doi.org/10.1111/jems.12474>
- Gazzola, P., Pavione, E., Barge, A., y Fassio, F. (2023). Using the Transparency of Supply Chain Powered by Blockchain to Improve Sustainability Relationships with Stakeholders in the Food Sector: The Case Study of Lavazza. *Sustainability (Switzerland)*, *15*(10). <https://doi.org/10.3390/su15107884>

- Ghoshray, A., y Mohan, S. (2021). Coffee price dynamics: An analysis of the retail-international price margin. *European Review of Agricultural Economics*, *48*(4), 983–1006. <https://doi.org/10.1093/erae/jbab027>
- Gillespie, J., y Do, H. H. (2022). Theorising the local adaptation of transnational certification standards. *International and Comparative Law Quarterly*, *71*(1), 37–71. <https://doi.org/10.1017/S0020589321000439>
- Gligor, D. M., Davis-Sramek, B., Tan, A., Vitale, A., Russo, I., Golgeci, I., y Wan, X. (2022). Utilizing blockchain technology for supply chain transparency: A resource orchestration perspective. *Journal of Business Logistics*, *43*(1), 140–159. <https://doi.org/10.1111/jbl.12287>
- Golinucci, N., Stevanato, N., Namazifard, N., Tahavori, M. A., Hussain, L. A. S., Camilli, B., Inzoli, F., Rocco, M. v, y Colombo, E. (2022). Comprehensive and Integrated Impact Assessment Framework for Development Policies Evaluation: Definition and Application to Kenyan Coffee Sector. *Energies*, *15*(9). <https://doi.org/10.3390/en15093071>
- Google Patent Search Advanced (2023). Search and read the full text of patents from around the world with **Google Patents**. <https://patents.google.com/advanced>
- Gosling, J., Jia, F., Gong, Y., y Brown, S. (2016). The role of supply chain leadership in the learning of sustainable practice: toward an integrated framework. *Journal of Cleaner Production*, *137*, 1458–1469. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.029>
- Grabs, J., y Carodenuto, S. L. (2021). Traders as sustainability governance actors in global food supply chains: A research agenda. *Business Strategy and the Environment*, *30*(2), 1314–1332. <https://doi.org/10.1002/bse.2686>
- Grabs, J., Kilian, B., Hernández, D. C., y Dietz, T. (2016). Understanding coffee certification dynamics: A spatial analysis of voluntary sustainability standard proliferation. *International Food and Agribusiness Management Review*, *19*(3), 31–56. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84995493530&partnerID=40&md5=c513966d05727780bbdb59ebb2158a8>

- Groth, P. (2013). Transparency and reliability in the data supply chain. *IEEE Internet Computing*, *17*(2), 69–71. <https://doi.org/10.1109/MIC.2013.41>
- Gussmann, J; Krips, T; Weinberger, L (2007). Coffee machine. Us2008190297a1, us8833237b2. Deutschland.
- Guevara, C. y Murillo, Y. (2018). *Prácticas de consumo, estilo de vida y significados culturales construidos por los consumidores de café en tiendas, en personas entre 20 y 50 años en la ciudad de Bogotá* [Tesis de pregrado USTA]. CRAI Universidad Santo Tomás. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/14248>
- Guido, Z., Knudson, C., Finan, T., Madajewicz, M., y Rhiney, K. (2020). Shocks and cherries: The production of vulnerability among smallholder coffee farmers in Jamaica. *World Development*, *132*, 104979. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2020.104979>
- Guido, Z., Knudson, C., Gerlak, A. K., Mason, S., Hewitt, C. D., y Muth, M. (2022). Implementing a knowledge system: Lessons from the global stewardship of climate services. *Global Environmental Change*, *74*, 102516. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2022.102516>
- Guido, Z., Knudson, C., y Rhiney, K. (2020). Will COVID-19 be one shock too many for smallholder coffee livelihoods? *World Development*, *136*. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2020.105172>
- Guimaraes, Y. M., Eustachio, J., Leal, W., Martínez, L. F., Valle, M. R. D., y Caldana, A. C. F. (2022). Drivers and barriers in sustainable supply chains: The case of the Brazilian coffee industry. *Sustainable production and consumption*, *34*, 42–54. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.08.031>
- Gupta, P (2019). Delivery of relevant content. Qualcomm Inc. ES2715284T3. España
- Gupta, S., Modgil, S., Kumar, A., Sivarajah, U., y Irani, Z. (2022). Artificial intelligence and cloud-based Collaborative Platforms for Managing Disaster, extreme weather and emergency operations. *International Journal of Production Economics*, *254*, 108642. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108642>

- Habaradas, R. B., y Mia, I. B. R. (2021). Bote central: Creating a chain of happiness for philippine coffee farmers. *International Journal of Business and Society*, **22**(2), 941–959. <https://doi.org/10.33736/ijbs.3769.2021>
- Hajjar, R., Newton, P., Adshead, D., Bogaerts, M., Maguire-Rajpaul, V. A., Pinto, L. F. G., McDermott, C. L., Milder, J. C., Wollenberg, E., y Agrawal, A. (2019). Scaling up sustainability in commodity agriculture: Transferability of governance mechanisms across the coffee and cattle sectors in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, **206**, 124–132. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.102>
- Hadi, A. H., Suprihatin y Pramuhadi, G. (2021, 25-26 october). *Exploring the sustainability dimensions of coffee agro-industry: A critical review and future research agenda*. [Conference paper]. 2<sup>nd</sup> International Conference on Innovation in Technology and Management for Sustainable Agroindustry, ITaMSA 2021, Bogor, Indonesia, 1063(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1063/1/012049>
- Hakim, L., Deli, A., y Zulkarnain. (2020). The system dynamics modeling of Gayo arabica coffee industry supply chain management. *1<sup>st</sup> International Conference on Agriculture and Bioindustry 2019, ICAGRI 2019*, **425**(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/425/1/012019>
- Hakmaoui, A., Oubrich, M., Calof, J., y El Ghazi, H. (2022). Towards an anticipatory system incorporating corporate foresight and competitive intelligence in creating knowledge: a longitudinal Moroccan bank case study. *Technological Forecasting and Social Change*, **174**, 121139. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121139>
- Haldar, T., y Damodaran, A. (2022). Identifying market power of retailers and processors: Evidence from coffee supply chain in India. *IIMB Management Review*, **34**(3), 286–296. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.iimb.2022.09.002>
- Halonen A (2016). Coffee Brewer. US11470992B2 y US2020085226A1. Noruega.
- Harper, C (2006). Production optimiser for supply chain management. RU2458398C2. Russia.

- Harrington, L; SHAH, S; Shah A (2019). Computer-Based Platforms/Systems, Computing Devices/Components And/Or Computing Methods for One Or More Technological Applications Involving Real-Time Data Processing Between a Server, One Or More Mobile Computing Devices And Near Field Communication Connected Interactive Posters. US11310307B2 y US2021021669A1. United States.
- Hasan (2017). Comprehensive protective marking based on physically unclonable functions to counteract counterfeiting. RU2756036C2. Russia.
- Hassler, M. L., Andrews, D. J., Ezell, B. C., Polmateer, T. L., y Lambert, J. H. (2020). Multi-perspective scenario-based preferences in enterprise risk analysis of public safety wireless broadband network. *Reliability Engineering & System Safety*, **197**, 106775. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.res.2019.106775>
- Henrique de Moura, E., Bruno Rocha e Cruz, T., y de Genaro Chiroli, D. M. (2020). A framework proposal to integrate humanitarian logistics practices, disaster management and disaster mutual assistance: A Brazilian case. *Safety Science*, **132**, 104965. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104965>
- Hindsley, P., McEvoy, D. M., y Morgan, O. A. (2020). Consumer Demand for Ethical Products and the Role of Cultural Worldviews: The Case of Direct-Trade Coffee. *Ecological Economics*, **177**, 106776. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106776>
- Hong, S; Won, K (2014). Coffee Machine. ISMEDIA CO LTD. KR101654351B1 y KR20160073106A. Corea del Sur.
- Horvat, A., Antic, S., y Jeremic, V. (2015). A New Perspective on Quality Characteristics Determining Supply Chain Management of Coffee Production. *Inzinerine ekonomika-engineering economics*, **26**(3), 239-244. <https://doi.org/10.5755/j01.ee.26.3.5462>
- HUAWEI (2023). Huawei anuncia la creación de un Centro de Innovación en París durante el “Innovation Day 2023”. <https://www.huawei.com/es/news/es/2023/huawei-anuncia-creacion-centro-innovacion-paris>

- Huffaker, R., Griffith, G., Dambui, C., y Canavari, M. (2021). Empirical detection and quantification of price transmission in endogenously unstable markets: The case of the global-domestic coffee supply chain in papua New Guinea. *Sustainability (Switzerland)*, *13*(16). <https://doi.org/10.3390/su13169172>
- Hussain, M., y Malik, M. (2022). How do dynamic capabilities enable hotels to be agile and resilient? A mediation and moderation analysis. *International Journal of Hospitality Management*, *106*, 103266. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhm.2022.103266>
- Ibn-Mohammed, T., Mustapha, K. B., Godsell, J., Adamu, Z., Babatunde, K. A., Akin-tade, D. D., Acquaye, A., Fujii, H., Ndiaye, M. M., Yamoah, F. A., y Koh, S. C. L. (2021). A critical analysis of the impacts of COVID-19 on the global economy and ecosystems and opportunities for circular economy strategies. *Resources, Conservation and Recycling*, *164*, 105169. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105169>
- Icontec e-Collection. (2005). *Café verde. Determinación de la pérdida de masa a 105 °C*. <https://e-collection-icontec-org.bdigital.sena.edu.co/normavw.aspx?ID=1565>
- Icontec e-Collection. (2013). *Café verde y tostado. Determinación de la densidad a granel por caída libre de los granos enteros (método de rutina)*. <https://e-collection-icontec-org.bdigital.sena.edu.co/colecao.aspx>
- Inouye, T. M., y Kling, J. A. (2020). From Farm to Cup: A Coffee Supply Chain Negotiation Role-Play. *Decision sciences-journal of innovative education*, *18*(3), 344–373. <https://doi.org/10.1111/dsji.12215>
- Iriondo-DeHond, A., Aparicio García, N., Fernandez-Gomez, B., Guisantes-Batan, E., Velázquez Escobar, F., Blanch, G. P., San Andres, M. I., Sanchez-Fortun, S., y del Castillo, M. D. (2019). Validation of coffee by-products as novel food ingredients. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *51*, 194–204. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.06.010>

- Jaber, M. M., Ali, M. H., Abd, S. K., Jassim, M. M., Alkhayyat, A., Aziz, H. W., y Alkhuwayldeed, A. R. (2022). Predicting climate factors based on big data analytics based agricultural disaster management. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, **128**, 103243. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103243>
- Jackson, N. C. (2019). Managing for competency with innovation change in higher education: Examining the pitfalls and pivots of digital transformation. *Business Horizons*, **62**(6), 761–772. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bushor.2019.08.002>
- Janakiraman, S., y Ayyanathan, N. (2022). Design and Development of Big Data Framework Using NoSQL–MongoDB and Descriptive Analytics of Indian Green Coffee Export Demand Modeling. En *Lecture Notes in Electrical Engineering* (Vol. 905). [https://doi.org/10.1007/978-981-19-2177-3\\_72](https://doi.org/10.1007/978-981-19-2177-3_72)
- Janissen y Huynh (2018). Chemical composition and value-adding applications of coffee industry by-products: A review. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344917303154>
- Jiang, F., Ma, L., Broyd, T., y Chen, K. (2021). Digital twin and its implementations in the civil engineering sector. *Automation in Construction*, **130**, 103838. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103838>
- Jiang, J., Fan, I.-S., Muriel, M. A., Wen, P. F. J., Rua, C., Yuanji, L., Loizillon, P., y Mielnicka, J. M. (2017). Simulation Modelling for Scenario Planning to Evaluate IVHM Benefit in Naval Ship Building. *Procedia CIRP*, **59**, 178–183. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.10.127>
- Jiménez Varón, C. F. (2018). *Dinámica no suave en un modelo de mercado del café de Colombia* (Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia). Repositorio Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/64245/1053824672.2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Job, D. (2004). La utilización de la borra del café como sustrato de base para el cultivo de *Pleurotus ostreatus* (Jacq.: Fr.) Kummer. *Revista Iberoamericana de Micología*, **21**, 195-197.

- Johannessen, S., y Wilhite, H. (2010). Who really benefits from fairtrade? an analysis of value distribution in fairtrade coffee. *Globalizations*, 7(4), 525–544. <https://doi.org/10.1080/14747731.2010.505018>
- Johnsson, D. Z. (2014). Signs beyond borders: Moving from commodity to differentiated exports in the coffee industry. In *Trademark Protection and Territoriality Challenges in a Global Economy* (pp. 125–148). Edward Elgar Publishing Ltd. <https://doi.org/10.4337/9781781953914.00015>
- Johnstone-Louis, M. (2017). To impact the workplace, think beyond the workplace: Lessons about gender equality in industry from the international women's coffee alliance (IWCA). En P. Flynn, K. Haynes, M. A. Kilgour (Eds.), *Overcoming Challenges to Gender Equality in the Workplace: Leadership and Innovation* (pp. 96-106). Taylor and Francis. <https://doi.org/10.4324/9781351285322>
- Jones, N., Malesios, C., McGinlay, J., Villasante, S., Svajda, J., Kontoleon, A., Begley, A., Gkoumas, V., Cadoret, A., Dimitrakopoulos, P. G., Maguire-Rajpaul, V., y Sepp, K. (2023). Using perceived impacts, governance and social indicators to explain support for protected areas. *Environmental Research Letters*, 18(5). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acc95b>
- Jurado, J. M.; Montoya, E.; Oliveros, C. E.; García, A. J. (2019). Método para medir el contenido de humedad del café verde pergamino en el secado solar del café. *Cenicafé*, 60(2), 135-147. <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc060%2802%29135-147.pdf>
- Kamargianni, M., Georgouli, C., Tronca, L. P., y Chaniotakis, M. (2022). Changing transport planning objectives during the Covid-19 lockdowns: Actions taken and lessons learned for enhancing sustainable urban mobility planning. *Cities*, 131, 103873. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.103873>
- Kamilaris, A., Cole, I. R., y Prenafeta-Boldú, F. X. (2021). Chapter 7 - Blockchain in agriculture. In C. M. Galanakis (Ed.), *Food Technology Disruptions* (pp. 247-284). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821470-1.00003-3>
- Kamran, S. (2017). Sistemas de seguridad informática basados en IA. 201780019904.0. China.

- Kanai, N., Honda, T., Yoshihara, N., Oyama, T., Naito, A., Ueda, K. y Kawamura, I. (2020). Structural characterization of cellulose nanofibers isolated from spent coffee grounds and their composite films with poly (vinyl alcohol): a new non-wood source. *Cellulose*, 27, 5017-5028.
- Kanamaru, T. (2020). Production management as an ordering of multiple qualities: negotiating the quality of coffee in Timor-Leste. *Journal of Cultural Economy*, 13(2), 139–152. <https://doi.org/10.1080/17530350.2019.1697953>
- Kangile, J. R., Kadigi, R. M. J., Mgeni, C. P., Munishi, B. P., Kashaigili, J., y Munishi, P. K. T. (2021). The role of coffee production and trade on gender equity and livelihood improvement in Tanzania. *Sustainability (Switzerland)*, 13(18). <https://doi.org/10.3390/su131810191>
- Keller, J., Markmann, C., y von der Gracht, H. A. (2015). Foresight support systems to facilitate regional innovations: A conceptualization case for a German logistics cluster. *Technological Forecasting and Social Change*, 97, 15–28. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.techfore.2013.12.031>
- Kellermann, R., Biehle, T., y Fischer, L. (2020). Drones for parcel and passenger transportation: A literature review. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 4, 100088. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trip.2019.100088>
- Kennedy, B (1996). Sistema para gestionar producto disponible para promesas. ES2128177T3. España.
- Kennedy, S. P., Gonzales, P., y ROUNGCHUN, J. (2020). Coffee and tea fraud. En *Food Fraud: A Global Threat with Public Health and Economic Consequences* (pp. 139–150). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817242-1.00016-6>
- Kim, J. H., Ahn, D. U., Eun, J. B. y Moon, S. H. (2016). Antioxidant effect of extracts from the coffee residue in raw and cooked meat. *Antioxidants*, 5(3), 21.
- Kittichotsawat, Y., Jangkrajarn, V., y Tippayawong, K. Y. (2021a). Enhancing coffee supply chain towards sustainable growth with big data and modern agricultural technologies. *Sustainability (Switzerland)*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/su13084593>

- Kittichotsatsawat, Y., y Tippayawong, K. Y. (2021b). Conceptual framework of performance improvement in coffee production using integrated lean technique. *11<sup>th</sup> Annual International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, IEOM 2021*, 105–112. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85114251326&partnerID=40&md5=e51b9040b-3c163e17162f0f20072d424>
- Koay, H. Y., Azman, A. T., Zin, Z. M., Portman, K. L., Rusli, N. D., Hasmadi, M., Aidat, O. y Zainol, M. K. (2023). Assessing the impact of spent coffee ground (SCG) concentrations on shortbread: A study of physicochemical attributes and sensory acceptance. *Future Foods*, 8, 100245
- Köhler, S., Bager, S., y Pizzol, M. (2022). Sustainability standards and blockchain in agro-food supply chains: Synergies and conflicts. *Technological Forecasting and Social Change*, 185, 122094. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.122094>
- Kolk, A. (2012). Towards a Sustainable Coffee Market: Paradoxes Faced by a Multinational Company. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 19(2), 79–89. <https://doi.org/10.1002/csr.289>
- Kouadio, L., Byrareddy, V. M., Sawadogo, A., y Newlands, N. K. (2021). Probabilistic yield forecasting of robusta coffee at the farm scale using agroclimatic and remote sensing derived indices. *Agricultural and Forest Meteorology*, 306. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108449>
- Kourmentza, C., Economou, C. N., Tsafrakidou, P. y Kornaros, M. (2018). Spent coffee grounds make much more than waste: Exploring recent advances and future exploitation strategies for the valorization of an emerging food waste stream. *Journal of Cleaner Production*, 172, 980–992.
- Kshetri, N. (2018). 1 Blockchain's roles in meeting key supply chain management objectives. *International Journal of Information Management*, 39, 80–89. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2017.12.005>
- Kumar, B., y Sharma, A. (2021). Managing the supply chain during disruptions: Developing a framework for decision-making. *Industrial Marketing Management*, 97, 159–172. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2021.07.007>

- Kundu, T., Sheu, J.-B., y Kuo, H.-T. (2022). Emergency logistics management—Review and propositions for future research. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **164**, 102789. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102789>
- Kunsiripunyo, W., y Sathirakul, N. (2021). Application of Community Enterprise for Sustainable Supply Chain: Case Study of Coffee Enterprise in Nan Province, Thailand. *6<sup>th</sup> International Conference on Business and Industrial Research, ICBIR 2021*, 15–20. <https://doi.org/10.1109/ICBIR52339.2021.9465866>
- Kuzmina, K., Prendeville, S., Walker, D., y Charnley, F. (2019). Future scenarios for fast-moving consumer goods in a circular economy. *Futures*, **107**, 74-88. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.futures.2018.12.001>
- la Scalia, G., Saeli, M., Miglietta, P. P., y Micale, R. (2021). Coffee biowaste valorization within circular economy: an evaluation method of spent coffee grounds potentials for mortar production. *International Journal of Life Cycle Assessment*, **26**(9), 1805–1815. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01968-0>
- Lagrasta, F. P., Pontrandolfo, P., y Scozzi, B. (2021). Circular economy business models for the Tanzanian coffee sector: A teaching case study. *Sustainability (Switzerland)*, **13**(24). <https://doi.org/10.3390/su132413931>
- Lara Estrada, L., Rasche, L., y Schneider, U. A. (2017). Modeling land suitability for Coffea arabica L. in Central America. *Environmental Modelling and Software*, **95**, 196-209. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.028>
- Lauer, C., McCaulou, J. C., Sessions, J. y Capalbo S. M. (2015). Biomass supply curves for western juniper in Central Oregon, USA, under alternative business models and policy assumptions. *Forest Policy Economy*, **59**, 75-82. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.forpol.2015.06.002>
- Lawrence, M. A., Baker, P. I., Pulker, C. E., y Pollard, C. M. (2019). Sustainable, resilient food systems for healthy diets: The transformation agenda. In *Public Health Nutrition* (Vol. 22, Issue 16, pp. 2916–2920). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/S1368980019003112>
- Lechner, B. E., Rugolo, M. y Mallerman, J. (2018). *Hongos comestibles: el cultivo de flammulina velutipes (enokitake)*. Eudeba.

- Lee, D., y Lee, S. (2021). Digital twin for supply chain coordination in modular construction. *Applied Sciences (Switzerland)*, *11*(13). <https://doi.org/10.3390/app11135909>
- Lee, H. L., y Rammohan, S. V. (2017). Improving Social and Environmental Performance in Global Supply Chains. En *Springer Series in Supply Chain Management* (Vol. 4, pp. 439-464). Springer Nature. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-29791-0\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-319-29791-0_20)
- Lei, G., Hagspiel, V., y Stanko, M. (2023). Price stress testing in offshore oil field development planning. *Energy*, *263*, 125978. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125978>
- León-Bravo, V., Ciccullo, F., y Caniato, F. (2022). Traceability for sustainability: seeking legitimacy in the coffee supply chain. *British Food Journal*, *124*(8), 2566-2590. <https://doi.org/10.1108/BFJ-06-2021-0628>
- Lerner, D. G., Pereira, H. M. F., Saes, M. S. M., y de Oliveira, G. M. (2021). When unfair trade is also at home: The economic sustainability of coffee farms. *Sustainability (Switzerland)*, *13*(3), 1–14. <https://doi.org/10.3390/su13031072>
- Leufkens, H. G., Kusynová, Z., Aitken, M., Hoekman, J., Stolk, P., Klein, K., y Mantel-Teeuwisse, A. K. (2022). Four scenarios for the future of medicines and social policy in 2030. *Drug Discovery Today*, *27*(8), 2252–2260. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.drudis.2022.03.018>
- Li, B., Hernandez, I., Milburn, A. B., y Ramirez-Marquez, J. E. (2018). Integrating uncertain user-generated demand data when locating facilities for disaster response commodity distribution. *Socio-Economic Planning Sciences*, *62*, 84-103. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seps.2017.09.003>
- Li, Q., Ma, M., Shi, T., y Zhu, C. (2022). Green investment in a sustainable supply chain: The role of blockchain and fairness. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *167*, 102908. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102908>
- Lianghui, D., y Reeveerakul, N. (2019). Analysis of critical knowledge in a coffee supply chain. *4<sup>th</sup> Joint International Conference on Digital Arts, Media and Technology and 2nd ECTI Northern Section Conference on Electrical, Electronics, Computer and Telecommunications Engineering, ECTI DAMT-NCON 2019*, 271–275. <https://doi.org/10.1109/ECTI-NCON.2019.8692290>

- Liao, L., Yang, C., y Quan, L. (2023). Construction supply chain management: A systematic literature review and future development. *Journal of Cleaner Production*, **382**, 135230. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135230>
- Ligar, B., Madenda, S., Mardjan, S., y Kusuma, T. (2024). Design of a Traceability System for a Coffee Supply Chain Based on Blockchain and Machine Learning. *Journal of Industrial Engineering and Management*, **17**(1), 151–167. <https://doi.org/10.3926/jiem.6256>
- Lima Jr., P. O., De Castro Jr., L. G., y Zambalde, A. L. (2015). Analysis of Machine Learning Techniques to Classify News for Information Management in Coffee Market. *IEEE Latin America Transactions*, **13**(7), 2285–2291. <https://doi.org/10.1109/TLA.2015.7273789>
- Liu, M., Liu, Z., Chu, F., Dolgui, A., Chu, C., y Zheng, F. (2022). An optimization approach for multi-echelon supply chain viability with disruption risk minimization. *Omega (United Kingdom)*, **112**. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2022.102683>
- Llanos, D., Chong, M., Orellana-Rojas, C., y Puente-Mejia, B. (2022). Coffee Value Chain Cost Logistic Analysis in Chanchamayo Peru. In V. F. J, de B. J. I, A. Leiras, P. C. S. A, G. A. M. D, C. A. Gonzalez-Calderon, V. B. S, M. Rodriguez, y D. Ramirez-Rios (Eds.), *International Conference on Production and Operations Management, POMS 2021* (Vol. 391, pp. 181–197). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-06862-1\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-031-06862-1_13)
- López, R. S., Ponce, B. a. F., Silva, I. M. V., Maldonado-Astudillo, Y. I., Jiménez-Hernández, J., Casamayor, V. F. y Villa, G. A. (2021). Efecto de la adición de subproductos agroindustriales en las propiedades físicas de un biopolímero almidón-gelatina. *Biotecnia*, **23**(1), 52-61. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v23i1.1324>
- Malek, Ž., Loeffen, M., Feurer, M., y Verburg, P. H. (2022a). Regional disparities in impacts of climate extremes require targeted adaptation of Fairtrade supply chains. *One Earth*, **5**(8), 917–931. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.07.008>

- Marimin, Darmawan, M. A., Widhiarti, R. P., y Teniwut, Y. K. (2018). Green productivity improvement and sustainability assessment of the motorcycle tire production process: A case study. *Journal of Cleaner Production*, **191**, 273–282. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.228>
- Marinković, M., Al-Tabbaa, O., Khan, Z., y Wu, J. (2022). Corporate foresight: A systematic literature review and future research trajectories. *Journal of Business Research*, **144**, 289–311. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2022.01.097>
- Martínez-Sáez, N., García, A. T., Pérez, I. D., Rebollo-Hernanz, M., Mesías, M., Morales, F. J., Martín-Cabrejas, M. y Del Castillo, M. D. (2017). Use of spent coffee grounds as food ingredient in bakery products. *Food Chemistry*, **216**, 114–122.
- Masino, F., Montevecchi, G., Calvini, R., Foca, G., y Antonelli, A. (2022). Sensory evaluation and mixture design assessment of coffee-flavored liquor obtained from spent coffee grounds. *Food Quality and Preference*, **96**, 104427. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2021.104427>
- Mayorga, F. A. (2019). Efecto del porcentaje de sustitución de la harina de trigo por extracto de posos de café gastado (SCG) en la actividad antioxidante, características sensoriales y color de galletas dulces [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Trujillo]. Repositorio Institucional UNT. <https://hdl.handle.net/20.500.14414/14616>
- Mayson, S., y Williams, I. D. (2021). Applying a circular economy approach to valorize spent coffee grounds. *Resources, Conservation and Recycling*, **172**. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105659>
- Meinke, H. (2019). Chapter 3 - The role of modeling and systems thinking in contemporary agriculture. In R. Accorsi y R. Manzini (Eds.), *Sustainable Food Supply Chains* (pp. 39-47). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813411-5.00003-X>

- Melkonyan, A., Koch, J., Lohmar, F., Kamath, V., Munteanu, V., Alexander Schmidt, J., y Bleischwitz, R. (2020). Integrated urban mobility policies in metropolitan areas: A system dynamics approach for the Rhine-Ruhr metropolitan region in Germany. *Sustainable Cities and Society*, **61**, 102358. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102358>
- Mendes, K., y Luchine, A. (2020). Non-tariff barriers removal in the Brazilian coffee industry. *Journal of International Trade Law and Policy*, **19**(3), 139–157. <https://doi.org/10.1108/JITLP-04-2020-0027>
- Miehe, R., Bauernhansl, T., Beckett, M., Brecher, C., Demmer, A., Drossel, W.-G., Elfert, P., Full, J., Hellmich, A., Hinxlage, J., Horbelt, J., Jutz, G., Krieg, S., Maufroy, C., Noack, M., Sauer, A., Schließmann, U., Scholz, P., Schwarz, O., ... Wolp- erdinger, M. (2020). The biological transformation of industrial manufactur- ing – Technologies, status and scenarios for a sustainable future of the Ger- man manufacturing industry. *Journal of Manufacturing Systems*, **54**, 50-61. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.11.006>
- Miglietta, P. P., Fischer, C., y de Leo, F. (2022). Virtual water flows and economic wa- ter productivity of Italian fair-trade: the case of bananas, cocoa and coffee. *British Food Journal*, **124**(11), 4009–4023. <https://doi.org/10.1108/BFJ-03-2020-0265>
- Mihailova, A., Liebisch, B., Islam, M. D., Carstensen, J. M., Cannavan, A., y Kelly, S. D. (2022). The use of multispectral imaging for the discrimination of Arabica and Robusta coffee beans. *Food Chemistry: X*, **14**. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100325>
- Min, H. (2010) Artificial intelligence in supply chain management: theory and appli- cations. *International Journal of Logistics: Research and Applications* **13**(1), 13-39, DOI: 10.1080/13675560902736537
- Min, H; Ahn, Y; Yang, S; Min J (2013). Coffee Roaster. CMTECH Co Ltd. US10448663B2 y US2016183586A1. Corea del Sur.
- Minten, B., Dereje, M., Engida, E., y Tamru, S. (2018). Tracking the Quality Premium of Certified Coffee: Evidence from Ethiopia. *World Development*, **101**, 119–132. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2017.08.010>

- Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación (2023). Estrategia Nacional Digital de Colombia 2023 – 2026. [https://www.mintic.gov.co/portal/715/articulos-334120\\_recurso\\_1.pdf](https://www.mintic.gov.co/portal/715/articulos-334120_recurso_1.pdf)
- Mishra, M. K., Jingade, P., y Huded, A. K. C. (2022). Chapter 18 - Applications of omics technologies in Coffea. In G. R. Rout y K. V Peter (Eds.), *Omics in Horticultural Crops* (pp. 383–426). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89905-5.00009-4>
- Mitiku, F., Nyssen, J., y Maertens, M. (2018). Certification of Semi-forest Coffee as a Land-sharing Strategy in Ethiopia. *Ecological Economics*, *145*, 194-204. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.09.008>
- Mohammadi, M., Mohamadi, D., y Nikzad, A. (2023). Equilibrium pricing in supply chains with discrete stochastic demands: A case study in coffee supply and distribution industry. *Journal of Industrial and Production Engineering*, *40*(5), 360-374. <https://doi.org/10.1080/21681015.2023.2201267>
- Mojo, D., Fischer, C., y Degefa, T. (2017). The determinants and economic impacts of membership in coffee farmer cooperatives: recent evidence from rural Ethiopia. *Journal of Rural Studies*, *50*, 84-94. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2016.12.010>
- Moretto, A., y Caniato, F. (2021). Can Supply Chain Finance help mitigate the financial disruption brought by Covid-19? *Journal of Purchasing and Supply Management*, *27*(4), 100713. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pur-sup.2021.100713>
- Moustafa, H., Guizani, C., Dupont, C., Martin, V., Jeguirim, M. y Dufresne, A. (2017). Utilization of torrefied coffee grounds as reinforcing agent to produce high-quality biodegradable PBAT composites for food packaging applications. *Acs Sustainable Chemistry & Engineering*, *5*(2), 1906-1916.
- Murwani, I. A., Mursitama, T. N., Furinto, A., y Abdinagoro, S. B. (2023). Network structure, power difference and alliance stability in sustainable supply chain management: A case in agri-food industry. In C. Harito, E. Sitepu, y N. null (Eds.), *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2594). American Institute of Physics Inc. <https://doi.org/10.1063/5.0113929>



- Naegele, H. (2020). Where does the Fair Trade money go? How much consumers pay extra for Fair Trade coffee and how this value is split along the value chain. *World Development*, 133. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2020.105006>
- Nalau, J., y Cobb, G. (2022). The strengths and weaknesses of future visioning approaches for climate change adaptation: A review. *Global Environmental Change*, 74, 102527. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2022.102527>
- Nascimento, A., Tavares, E., Alves, G., Sousa, E., y Nogueira, B. (2020). Performance evaluation of transport modes for cloud-based inbound logistics: A study based on coffee industry. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 34(2), 126–147. <https://doi.org/10.1504/IJMTM.2020.106209>
- Narváez, M. A. y Villota, L. M. (2018). *Caracterización fisicoquímica del gránulo de la borra de café de la hacienda Supracafé en el municipio de Cajibío, departamento del Cauca* [Tesis de doctorado, Uniautónoma del Cauca]. DSpace Repository Uniautónoma del Cauca. <http://repositorio.uniautonomia.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/306>
- Nayak, C. B., Nanda, P. K., Tripathy, S., Swain, S. C., Das, C. K., y Sahu, R. (2022). Chapter 9 - The economic impact of covid-19 and the role of AI. In V. Chang, M. Abdel-Basset, M. Ramachandran, N. G. Green, y G. Wills (Eds.), *Novel AI and Data Science Advancements for Sustainability in the Era of COVID-19* (pp. 231–252). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90054-6.00002-7>
- Neilson, J., y Pritchard, B. (2007). Green coffee? The contradictions of global sustainability initiatives from an Indian perspective. *Development Policy Review*, 25(3), 311–331. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7679.2007.00372.x>
- Nguyen, N. B. T., Lin, G.-H., y Dang, T.-T. (2021). A two phase integrated fuzzy decision-making framework for green supplier selection in the coffee bean supply chain. *Mathematics*, 9(16). <https://doi.org/10.3390/math9161923>

- Nguyen, T. N., y Mai, K. N. (2015). A Chain of Hands: Prosocial Integration in a Coffee Supply Chain Setting. In *The Handbook of Behavioral Operations Management: Social and Psychological Dynamics in Production and Service Settings*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199357215.003.0014>
- Nguyen, T. T. H., Bekrar, A., Le, T. M., y Abed, M. (2022). The Effect of Machine Learning Demand Forecasting on Supply Chain Performance - The Case Study of Coffee in Vietnam. In L. T. H. A., H. M. Le, L. T. H. A., y P. D. T (Eds.), *Lecture Notes in Networks and Systems: Vol. 363 LNNS* (pp. 247–258). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-92666-3\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-030-92666-3_21)
- Nguyen, T. T. H., Le, T. M., Bekrar, A., y Abed, M. (2022). Some Insights Into Effective Demand Planning. *IEEE Engineering Management Review*, 50(3), 141–148. <https://doi.org/10.1109/EMR.2022.3189028>
- Nguyen, V. D., Pham, T. C., Le, C. H., Huynh, T. T., Le, T. H., y Packianather, M. (2023). An Innovative and Smart Agriculture Platform for Improving the Coffee Value Chain and Supply Chain. In *Studies in Computational Intelligence* (Vol. 1068, pp. 185–197). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-6450-3\\_19](https://doi.org/10.1007/978-981-19-6450-3_19)
- Nguyen, T. v, Nguyen, N. C., y Bosch, O. J. H. (2017). Enhancing the competitive advantages of Vietnamese coffee through the exploration of causal loop modelling in the supply chain. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 26(1), 17–33. <https://doi.org/10.1504/IJLSM.2017.080629>
- Nomaguchi, Y., Osaki, D., Fujita, K., y Division, C. and I. in E. D. D. E. (2017). Optimal design and robustness assessment of product family considering quantity discounts in supply chain. *ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, IDETC/CIE 2017, 2B-2017*. <https://doi.org/10.1115/DETC201767688>
- Noponen, M. R. A., Edwards-Jones, G., Hagggar, J. P., Soto, G., Attarzadeh, N., y Healey, J. R. (2012). Greenhouse gas emissions in coffee grown with differing input levels under conventional and organic management. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 151, 6–15. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.01.019>

- Núñez, C. (2024). Usos alternativos de la borra de café (*Coffea arabica*) como valorización del subproducto en la industria alimenticia [Tesis de pregrado UNAD – CEAD]. Repositorio UNAD. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/60962>
- Nurhazizah, E., Tyasamesi, P., Alamsyah, A., y Kannan, R. (2023). Ensuring Coffee Quality through Blockchain Traceability: A Methodical Approach Using Software Development Life Cycle. *2023 International Conference on Digital Business and Technology Management, ICONDBTM 2023*. <https://doi.org/10.1109/ICONDBTM59210.2023.10326756>
- Observatorio de Complejidad Económica. (2020). Café, incluso tostado o descafeinado; cáscara y cascarilla de café; sucedáneos del café que contengan café en cualquier proporción. (2020). <https://oec.world/es/profile/hs/coffee>
- Okamura, M., Soga, M., Yamada, Y., Kobata, K., y Kaneda, D. (2021). Development and evaluation of roasting degree prediction model of coffee beans by machine learning. En J. Watrobski, W. Salabun, C. Toro, C. Zanni-Merk, R. J. Howlett, L. C. Jain, y L. C. Jain (Eds.), *Procedia Computer Science* (Vol. 192, pp. 4602–4608). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.09.238>
- Olafsdottir, A. H., y Sverdrup, H. U. (2019). Defining a conceptual model for market mechanisms in food supply chains, and parameterizing price functions for coffee, wheat, corn, soybeans and beef. *International Journal on Food System Dynamics*, *10*(2), 224–247. <https://doi.org/10.18461/ijfsd.v10i2.14>
- Opoku, E. K., Wang, M.-J. S., Guevarra, S., Bazylewich, M., y Tham, A. (2023). Envisioning digitalised value chains in the aftermath of COVID-19: a case study of Philippine coffee. *Journal of Agribusiness in Developing and Emerging Economies*, *13*(5), 797–811. <https://doi.org/10.1108/JADEE-12-2021-0315>
- Organismo Nacional de Acreditación de Colombia [ONAC]. (2022). *Directorio Oficial de Acreditados*. <https://onac.org.co/directorio-de-acreditados/>
- Osorio, J. C. (2019). *Obtención de un ingrediente alimentario a partir de suero lácteo y borra de café* [Tesis de doctorado, Universidad de Antioquia]. Repositorio institucional Udea. <https://hdl.handle.net/10495/16500>

- Ortiz-Gonzalo, D., Vaast, P., Oelofse, M., de Neergaard, A., Albrecht, A., y Rosenstock, T. S. (2017). Farm-scale greenhouse gas balances, hotspots and uncertainties in smallholder crop-livestock systems in Central Kenya. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **248**, 58–70. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.002>
- Ortiz-Miranda, D. y Moragues-Faus, A. M. (2015). Governing fair trade coffee supply: Dynamics and challenges in small farmers' organizations. *Sustainable Development*, **23**(1), 41-54. <https://doi.org/10.1002/sd.1570>
- Pandey, P., Collen, A., Nijdam, N., Anagnostopoulos, M., Katsikas, S., y Konstantas, D. (2019). Towards automated threat-based risk assessment for cyber security in smarthomes. In T. Cruz y P. Simoes (Eds.), *European Conference on Information Warfare and Security, ECCWS* (Vols. 2019-July, pp. 839–844). Curran Associates Inc. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85070015302&partnerID=40&md5=cd2f128efd4da6de43a3b112ffbf2f49>
- Panggabean, Y. B. S., y Arsyad, M. (2023). The Future of Coffee, Digital Technology and Farmer's Income. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, **18**(2), 411–418. <https://doi.org/10.18280/ijstdp.180209>
- Partelli, F. L., da Silva, F. A., Covre, A. M., Oliosi, G., Correa, C. C. G., y Viana, A. P. (2022). Adaptability and stability of *Coffea canephora* to dynamic environments using the Bayesian approach. *Scientific Reports*, **12**(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15190-x>
- Peppel, M., Ringbeck, J., y Spinler, S. (2022). How will last-mile delivery be shaped in 2040? A Delphi-based scenario study. *Technological Forecasting and Social Change*, **177**, 121493. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121493>
- Pereira, O., Silva, M. E. y Hendry, L. C. (2020). Supply chain sustainability learning: the COVID-19 impact on emerging economy suppliers. *Supply Chain Management*, **26**(6), 715-736. <https://doi.org/10.1108/SCM-08-2020-0407>

- Pérez, M. C. (2022, febrero 28). Huila, Tolima, Cauca y Nariño ya concentran 49 % de la producción de café en el país. *Agronegocios*. <https://www.agronegocios.co/agricultura/huila-tolima-cauca-y-narino-ya-concentran-49-de-la-produccion-de-cafe-en-el-pais-3311739>
- Perez, J., Kilian, B., Pratt, L., Ardila, J. C., Lamb, H., Byers, L., y Sanders, D. (2017). Economic Sustainability-Price, Cost, and Value. In *The Craft and Science of Coffee* (pp. 133-160). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803520-7.00006-2>
- Pérez-Salazar, M. R., Aguilar-Lasserre, A. A., Cedillo-Campo, M. G., Posada-Gómez, R., del Moral-Argumedo, M. J., y Hernández-González, J. C. (2019). An agent-based model driven decision support system for reactive aggregate production scheduling in the Green Coffee Supply Chain. *Applied Sciences (Switzerland)*, *9*(22). <https://doi.org/10.3390/app9224903>
- Pham, Y., Reardon-Smith, K., Mushtaq, S., y Deo, R. C. (2020). Feedback modelling of the impacts of drought: A case study in coffee production systems in Viet Nam. *Climate Risk Management*, *30*, 100255. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.crm.2020.100255>
- Piao, R. S., Fonseca, L., Januário, E. de C., Macchione Saes, M. S., y Florencio de Almeida, L. (2019). The adoption of Voluntary Sustainability Standards (VSS) and value chain upgrading in the Brazilian coffee production context. *Journal of Rural Studies*, *71*, 13–22. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2019.09.007>
- Pinto, L. F. G., Gardner, T., McDermott, C. L., y Ayub, K. O. L. (2014). Group certification supports an increase in the diversity of sustainable agriculture network-rainforest alliance certified coffee producers in Brazil. *Ecological Economics*, *107*, 59-64. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.08.006>
- Podhorsky, A. (2015). A positive analysis of Fairtrade certification. *Journal of Development Economics*, *116*, 169–185. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2015.03.008>
- Política Nacional de Ciencia CTI (2008). Conpes de Política de CTI. Minciencias. Colombia. [https://minciencias.gov.co/sites/default/files/documento\\_conpes\\_ciencia\\_tecnologia\\_e\\_innovacion.pdf](https://minciencias.gov.co/sites/default/files/documento_conpes_ciencia_tecnologia_e_innovacion.pdf)

- Price, C. (2021). The online genetically modified food debate: Digital food activism, science and alternative knowledges. *Digital Geography and Society*, 2, 100017. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.diggeo.2021.100017>
- Prinsloo, F. C., Schmitz, P., y Lombard, A. (2021). Sustainability assessment framework and methodology with trans-disciplinary numerical simulation model for analytical floatovoltaic energy system planning assessments. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101515. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101515>
- Proença, J. F., Torres, A. C., Marta, B., Silva, D. S., Fuly, G., y Pinto, H. L. (2022a). Sustainability in the Coffee Supply Chain and Purchasing Policies: A Case Study Research. *Sustainability (Switzerland)*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/su14010459>
- Puerta, G. I. (2006). Buenas prácticas agrícolas para el café. *Avances técnicos. Cenicafé*, 349. <https://www.cenicafe.org/es/publications/avt0349.pdf>
- Puerta, G. I. (2015). Buenas prácticas para la prevención de los defectos de la calidad del café: fermento, reposado, fenólico y mohoso. *Avances técnicos. Cenicafé*. <https://www.cenicafe.org/es/publications/avt0461.pdf>
- Pujadi, T., Simamora, B. H., Kumar, V., Hulu, Y., Tumar, y Wihendro. (2020). Modeling of E-Commerce Supply Chains Mobile Application. *2<sup>nd</sup> International Conference on Cybernetics and Intelligent System, ICORIS 2020*. <https://doi.org/10.1109/ICORIS50180.2020.9320757>
- Quiñones-Ruiz, X. F. (2021). Social brokerage: Encounters between Colombian coffee producers and Austrian Buyers – A research-based relational pathway. *Geoforum*, 123, 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2021.04.024>
- Quiñones-Ruiz, X. F., Penker, M., Vogl, C. R., y Samper-Gartner, L. F. (2015). Can origin labels re-shape relationships along international supply chains? – the case of Café de Colombia. *International Journal of the Commons*, 9(1), 416–439. <https://doi.org/10.18352/ijc.529>
- Raford, N. (2015). Online foresight platforms: Evidence for their impact on scenario planning & strategic foresight. *Technological Forecasting and Social Change*, 97, 65–76. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.techfore.2014.03.008>

- Rai, B. K., Singh, D., y Sharma, N. (2024). Blockchain based supply chain management system. In A. Dagur, K. Singh, P. S. Mehra, y D. K. Shukla (Eds.), *Artificial Intelligence, Blockchain, Computing and Security - Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence, Blockchain, Computing and Security, ICABCS 2023* (Vol. 1, pp. 786–790). CRC Press/Balkema. <https://doi.org/10.1201/9781003393580-116>
- Ramirez, S. Q., Sánchez, B. M., Jimenez, S. C., Castañeda, W. R., y Ramirez, D. G. (2019). Avocado and Coffee Supply Chains Specialization in Colombia. In S. Sener (Ed.), *3rd World Conference on Technology, Innovation and Entrepreneurship, WOCTINE 2019* (Vol. 158, pp. 573–581). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.091>
- Ramirez-Villegas, J., Salazar, M., Jarvis, A., y Navarro-Racines, C. E. (2012). A way forward on adaptation to climate change in Colombian agriculture: Perspectives towards 2050. *Climatic Change*, **115**(3–4), 611–628. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0500-y>
- Ramos, E., Mesia, R., Matos, D., y Ruiz, S. (2019). Organic coffee supply chain source process integration: A Peruvian case. *International Journal of Supply Chain Management*, **8**(6), 133–145. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85078062762&partnerID=40&md5=a1b08a22fa0e2b53d-5b46a1c2242f767>
- Ramos, E., Patrucco, A. S., y Chavez, M. (2021). Dynamic capabilities in the “new normal”: a study of organizational flexibility, integration and agility in the Peruvian coffee supply chain. *Supply Chain Management*. <https://doi.org/10.1108/SCM-12-2020-0620>
- Ravi, D., Ramachandran, S., Vignesh, R., Falmari, V. R., y Brindha, M. (2022). Privacy preserving transparent supply chain management through Hyperledger Fabric. *Blockchain: Research and Applications*, **3**(2). <https://doi.org/10.1016/j.bcra.2022.100072>
- Ribeiro, V. S., Leitão, A. E., Ramalho, J. C., y Lidon, F. C. (2014). Chemical characterization and antioxidant properties of a new coffee blend with cocoa, coffee silverskin and green coffee minimally processed. *Food Research International*, **61**, 39–47. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.05.003>



- Ribeiro-Duthie, A. C., Gale, F., y Murphy-Gregory, H. (2021). Fair trade and staple foods: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, *279*, 123586. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123586>
- Rich, K. M., Chengappa, P. G., Muniyappa, A., Yadava, C. G., Manjyapura, G. S., Pradeepa Babu, B. N., Shubha, Y. C., y Rich, M. (2018). Coffee certification in India: Awareness, practices, and sustainability perception of growers. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, *42*(4), 448–474. <https://doi.org/10.1080/21683565.2017.1361497>
- Riezebos, J., y Zhu, S. X. (2020). Inventory control with seasonality of lead times. *Omega*, *92*, 102162. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.102162>
- Robles, J. O., Azzaro-Pantel, C., y Aguilar-Lasserre, A. (2020). Optimization of a hydrogen supply chain network design under demand uncertainty by multi-objective genetic algorithms. *Computers & Chemical Engineering*, *140*, 106853. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.106853>
- Rodríguez, N. y Zambrano, D. A. (2013). Los subproductos del café: fuente de energía renovable. *Avances Técnicos Cenicafé*. 393. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/351>
- Rotta, N. M., Curry, S., Han, J., Reconco, R., Spang, E., Ristenpart, W., y Donis-González, I. R. (2021). A comprehensive analysis of operations and mass flows in postharvest processing of washed coffee. *Resources, Conservation and Recycling*, *170*, 105554. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105554>
- Rwubatse, B., Okoth, M. W., Andago, A. A., Ngala, S., Kimonyo, A. y Bitwayiki, C. (2021). The effect of wheat variety, fermentation and incorporation of ingredients on the texture profile, colour and sensory attributes of whole wheat bread. *Croatian journal of food science and technology*, *13*(2), 227-235.
- Salimi, F., y Salimi, F. (2018). Chapter 5 - Modeling and Simulation: The Essential Tools to Manage the Complexities. In F. Salimi y F. Salimi (Eds.), *A Systems Approach to Managing the Complexities of Process Industries* (pp. 279-407). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804213-7.00005-0>

- Salman, H; Sen, J; Sreedhar, V; Riteshkumar, H (2019). Computer-based platforms or systems, computing devices or components and/or computing methods for technological applications involving provision of a portal for managing user accounts having a login portal configured to defend against credential replay attacks. Capital One Services LLC. US11200311B2 y US2021056192A1. United States.
- Salomone, R., Ioppolo, G. y Saija, G. (2013). The implementation of product-oriented environmental management systems in agri-food SMEs. En R. Salomone, M. T. Clasadonte, M. Proto y A. Raggi (Eds.), *Product-Oriented Environmental Management Systems (POEMS): Improving Sustainability and Competitiveness in the Agri-Food Chain with Innovative Environmental Management Tools* (pp. 303-330). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-6116-2\\_13](https://doi.org/10.1007/978-94-007-6116-2_13)
- Sánchez Ó.J., Ospina D.A., Montoya S. (2017). Compost supplementation with nutrients and microorganisms in composting process. *Waste Management*, 69, 136-153. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.012>
- Sandivari, L., Cortés, C. E., y Rey, P. A. (2021). Humanitarian logistics and emergencies management: New perspectives to a sociotechnical problem and its optimization approach management. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 52, 101952. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ij-drr.2020.101952>
- Saputra, I., Arkeman, Y., Jaya, I., Hermadi, I., y Sutedja, I. (2024). Blockchain-based key-value store to support dynamic smart contract interaction in the agricultural sector. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 33(1), 622–633. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v33.i1.pp622-633>
- Sayogo D.S., Zhang J., Luna-Reyes L., Jarman H., Tayi G., Andersen D.L., Pardo T.A. y Andersen D.F. (2015). Challenges and requirements for developing data architecture supporting integration of sustainable supply chains. *Information Technology and Management*, 16(1), 5-18. <https://doi.org/10.1007/s10799-014-0203-3>
- Sayogo D.S., Zhang J., Pardo T.A., Tayi G.K., Hrdinova J., Andersen D.F. y Luna-Reyes L.F. (2014). Going beyond open data: Challenges and motivations for smart disclosure in ethical consumption. *Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research*, 9(2), 3-4. <https://doi.org/10.4067/S0718-18762014000200002>

- Sayogo, D. S., Najafabadi, M. M., Tayi, G. K., y Pardo, T. A. (2016). Privacy, Confidentiality, and Security Challenges for Interoperable Data Platforms in Supply Chains. In *Public Administration and Information Technology* (Vol. 26, pp. 109–128). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-27823-0\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-27823-0_6)
- Schaafsma, M., Dreoni, I., Ayompe, L. M., Egoh, B., Ekayana, D. P., Favareto, A., Mumbunan, S., Nakagawa, L., Ngouhouo-poufoun, J., Sassen, M., Uehara, T. K., y Matthews, Z. (2023). A framework to understand the social impacts of agricultural trade. *Sustainable Development*, *31*(1), 138–150. <https://doi.org/10.1002/sd.2379>
- Schlecht, L., Schneider, S., y Buchwald, A. (2021). The prospective value creation potential of Blockchain in business models: A delphi study. *Technological Forecasting and Social Change*, *166*, 120601. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120601>
- Schoemaker, P. J. H., Day, G. S., y Snyder, S. A. (2013). Integrating organizational networks, weak signals, strategic radars and scenario planning. *Technological Forecasting and Social Change*, *80*(4), 815–824. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.techfore.2012.10.020>
- Schroth, G., Läderach, P., Blackburn Cuero, D. S., Neilson, J., y Bunn, C. (2015). Winner or loser of climate change? A modeling study of current and future climatic suitability of Arabica coffee in Indonesia. *Regional Environmental Change*, *15*(7), 1473–1482. <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0713-x>
- Schuler, D. A., y Christmann, P. (2011). The effectiveness of market-based social governance schemes: The case of fair trade coffee. *Business Ethics Quarterly*, *21*(1), 133–156. <https://doi.org/10.5840/beq20112116>
- Simons, J (2022). Blockchain-based commercial inventory systems and methods. Americorp Investments LLC. US 10,951,626 B2. United States.
- Sekabira, H., Nijman, E., Späth, L., Krütli, P., Schut, M., Vanlauwe, B., Wilde, B., Kintche, K., Kantengwa, S., Feyso, A., Kigangu, B., y Six, J. (2022). Circular bioeconomy in African food systems: What is the status quo? Insights from Rwanda, DRC, and Ethiopia. *Plos one*, *17*(10 October). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0276319>

- Sembinging, M. T., Gurusinga, L. N., Pasaribu, F. M., y Riezky, A. L. M. (2022). Electronic-based information flow model design as a basis for determining the price of coffee beans in tanah karo. *International Journal of EBusiness and EGovernment Studies*, *14*(4), 151–173. <https://doi.org/10.34109/ijebeg.202214207>
- Sen, A. (1999). *Development as freedom*. Oxford University Press.
- Sengere, R. W., Curry, G. N., y Koczberski, G. (2019). Forging alliances: Coffee grower and chain leader partnerships to improve productivity and coffee quality in Papua New Guinea. *Asia Pacific Viewpoint*, *60*(2), 220–235. <https://doi.org/10.1111/apv.12222>
- Servín-Juárez, R., Trejo-Pech, C. J. O., Pérez-Vásquez, A. Y., y Reyes-Duarte, Á. (2021). Specialty coffee shops in Mexico: Factors influencing the likelihood of purchasing high-quality coffee. *Sustainability (Switzerland)*, *13*(7). <https://doi.org/10.3390/su13073804>
- Shanker, S., Sharma, H., y Barve, A. (2022). Analysing the critical success factors and the risks associated with third-party logistics in the food supply chain: a case of coffee industry. *Journal of advances in management research*, *19*(2), 161–197. <https://doi.org/10.1108/JAMR-11-2020-0307>
- Sharma, A., Adhikary, A., y Borah, S. B. (2020). Covid-19's impact on supply chain decisions: Strategic insights from NASDAQ 100 firms using Twitter data. *Journal of Business Research*, *117*, 443–449. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.05.035>
- Sharma, M. G. (2021). Supply chain, geographical indicator and blockchain: provenance model for commodity. *International Journal of Productivity and Performance Management*. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-05-2021-0288>
- Shavazipour, B., López-Ibáñez, M., y Miettinen, K. (2021). Visualizations for decision support in scenario-based multiobjective optimization. *Information Sciences*, *578*, 1-21. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ins.2021.07.025>
- Shaw, D. R., Achuthan, K., Sharma, A., y Grainger, A. (2019). Resilience orchestration and resilience facilitation: How government can orchestrate the whole UK ports market with limited resources – the case of UK ports resilience. *Government Information Quarterly*, *36*(2), 252-263. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.giq.2018.12.003>

- Shemer, L., Shayanfar, E., Avner, J., Miquel, R., Mishra, S., y Radovic, M. (2022). COVID-19 Impacts on Mobility and Travel Demand. *Case Studies on Transport Policy*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cstp.2022.11.011>
- Shukla, V., y Naim, M. M. (2018). Sensing endogenous seasonality in the case of a coffee supply chain. *International Journal of Logistics Research and Applications*, *21*(3), 279–299. <https://doi.org/10.1080/13675567.2017.1395829>
- SIC (2023). Superintendencia de Industria y Comercio de Colombia. Búsqueda de patentes. <https://sipi.sic.gov.co/sipi/Extra/IP/PT/Qbe.aspx?sid=638128674310145998>
- Sierra, A. (2022). Análisis de calidad para el grano de café verde en Colombia. Tesis de pregrado. Ingeniería de alimentos. UNAD CEAD Ibagué. Colombia. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/51570>
- Silva Restrepo. (2009). *Instituciones, garantía de compra y beneficios para el caficultor en Colombia*. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. [https://federaciondefcafeteros.org/static/files/instituciones\\_garantia\\_compra\\_beneficios.pdf](https://federaciondefcafeteros.org/static/files/instituciones_garantia_compra_beneficios.pdf)
- Silva, M. E., Pereira, M. M. O., y Boffelli, A. (2023). Bridging sustainability knowledge management and supply chain learning: evidence through buyer selection. *International Journal of Operations and Production Management*, *43*(6), 947–983. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-01-2022-0047>
- Spaniol, M. J., y Rowland, N. J. (2022). Business ecosystems and the view from the future: The use of corporate foresight by stakeholders of the Ro-Ro shipping ecosystem in the Baltic Sea Region. *Technological Forecasting and Social Change*, *184*, 121966. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121966>
- Sporchia, F., Caro, D., Bruno, M., Patrizi, N., Marchettini, N., y Pulselli, F. M. (2023). Estimating the impact on water scarcity due to coffee production, trade, and consumption worldwide and a focus on EU. *Journal of Environmental Management*, *327*. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116881>

- Sporchia, F., Taherzadeh, O., y Caro, D. (2021). Stimulating environmental degradation: A global study of resource use in cocoa, coffee, tea and tobacco supply chains. *Current Research in Environmental Sustainability*, **3**. <https://doi.org/10.1016/j.crsust.2021.100029>
- Spring (2014). Object management in supply chain with use of protected identifier. RU2622840C2. Russia.
- Staff, F. (2021). Colombia espera exportar 12,5 millones de sacos de café en 2022. *Forbes Colombia*. <https://forbes.co/2021/12/01/economia-y-finanzas/colombia-espera-exportar-125-millones-de-sacos-de-cafe-en-2022/>
- Starobin, S. M. (2021). Credibility beyond compliance: Uncertified smallholders in sustainable food systems. *Ecological Economics*, **180**, 106767. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106767>
- Statista (2023). Comportamiento del café. Ranking de los 15 principales países productores de café a nivel mundial. USA. <https://es.statista.com/estadisticas/600243/ranking-de-los-principales-productores-de-cafe-a-nivel-mundial/Ulloa>
- Stavroulakis, P. J., Tzora, V. A., Riza, E., y Papadimitriou, S. (2021). Transportation, the pathogen vector to rule them all: Evidence from the recent coronavirus pandemic. *Journal of Transport & Health*, **22**, 101087. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jth.2021.101087>
- Steger, C., Klein, J. A., Reid, R. S., Lavorel, S., Tucker, C., Hopping, K. A., Marchant, R., Teel, T., Cuni-Sanchez, A., Dorji, T., Greenwood, G., Huber, R., Kassam, K.-A., Kreuer, D., Nolin, A., Russell, A., Sharp, J. L., Šmid Hribar, M., Thorn, J. P. R., ... Waiswa, D. (2021). Science with society: Evidence-based guidance for best practices in environmental transdisciplinary work. *Global Environmental Change*, **68**, 102240. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102240>
- Styles, D., Schoenberger, H., y Galvez-Martos, J.-L. (2012). Environmental improvement of product supply chains: Proposed best practice techniques, quantitative indicators and benchmarks of excellence for retailers. *Journal of Environmental Management*, **110**, 135–150. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.05.021>

- Sunmola, F. T., Burgess, P., y Tan, A. (2021). Building Blocks for Blockchain Adoption in Digital Transformation of Sustainable Supply Chains. *Procedia Manufacturing*, 55, 513–520. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.10.070>
- Superintendencia de Industria y Comercio [SIC]. (2005, marzo 4). *Resolución No. 4819 del 4 de marzo del 2005 por la cual declara la protección de la denominación de origen Café de Colombia*.
- Superintendencia de Industria y Comercio. (2022). *Denominaciones de origen y marcas no tradicionales*. [https://www.sic.gov.co/sites/default/files/Denominaciones\\_Origen\\_Marcas\\_Tradicionales%20%20.pdf](https://www.sic.gov.co/sites/default/files/Denominaciones_Origen_Marcas_Tradicionales%20%20.pdf)
- Surarityothin, P., Kamhangwong, D., Fuggate, P., y Wicha, S. (2022). The Finding of Factors to Motivate Stakeholders in the Coffee Supply Chain Towards the Use of Blockchain Technology: Case of Chiang Rai Coffee Supply Chain. *6<sup>th</sup> International Conference on Information Technology, InCIT 2022*, 422–427. <https://doi.org/10.1109/InCIT56086.2022.10067349>
- Tallyn, E., Pschetz, L., Gianni, R., Speed, C., y Elsdén, C. (2018). Exploring machine autonomy and provenance data in coffee consumption: A field study of bit-barista. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, 2(CSCW). <https://doi.org/10.1145/3274439>
- Tan, N. D., Yu, H. C., Long, L. N. B., y You, S.-S. (2022a). Data analytics and optimised machine learning algorithm to analyse coffee commodity prices. *International journal of sustainable agricultural management and informatics*, 8(4), 345–366. <https://doi.org/10.1504/ij sami.2022.126799>
- Tan, N. D., Yu, H. C., Long, L. N. B., y You, S.-S. (2022b). Data analytics and optimised machine learning algorithm to analyse coffee commodity prices. *International Journal of Sustainable Agricultural Management and Informatics*, 8(4), 345–366. <https://doi.org/10.1504/ij sami.2022.126799>
- Taylor, I. J. (2023). The Curation, Interfacing and Analysis Lifecycle of Blockchain Application Data. En J. A. Bañares, J. Altmann, A. B.-Y. O, K. Djemame, V. Stankovski, y B. Tuffin (Eds.), *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics): Vol. 13430 LNCS* (pp. 3-14). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-29315-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-031-29315-3_1)

- Tecnósfera. (2021, 6 de noviembre). Las deudas pendientes de Colombia para ser más competitivo digitalmente. *El Tiempo*. <https://www.eltiempo.com/tecnosfera/novedades-tecnologia/ranking-de-competitividad-digital-mundial-2021-como-quedo-colombia-630473>
- Terroba-Delicado, E., Fiori, S., Gomez-Caturla, J., Montanes, N., Sanchez-Nacher, L. y Torres-Giner, S. (2022). Valorization of liquor waste derived spent coffee grains for the development of injection-molded polylactide pieces of interest as disposable food packaging and serving materials. *Foods*, **11**(8), 1162.
- TerriData - DNP (2019). Departamento Nacional de Planeación de Colombia. <https://terridata.dnp.gov.co/>
- Tharatipyakul, A., Pongnumkul, S., Riansumrit, N., Kingchan, S., y Pongnumkul, S. (2022). Blockchain-Based Traceability System From the Users' Perspective: A Case Study of Thai Coffee Supply Chain. *IEEE Access*, **10**, 98783–98802. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3206860>
- Thiruchelvam, V., Mughisha, A. S., Shahpasand, M., y Bamiah, M. (2018). Blockchain-based technology in the coffee supply chain trade: Case of Burundi coffee. *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering*, **10**(3–2), 121–125. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85054469890&partnerID=40&md5=a8512530d914fcc5b-f2e0ad222167794>
- Tibola, C. S., da Silva, S. A., Dossa, A. A., y Patrício, D. I. (2018). Economically Motivated Food Fraud and Adulteration in Brazil: Incidents and Alternatives to Minimize Occurrence. *Journal of Food Science*, **83**(8), 2028–2038. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14279>
- Tipyakul, A., Pongnumkul, S., Riansumrit, N., Kingchan, S. y Pongnumkul, S. (2022). Blockchain-Based Traceability System From the Users' Perspective: A Case Study of Thai Coffee Supply Chain. *IEEE Access*, **10**, 98783–98802. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3206860>
- Toi, M., Nomaguchi, Y., Sawai, K., Fujita, K., y Division, C. and I. in E. D. D. E. (2018). Strategic-level robust optimal design method of product family and supply chain network. *ASME 2018 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, IDETC/CIE 2018, 2B-2018*. <https://doi.org/10.1115/DETC201885242>

- Toorajipour, R., Sohrabpour, V., Nazarpour, A., Oghazi, P. y Fischl, M. (2021). Artificial intelligence in supply chain management: A systematic literature review. *Journal of Business Research*, **122**, 502-517. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.09.009>
- Torabzadeh, S. A., Nejati, E., Aghsami, A., y Rabbani, M. (2022). A dynamic multi-objective green supply chain network design for perishable products in uncertain environments, the coffee industry case study. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, **17**(3), 220–237. <https://doi.org/10.1080/17509653.2022.2055672>
- Torga, G. N., y Spers, E. E. (2019). Perspectives of global coffee demand. In *Coffee Consumption and Industry Strategies in Brazil: A Volume in the Consumer Science and Strategic Marketing Series* (pp. 21–49). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814721-4.00002-0>
- Torga, G. N., y Spers, E. E. (2020). Perspectives of global coffee demand. In *Coffee Consumption and Industry Strategies in Brazil: A Volume in the Consumer Science and Strategic Marketing Series* (pp. 21–49). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814721-4.00002-0>
- Torres Castillo, N. E., Melchor-Martínez, E. M., Ochoa Sierra, J. S., Ramirez-Mendoza, R. A., Parra-Saldívar, R., y Iqbal, H. M. N. (2020). Impact of climate change and early development of coffee rust – An overview of control strategies to preserve organic cultivars in Mexico. *Science of The Total Environment*, **738**, 140225. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140225>
- Trà, T. T. T., Yến, V. T. N., Thu, N. T. A. y Nguyệt, T. N. M. (2021, 4-5 november). Use of wheat flour and spent coffee grounds in the production of cookies with high fiber and antioxidant content: Effects of spent coffee grounds ratio on the product quality. [Conference paper]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Ho Chi Minh City, Vietnam, 947(1), 012044). IOP Publishing.
- Trollman, H., Garcia-Garcia, G., Jagtap, S., y Trollman, F. (2022). Blockchain for Ecologically Embedded Coffee Supply Chains. *Logistics-basel*, **6**(3). <https://doi.org/10.3390/logistics6030043>

- Troyanovskyi, V. M., y Aung, Y. L. (2015). Probabilistic description of stock movement at the terminal with regular completion. *IFAC-PapersOnLine*, **48**(3), 1351–1356. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.274>
- Trujillo-Díaz, J., y BOLIVAR, F. U. I. L. T. U. S. U. S. (2017). Sorting methodology using PROMETHEE method to consolidate, load and transport goods. *IEOM Bogota Conference / 1st South American Congress 2017, 2017*(OCT), 17–28. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85067107604&partnerID=40&md5=8b00e0ef8c1346adf83a3ba628e0513c>
- Umaran, T., Perdana, T., Kurniadie, D., y Parikesit, P. (2022). Co-Creation Approach in Designing a Sustainable Coffee Supply Chain (a Case in Bandung Regency, West Java, Indonesia). *SUSTAINABILITY*, **14**(1). <https://doi.org/10.3390/su14010476>
- Usva, K., Sinkko, T., Silvenius, F., Riipi, I., y Heusala, H. (2020). Carbon and water footprint of coffee consumed in Finland—life cycle assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, **25**(10), 1976–1990. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01799-5>
- Utrilla-Catalan, R., Rodríguez-Rivero, R., Narvaez, V., Díaz-Barcos, V., Blanco, M., y Galeano, J. (2022). Growing Inequality in the Coffee Global Value Chain: A Complex Network Assessment. *Sustainability (Switzerland)*, **14**(2). <https://doi.org/10.3390/su14020672>
- Ut-tha, V., Lee, P. P., y Chung, R. (2021). Willingness to Pay for Sustainable Coffee: A Case of Thai Consumers. *SAGE OPEN*, **11**(4). <https://doi.org/10.1177/21582440211052956>
- Valencia-Payan, C., Grass-Ramirez, J. F., Ramirez-Gonzalez, G., y Corrales, J. C. (2022). A Smart Contract for Coffee Transport and Storage With Data Validation. *IEEE Access*, **10**, 37857–37869. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3165087>
- Van Hille, I., De Bakker, F. G. A., Ferguson, J. E. y Groenewegen, P. (2020). Cross-sector partnerships for sustainability: How mission-driven conveners drive change in national coffee platforms. *Sustainability (Switzerland)*, **12**(7). <https://doi.org/10.3390/su12072846>

- Vermeulen, W. J. v, y Kok, M. T. J. (2012). Government interventions in sustainable supply chain governance: Experience in Dutch front-running cases. *Ecological Economics*, **83**, 183–196. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.04.006>
- Vermeulen, W. J. v, y Metselaar, J. A. (2015). Improving sustainability in global supply chains with private certification standards: Testing an approach for assessing their performance and impact potential. *International journal of business and globalisation*, **14**(2), 226–250. <https://doi.org/10.1504/IJBG.2015.067437>
- Villalva-Catano, A., Ramos-Palomino, E., Provost, K., Casal, E., y Ciudad del Saber; Enso; et al.; Learn Chile; Naturgy; Secretaría Nacional de Ciencia, T. e I. (SENACYT). (2019). A model in agri-food supply chain costing using ABC costing: An empirical research for peruvian coffee supply chain. *7<sup>th</sup> International Engineering, Sciences and Technology Conference, IESTEC 2019*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/IESTEC46403.2019.00009>
- Vochozka, M., Petrách, F., y Janek, S. (2022). Changes in perception of coffee in EU: luxury good turned inferior. *Economics and Sociology*, **15**(3), 248–267. <https://doi.org/10.14254/2071-789X.2022/15-3/14>
- Vocke, C., Constantinescu, C., y Popescu, D. (2020). Status quo and quo vadis: creativity techniques and innovation methods for generating extended innovation processes. *Procedia CIRP*, **91**, 39–42. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.148>
- Vodenicharova, M. S. (2020). Supply chain study in food industry in Bulgaria. *International journal of retail and distribution management*, **48**(9), 921-938. <https://doi.org/10.1108/IJRDM-03-2019-0080>
- Von der Gracht, H. A., y Stillings, C. (2013). An innovation-focused scenario process — A case from the materials producing industry. *Technological Forecasting and Social Change*, **80**(4), 599-610. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.techfore.2012.05.009>
- VOS-viewer by **Scopus** (2023). Visualizing scientific landscapes. VOSviewer is a software tool for constructing and visualizing bibliometric networks. <https://www.vosviewer.com/>

- Vu, O. T. K., Alonso, A. D., Martens, W., Ha, L. D. T., Tran, T. D., y Nguyen, T. T. (2022). Hospitality and tourism development through coffee shop experiences in a leading coffee-producing nation. *International Journal of Hospitality Management*, *106*, 103300. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhm.2022.103300>
- Wahyudi, A., Wulandari, S., Aunillah, A., Alouw, J. C., y SAWIT, Bri. G. P. K. S. I. (GAPKI); (2020). Sustainability certification as a pillar to promote Indonesian coffee competitiveness. In S. Sudarsono, A. Junaedi, M. Fuad, E. Mulyana, I. M. Tri-sawa, Bursatriannyo, y E. Kristiyaningsih (Eds.), *1st International Conference on Sustainable Plantation, ICSP 2019* (Vol. 418, Issue 1). Institute of Physics Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/418/1/012009>
- Walsh M. E. (2000). Method to estimate bioenergy crop feedstock supply curves. *Bio-mass and Bioenergy*, *18*(4): 283-289. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(99\)00094-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0961-9534(99)00094-X)
- Wang, C.-N., Thai, H. T. N., y Van Thanh, N. (2022). Supplier Selection Fuzzy Model in Supply Chain Management: Vietnamese Cafe Industry Case. *Computers, Materials and Continua*, *72*(2), 2291-2304. <https://doi.org/10.32604/cmc.2022.025477>
- Wang, C.-N., Yu, M.-C., Ho, N.-N.-Y., y Le, T.-N. (2021). An integrated forecasting model for the coffee bean supply chain. *Applied Economics*, *53*(28), 3321-3333. <https://doi.org/10.1080/00036846.2021.1887447>
- Wang, Y., y Sarkis, J. (2021). Emerging digitalisation technologies in freight transport and logistics: Current trends and future directions. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *148*, 102291. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102291>
- Weber, H., y Wiek, A. (2021). Cooperating With “Open Cards”—The Role of Small Intermediary Businesses in Realizing Sustainable International Coffee Supply. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *5*. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.663716>
- Wilson, N. L. W., Wilson, A., y Whittingham, K. (2013). Helping consumers “know who grows” their coffee: The case of THRIVE farmers coffee. *International Food and Agribusiness Management Review*, *16*(3), 177-194. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84883762502&partnerID=40&md5=2c48eb4581a0b9bcad73fc3cc2c2e6a5>

- Wohlert, R; Frew, S; Majmundar, M (2016). Presence-based communication routing service and regulation of same. AT&T Intellectual Property I LP. US 9,967,799 B2. United States.
- Wong, H., Potter, A., y Naim, M. (2011). Evaluation of postponement in the soluble coffee supply chain: A case study. *International Journal of Production Economics*, **131**(1), 355–364. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.08.015>
- World Economic Forum (2018). These solar-powered sensors can give coffee plants a voice. <https://es.weforum.org/videos/coffee-plant-sensors/>
- Wu, G (2016) Variable expansion device with thermal choking for a refrigeration system. US10215460B2. United States
- Xia, Y., Long, H., Li, Z., y Wang, J. (2022). Farmers' Credit Risk Assessment Based on Sustainable Supply Chain Finance for Green Agriculture. *Sustainability (Switzerland)*, **14**(19). <https://doi.org/10.3390/su141912836>
- Yap, C (2012). Integrated supply chain building. US10138059B2 y US2015314960A1. United States. Singapur.
- Yi, X; Chen, T; Huang, T; Minasian, R. (2010) Spectrum sliced photonic signal processor. US8953237B2. United States.
- Yves, H; cailleton, L (2018). Manual press type coffee machine. Hua ku shunde tech electric co ltd (ep3912522a1, ep3912522a4). China.
- Young, M; Thompson, F (2006). Supply Chain Discovery Services. US2008109411A1 y US8170900B2. Canadá.
- Zafra-Calvo, N., Balvanera, P., Pascual, U., Merçon, J., Martín-López, B., van Noordwijk, M., Mwampamba, T. H., Lele, S., Ifejika Speranza, C., Arias-Arévalo, P., Cabrol, D., Cáceres, D. M., O'Farrell, P., Subramanian, S. M., Devy, S., Krishnan, S., Carmenta, R., Guibrunet, L., Kraus-Elsin, Y., ... Díaz, S. (2020). Plural valuation of nature for equity and sustainability: Insights from the Global South. *Global Environmental Change*, **63**, 102115. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102115>

- Zainol, M. K., Mohd Subri, I., Zamri, A. I., Mohd Zin, Z., Faisal, A., y Mamat, H. (2020). Antioxidative properties and proximate analysis of spent coffee ground (SCG) extracted using ultrasonic-methanol assisted technique as a potential functional food ingredient. *Food Res*, **4**(3), 636-644.
- Zeine, H; Renneberg, B; El-Rukby, F. (2019). Techniques for authenticating devices in wireless power delivery environments. US 10,181,760 B2. United States.
- Zengin, G., Sinan, K. I., Mahomoodally, M. F., Angeloni, S., Mustafa, A. M., Vittori, S., Maggi, F. y Caprioli, G. (2020). Chemical Composition, Antioxidant and Enzyme Inhibitory Properties of Different Extracts Obtained from Spent Coffee Ground and Coffee Silverskin. *Foods*, **9**(6), 713. <https://doi.org/10.3390/foods9060713>
- Zhou, R., Wang, Y., Jin, M., Mao, J., y Zheng, X. (2022). Coffee supply chain planning under climate change. *Journal of Integrative Environmental Sciences*, **19**(1), 1-15. <https://doi.org/10.1080/1943815X.2022.2103570>
- Zhou, W., Zhang, R., y Zhou, Y. (2013). A queuing model on supply chain with the form postponement strategy. *Computers & Industrial Engineering*, **66**(4), 643-652. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.09.022>
- Zhunosova, E., Ahimbisibwe, V., Sen, L. T. H., Sadeghi, A., Toledo-Aceves, T., Kabwe, G., y Günter, S. (2022). Potential impacts of the proposed EU regulation on deforestation-free supply chains on smallholders, indigenous peoples, and local communities in producer countries outside the EU. *Forest Policy and Economics*, **143**. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2022.102817>

# APÉNDICE

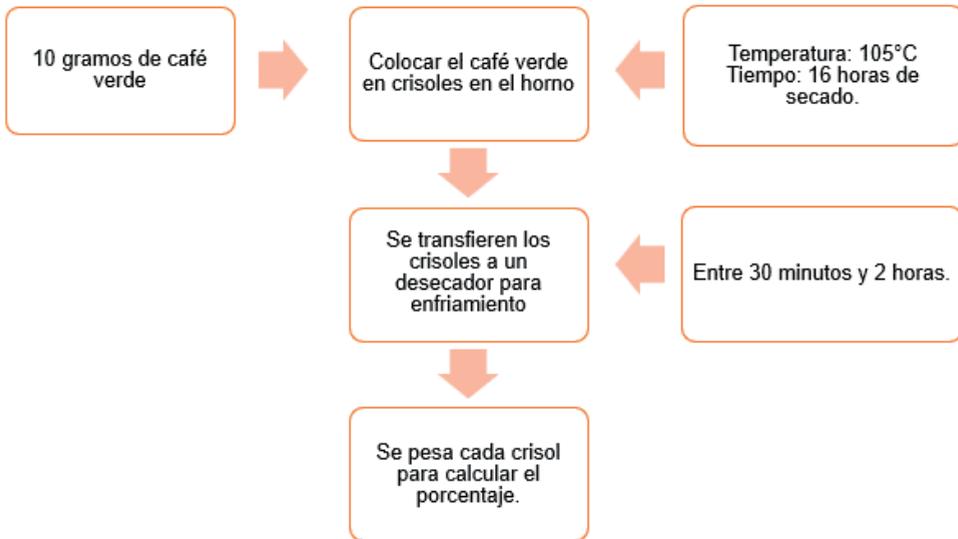
## Análisis de aceptación en grano de café verde

### Determinación de la humedad en café verde

Según Sierra (2022), tradicionalmente, la relación entre el color de los granos de café y su contenido de humedad es subjetiva, dado que una técnica común entre los caficultores consiste en el secado del café en patios o marquesinas. El color ideal es verde, pero este método no garantiza la humedad exacta, lo que impide fijar un precio preciso en la comercialización (Jurado et al., 2019). Existen dos métodos para medir la humedad del café verde: el primero es un método de laboratorio descrito por la normativa Icontec; el segundo es una técnica de medición con equipo portátil que los caficultores pueden utilizar en el campo.

1. La humedad real, según la metodología NTC 2325:2005 para café verde, se determina mediante la pérdida de masa (Icontec e-Collection, 2005).

**Figura 51.** Diagrama de flujo para determinar humedad



**Fuente:** elaboración propia.

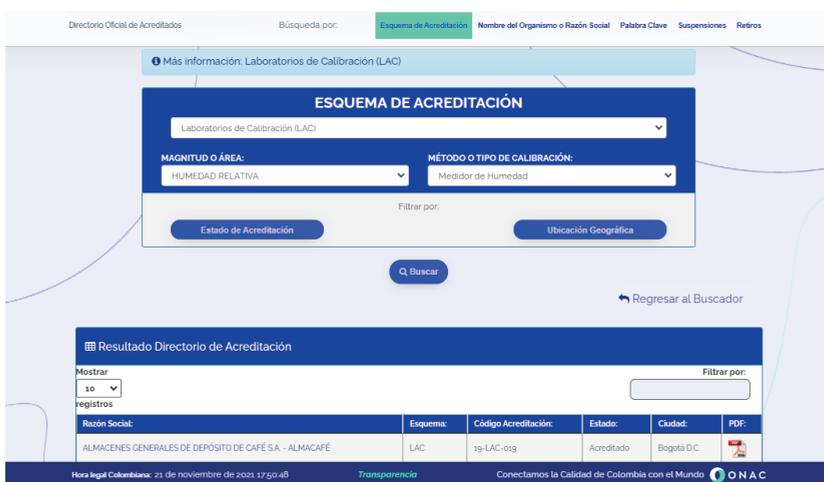
- La medición rápida de humedad se realiza mediante una técnica de constante dieléctrica, utilizando un equipo que debe estar configurado con la curva específica para el café verde *Coffea arabica*.

Al seleccionar un medidor de humedad, se debe considerar lo siguiente:

- El equipo debe ser capaz de medir granos de café.
- El rango de medición debe estar entre 8 % y 13 %.
- Preferiblemente, el equipo debe ser portátil.
- Debe contar con un certificado de calibración; si no lo tiene, se debe calibrar en un laboratorio acreditado por el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia (ONAC).

Es importante verificar la fecha de caducidad del certificado para mantener calibrado el equipo y garantizar la trazabilidad metrológica. Si el equipo sufre daños y requiere mantenimiento, esto puede afectar la precisión de la medición, por lo que se recomienda realizar primero el mantenimiento preventivo y luego la calibración. Para encontrar un laboratorio acreditado que ofrezca este servicio, consulte <https://onac.org.co/> y acceda a la sección de esquema de acreditación, como se muestra en la figura 51.

**Figura 52.** Esquema de acreditación ONAC



**Fuente:** ONAC (2022).

En la actualidad, el único laboratorio acreditado a nivel nacional para ofrecer este servicio es Almacenes Generales de Depósito de Café S.



## A. (Almacafé).

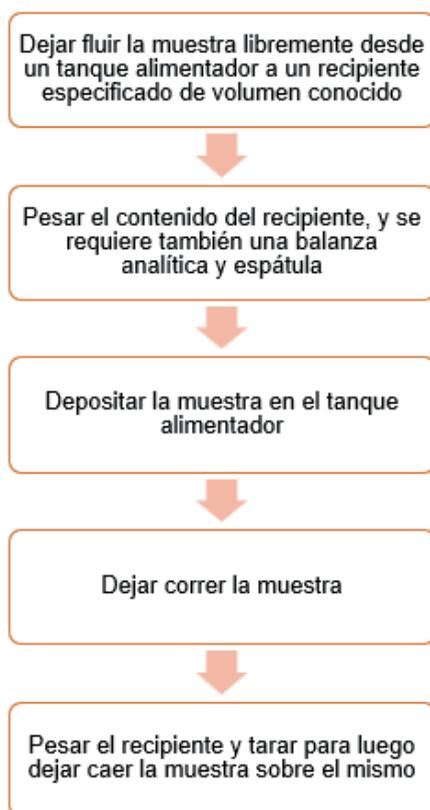
Ambas metodologías para medir la humedad expresan los resultados en porcentaje (%). El rango aceptable de humedad para el café verde es de 10 % a 11 %. Se aconseja a los caficultores utilizar la técnica de medición rápida para determinar la humedad.

### ***Determinación de la densidad***

De acuerdo con Sierra (2022), la densidad del café es crucial ya que refleja la relación entre la masa y el volumen del grano, indicando si el café es denso o no, lo cual es fundamental para el proceso de tostión. Existen dos métodos para medir la densidad: el primero es un procedimiento de laboratorio establecido por la normativa Icontec, y el segundo emplea un equipo específico de laboratorio para la medición.

La determinación de la densidad a granel se realiza mediante el método de caída libre de los granos enteros, según la NTC 4607:2013. Este ensayo se ejecuta en duplicado.

**Figura 53.** Diagrama de flujo para determinar densidad



**Fuente:** elaboración propia.

En el mercado también está disponible un equipo que utiliza un sistema de picnometría por desplazamiento de gases, operando con gas helio. Este dispositivo realiza de manera automática la medición de la muestra (figura 53). Incluye un *software* que facilita la representación gráfica de los datos, permite analizar la misma muestra múltiples veces y calcula el promedio (AccuPyc II, 2021).

**Figura 54.** *AccuPyc II sistema de picnometría por desplazamiento de gases*



**Fuente:** AccuPyc II (2021).

El valor de densidad mínima debe oscilar entre 600 g/L y 660 g/L, según la medición de caída libre de los granos enteros, mientras que el rango de medición con picnómetro es de 1330 g/ml a 1355 g/ml. Aunque este valor no es significativo en el comercio local y no se incluye en los análisis mínimos para la compra de café, es relevante para la exportación. Por lo tanto, se aconseja a los caficultores que, si necesitan realizar este análisis, lo lleven a cabo en un laboratorio que garantice la validez de los resultados.

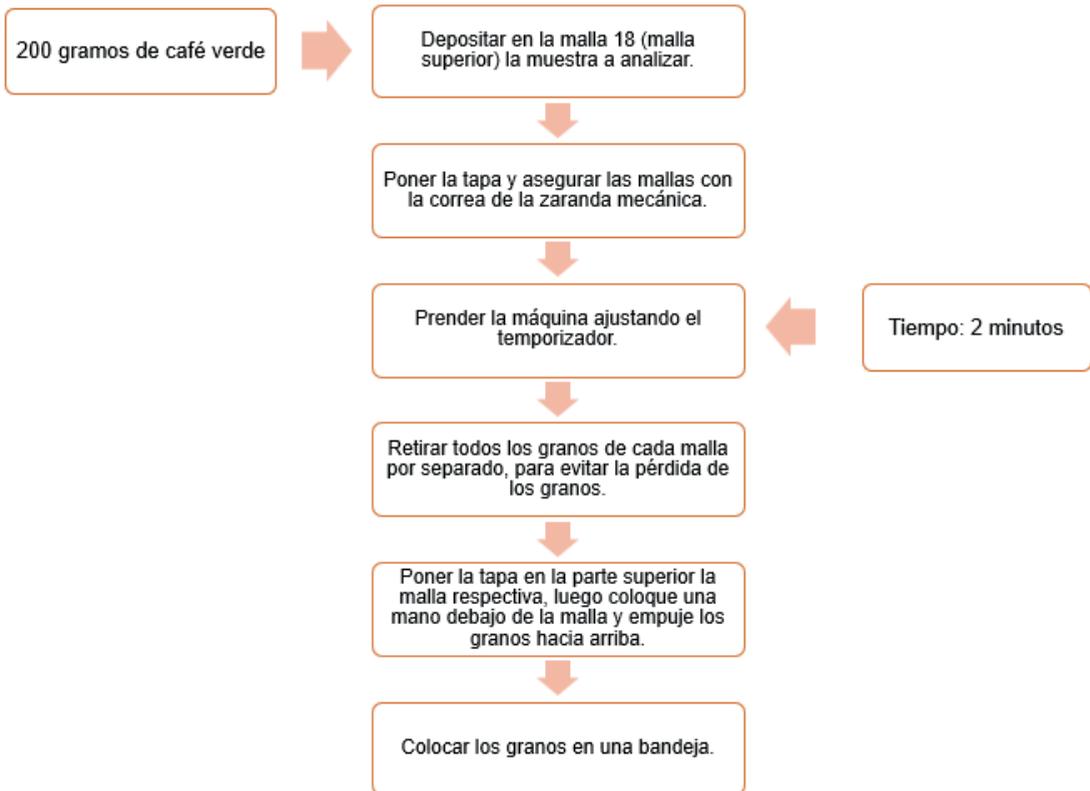
### **Tamaño del grano**

El tamaño del grano de café es crucial para su comercialización. El caficultor participa en dos fases del proceso: primero, durante el lavado del café, donde se usa una zaranda para separar el café defectuoso del bueno antes de secarlo; y, segundo, después de secar el café, cuando se separa visualmente el café con defectos antes de empacarlo. En las cooperativas o durante las compras, se realiza la trilla de una muestra de café y se tamiza utilizando una zaranda, ya sea manual o mecánica (Sierra, 2022).

Este método cuantitativo implica tamizar una muestra de café con una zaranda que posee mallas de agujero redondo de diferentes dimensiones en pulgadas: 18/64, 17/64, 16/64, 15/64, 14/64, 13/64, 12/64 y 0 (para la recuperación de partículas más

pequeñas). Estos tamaños ayudan a clasificar la calidad del café verde. El resultado del análisis muestra el peso del café verde retenido en cada malla, expresado como un porcentaje del peso total de la muestra. La suma de los porcentajes de las mallas debe ser igual a 100 %. Si el total no es 100 %, es necesario repetir el ensayo, ya que podría haberse producido una pérdida de granos.

**Figura 55.** Diagrama de flujo para determinar el tamaño de los granos



**Fuente:** Sierra (2022).

### **Defectos en el grano de café**

Los defectos en los granos de café afectan tanto su apariencia como su sabor y pueden comprometer la seguridad del producto. En la figura 55 se ilustran diversos defectos que pueden impactar la calidad del café y se exhiben las anomalías más comunes identificadas en el producto. Las etapas posteriores a la cosecha, como

la fermentación, el lavado, el secado y el almacenamiento son cruciales y pueden causar cambios irreversibles en la calidad del café. Estos procesos son puntos críticos en la degradación del grano, y cualquier fallo en estas etapas puede resultar en granos de café de baja calidad. La aplicación de técnicas agrícolas avanzadas y el control sistemático durante la producción pueden ayudar a evitar defectos y mejorar la uniformidad y la calidad del café (Sierra, 2022).

Siguiendo con Sierra (2022), Almacafé identifica varios defectos sensoriales comunes en los granos de café:

- **Fermentación y vinagre:** a fermentación descontrolada puede provocar un aumento rápido de la temperatura y acidez en los granos, lo que afecta negativamente su calidad. Estos granos deben ser lavados adecuadamente para evitar defectos.
- **Reposado:** este defecto se produce debido a condiciones inadecuadas de secado y almacenamiento, así como a prácticas deficientes durante el procesamiento. Los granos secados de manera desigual o expuestos a temperaturas elevadas pueden deteriorarse con el tiempo.
- **Moho:** la falta de control del contenido de humedad durante el secado y almacenamiento, así como la falta de higiene en el equipo y el ambiente, pueden causar moho en los granos. Un secado inadecuado puede resultar en granos descoloridos y con olores desagradables.
- **Contaminación química y defectos fenólicos:** la exposición a sustancias químicas como combustibles, pesticidas, solventes, humo, moho, agua, suelo y pinturas puede causar defectos en el café. Los defectos fenólicos pueden ser el resultado de la contaminación con medicamentos, plaguicidas o solventes durante el cultivo, cosecha o almacenamiento.

Para Sierra, la calidad del café puede verse afectada por malas prácticas en la pos-cosecha, por lo tanto, es esencial identificar y aplicar buenas maneras para preservar la calidad del café. Aunque los caficultores no suelen realizar estos análisis para café en pergamino, es importante hacerlo en cooperativas de café, especialmente para los mercados de exportación. La clasificación del grano según su aspecto físico está regida por la norma NTC 2324:2021, que incluye el examen olfativo y visual, y la determinación de materia extraña y defectos. La figura 55 se divide en tres partes:

- **Examen olfativo:** consiste en evaluar el olor de la muestra para determinar si es el característico del café o si presenta olores anormales.

- **Examen visual:** se realiza extendiendo la muestra sobre una superficie negra o naranja para evaluar su origen, tipo y color, y determinar si el café es homogéneo o presenta variaciones.
- **Determinación de materia extraña y defectos:** se pesa una muestra de 300 g, se separan los granos defectuosos y se pesan para calcular el porcentaje de defectos en la muestra.

**Figura 56.** Defectos encontrados en el café verde



**Fuente:** Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (2016a)



De acuerdo con la NTC 5938:2024, la Resolución 01 abril 05 del 2024 (Mecic) y la NTC 2324:2021, la clasificación del grano de café según su aspecto físico incluye:

- Grano bueno: toda almendra sana, grano caracol, grano triángulo y grano elefante o monstruo, si se encuentra unido.
- Defectos menores: grano cristalizado, veteado sobresecado, ámbar o mantequilla, descolorado, reposado, aplastado, malformado o deformado, flojo, no deteriorado picado por insectos, partido y mordido o cortado o ambos con un daño menor del 50 % de grano.
- Defectos mayores: grano cardenillo, vinagre, vinagre parcial o total y granos negros parciales o totales.
- Defectos de impacto medio: grano astillado, averanado, inmaduro o paloteado, flotador, vano, deteriorado picado por insecto, partido, mordido o cortado o ambos, con daños mayores al 50 % del grano. Estos defectos afectan la densidad del producto y su rendimiento.
- Otros defectos: incluyen materia extraña, impurezas y granos guayaba.

La prevención o control de estos defectos se puede lograr durante las etapas de recolección, descerezado y secado del grano.

### **Factor de rendimiento**

El buen factor de rendimiento en el café es el resultado de un cultivo, cuidado y seguimiento meticulosos desde la cosecha hasta la poscosecha y el secado. Estos aspectos influyen en el precio superior que los caficultores pueden recibir por su grano en el mercado. Las cooperativas de caficultores adquieren café diariamente al precio interno de referencia para café seco, y ofrecen un sobreprecio basado en la calidad del café, en el factor de rendimiento y en programas especiales accesibles para los caficultores, de acuerdo con el factor de rendimiento. La relación entre el rendimiento del café verde y su calidad se ilustra en la figura 56 (Sierra, 2022).

**Figura 57.** Factor de rendimiento en café verde

**Fuente:** Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (2016)

La metodología para determinar el factor de rendimiento implica analizar el café pergamino seco (CPS). Este análisis se realiza durante la evaluación física del café destinado a la venta. Dada la calidad promedio del café en el país, el factor de rendimiento promedio es 94, lo que significa que se requieren 94 kilos de café pergamino seco para obtener 70 kg de café excelso. Así, el caficultor recibe un mayor valor por la calidad de su producción, y un menor factor de rendimiento indica un precio más alto para el caficultor. La Federación Nacional de Cafeteros de Colombia proporciona el procedimiento para calcular el factor de rendimiento, detallado en la figura 57, que se debe llevar a cabo en la finca del caficultor. Para ello, se necesitan una balanza, una malla de tamaño 13, y realizar los cálculos correspondientes (Sierra, 2022).

**Figura 58. Factor de rendimiento**

Tome una muestra de 250 gramos de café pergamino seco



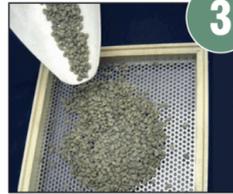
1

Trille la muestra y retire materias extrañas



2

Pase el total de la almendra por la malla 13



3

Retire los granos defectuosos o pasillas\*

\* A partir de la página 10 se describen cada uno de los defectos. Conózclos para obtener su Factor de Rendimiento.



4

Si encontró granos ligeramente brocados, agregue hasta 15 (Broca de Punto)\*

\* Broca de Punto: granos con una sola perforación.



5

Determine el peso del Excelso, o sea la almendra sana sobre malla 13 más los granos de broca de punto agregados



6

Antes de llevar su café a la Cooperativa, obtenga en la finca el Factor de Rendimiento aproximado.

7

Para finalizar, determine el Factor de Rendimiento aplicando la siguiente fórmula.

Asista a las reuniones con el extensionista de su zona y capacítese en la forma de determinar el Factor de Rendimiento en su finca.

$$\text{Factor Calculado} = \frac{250 \text{ gramos} \times 70 \text{ Kilos de Excelso}}{\text{Gramos de Excelso hallado (paso 6)}}$$

Por Ejemplo:

$$\text{Factor Calculado} = \frac{250 \text{ gramos} \times 70 \text{ Kilos de Excelso}}{195.5 \text{ gramos}}$$

**Factor Calculado = 89.5**

Si su Factor de Rendimiento es menor a 92.8, usted recibirá por su café, un precio mayor al precio base.

**Fuente:** Federación Nacional de Cafeteros (2021a).





**Sello Editorial**

Universidad Nacional  
Abierta y a Distancia

---

**UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA  
Y A DISTANCIA (UNAD)**

Sede Nacional José Celestino Mutis  
Calle 14 Sur 14-23  
PBX: 344 37 00 - 344 41 20  
Bogotá, D.C., Colombia

[www.unad.edu.co](http://www.unad.edu.co)